



93 - CONFIGURAÇÃO DE HIDRÓLISE TÉRMICA DEDICADA AO DESCARTE DE LODO ATIVADO: HARMONIA ENTRE OS BALANÇOS DE MASSA E ENERGIA

Marcelo Kenji Miki

Engenheiro Civil e Mestre pela Escola Politécnica da USP. Gerente de Departamento na SABESP da Superintendência de Pesquisa, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação/TX. Coordenador Adjunto da Câmara Temática de Tratamento de Esgoto da ABES.

Endereço: Rua Costa Carvalho, nº 300 – Pinheiros, CEP 05429-900, São Paulo, SP, Brasil,
- Tel: +55 (11) 3388-9013, - e-mail: mmiki@sabesp.com.br

RESUMO

A Hidrólise Térmica é um dos processos mais utilizados no Mundo de forma a produzir mais biogás e gerar menos lodo, possuindo diferentes configurações de processo. Uma destas variantes é a Hidrólise Térmica dedicada ao descarte de lodo ativado, que apresenta um interessante balanço de massa e de energia. Este tipo de configuração mostra-se interessante para grandes estações, sem recebimento externo significativo de torta de outras ETEs, como é a situação de muitas ETEs de grande porte no Brasil. As razões de atratividade recaem devido à produção de biogás ser capaz de sustentar tanto o processo de Hidrólise em si, como também produzir energia suficiente para fazer a secagem térmica de lodo sem o uso de combustível externo, reduzindo assim um grande volume de lodo, sem fazer uso da incineração.

Com base em dados da literatura de experiências em escala real, montou-se uma modelagem para uma situação hipotética de 10.000 ton/ano, de forma a se estudar o balanço de massa e de energia, possibilitando assim um conhecimento mais profundo desta tecnologia e subsidiando o processo de tomada de decisão da implantação desta tecnologia.

PALAVRAS-CHAVE: tratamento de esgoto, sustentabilidade, recuperação de recursos

INTRODUÇÃO

Este trabalho procura mostrar o Estado da Arte referente à configuração de Hidrólise Térmica dedicada para descarte de lodo ativado fazendo um levantamento da literatura mundial, com destaque para as experiências em escala completa.

OBJETIVO

Através dos parâmetros de projeto referentes à Hidrólise Térmica, fez-se uma Modelagem teórica para um fluxo de entrada de 10.000 ton/ano (base seca) de lodo de modo a avaliar o Balanço Térmico e de Massa, para a configuração de Hidrólise Térmica dedicada ao descarte de lodo ativado.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

ETE como Recuperadora de Recursos

No Mundo há uma tendência de se enxergar uma Estação de Tratamento de Esgoto/ETE como uma Usina Recuperadora de Recursos, sendo que nos EUA a entidade WEF – *Water Environment Federation* adotou a terminologia *Water Resource Recovery Facility*.

Como recursos potenciais a serem recuperados numa ETE podemos citar:

- Fase Gasosa: Biogás;
- Fase Sólida: Lodo;
- Fase Líquida: Água de reuso.

Antes de se estabelecer uma busca na recuperação de recursos, deve-se ter em mente que o propósito fundamental de uma ETE é antes de mais nada o próprio tratamento, que deve retornar ao meio ambiente um esgoto devidamente tratado, conforme originalmente projetado, quer seja em termos de carga orgânica, bem como em casos específicos, na remoção de nutrientes e inativação de patogênicos.

No Brasil ainda permanecem barreiras legais que tornam difícil a adoção do uso benéfico de lodo no solo bem como a adoção do reuso. Para o biogás começam a surgir dispositivos legais para o uso do biometano. Já a

utilização do biogás como insumo para a produção de energia elétrica tem uma via mais consolidada devido a este setor estar mais organizado, bem como uma tecnologia mais acessível para nosso setor.

De acordo com MILLS (2015), o lodo sempre foi visto como um resíduo no qual é necessário atingir a forma de tratamento menos dispendiosa num risco mínimo. Com esta ênfase na disposição final, pouco esforço foi direcionado na recuperação de energia, o que pode ser facilmente realizado com os processos. O aumento na recuperação de energia do lodo diminui à exposição do crescente aumento do preço da energia e oferece um mecanismo significativo para redução da pegada de carbono num setor com alta demanda.

Outra questão relevante numa concepção de ETE com recuperadora de recursos é a adoção de uma visão integrada nos balanços de massa e de energia. Dentro desta visão integrada, a adoção da Hidrólise como etapa de pré-tratamento do lodo para a Digestão Anaeróbia vem ganhando cada vez mais popularidade dentre diversas instalações no mundo. A maior parte das instalações de hidrólise térmica estão no Reino Unido e vários projetos estão em curso nos EUA, conforme relatado por WILLIAMS et al (2014).

A digestão anaeróbia de lodo é um processo tradicional de tratamento de esgoto, onde ocorre a estabilização do lodo com a produção de biogás. A etapa de hidrólise do lodo que ocorre na Digestão Anaeróbia é reconhecida como a etapa limitante deste processo, principalmente no que se refere à composição de excesso de lodo ativado gerado no processo aeróbio.

A decomposição anaeróbia da massa de descarte de lodos ativados é dificultada pelas paredes celulares das bactérias de lodo ativado, que formam uma carapaça que acaba não disponibilizando a matéria orgânica para ser decomposta anaerobiamente.

O processo de hidrólise do lodo propõe-se a realizar esta etapa de processo numa unidade externa ao digestor anaeróbio e dedicada especialmente a esta tarefa.

Os processos de Hidrólise do Lodo podem ser divididos em 3 categorias:

- **Físico:** Alta temperatura e alta pressão;
- **Físico - Químico:** Aplicação de Temperatura e Dosagem de Produto Químico;
- **Físico- Biológico:** Aplicação de Temperatura num determinado intervalo de tempo para a Ação de Microrganismos.

A Figura 1 procura ilustrar onde se situa a Hidrólise no Tratamento de Esgoto e seus impactos.

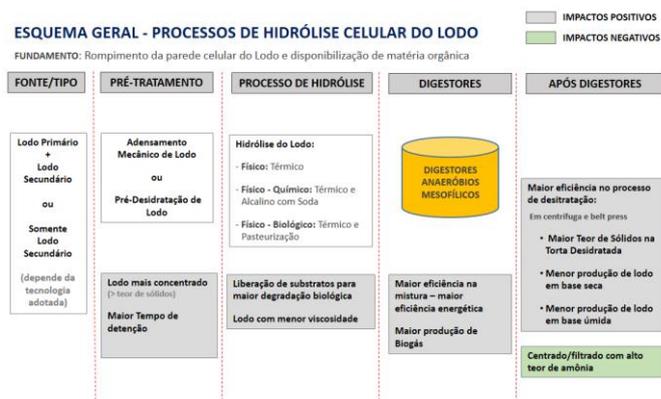


Figura 1: Esquema Geral de Processos de Hidrólise Celular do Lodo

A Hidrólise Térmica é o processo mais popular nas ETEs, sendo assim o processo mais investigado e com inúmeras referências bibliográficas, sendo a tecnologia patentada Cambi a mais popular e dominante do Mercado. As vantagens e desvantagens da tecnologia de Hidrólise Térmica estão descritas na Tabela 1.

Pode-se afirmar também que desde a introdução da Hidrólise Térmica há 20 anos, através da Cambi, foram surgindo variantes no uso desta tecnologia em diferentes configurações, de modo a atender demandas específicas regionais.

O processo mais antigo em uso da Hidrólise Térmica por Cambi é através do processamento integral do lodo primário e secundário, também denominado de “Full Cambi”.

Um padrão que ocorre no Reino Unido é a formação de um consórcio ao redor de uma ETE Central rodeada de ETEs menores, denominadas de satélites, em raios até 50 km. Neste tipo de configuração, a ETE Central é dotada de todo processamento de fase sólida, incluindo a Digestão Anaeróbia, enquanto as ETEs satélites encaminham à Central o lodo desidratado não digerido. Esta configuração é encontrada numa das maiores e mais antiga ETE do Reino Unido, a ETE de Davyhulme operada pela United Utilities, que adotou a Hidrólise Térmica como processo de pré-tratamento de lodo. Já a ETE de Great Billing operada pela Anglian Water também adota o conceito de Usina, mas adotou o Monsal como Processo de Hidrólise Biológica.

No conceito de Usina Central de Tratamento, o lodo desidratado não digerido recebido sofre um processo de diluição de forma a ser processado na Hidrólise. No caso da Hidrólise Térmica com Cambi o lodo deve atingir uma concentração de sólidos em torno de 16,5% e no caso da Hidrólise Biológica o lodo deve atingir uma concentração de 9-10 % de teor de sólidos.

Já em ETEs isoladas, ou seja, que não recebem contribuições significativas de lodo não digerido externo, deve ser adotada a pré-desidratação do lodo de modo a se atingir a concentração de 16,5% de teor de sólidos para a Hidrólise Térmica, sendo este o caso da ETE Blue Plains da DC Water em Washington.



Figura 2: Central de Recebimento de lodo desidratado não digerido da ETE de Davyhulme na Inglaterra operada pela United Utilities

Fonte: Autor (2018);

Tabela1: Vantagens e Desvantagens da Hidrólise Térmica

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Aumento significativo da biodegradabilidade do descarte de lodo ativado • Aumento da biodegradabilidade do lodo primário • Proporciona maiores taxas de aplicação resultando em menores volumes de digestores • Aumento da taxa de produção de biogás • Redução da viscosidade do lodo • Aumento do teor de sólidos na desidratação do lodo • Esterilização do lodo tornando-o livre de patógenos • Redução do odor e recrescimento de patógenos na desidratação • Elimina a formação de espuma e espuma nos digestor • Minimiza a inibição devido ao H₂S • Diminui significativamente os requisitos de processos para secagem e outros processos térmicos • Vários locais operando em escala completa com sucesso 	<ul style="list-style-type: none"> • Demanda energética parasitária em algumas configurações (dependendo do processo) • Maior concentração de amônia no centrado/filtrado que a digestão convencional • Potencial produção de material refratário, especialmente com resíduos de alimento • Aumento potencial na demanda de polímero para desidratação • Maior complexidade que a Digestão Anaeróbia • Necessita de caldeiras • Lodo necessita de resfriamento antes de entrar nos digestores anaeróbios • Necessita de adensamento de lodo por centrífuga em torno de 16-18% • Aumento do desprendimento de nutrientes com potencial formação de cristalização de sais e consequentes problemas de manutenção e deterioração na desidratação

Fonte: BARBER (2016)

De forma a focar a discussão em torno do balanço de massa e energia com a adoção da Hidrólise, será considerada somente a Hidrólise Térmica, devido a maior riqueza de informações práticas disponíveis.

Além do “Full Cambi”, há uma variante interessante de se fazer a Hidrólise somente para o descarte de lodo ativado, conhecido como “WAS Only”. Conforme Panter et al (2018), a hidrólise dedicada ao descarte de lodo ativado tem as seguintes vantagens:

- Possui a mesma produção de biogás que a Hidrólise completa (primário e secundário);
- Proporciona melhoria similar de desidratação do lodo que a Hidrólise completa;
- Necessidade menor ou mesmo ausência de resfriamento de lodo para a entrada do Digestor, a medida em que o descarte de lodo ativado hidrolisado combinado com lodo primário gera um lodo com temperatura próxima da mesofílica

- Instalações menores de Hidrólise Térmica – menor investimento
- Menor demanda de vapor – possibilidade de se utilizar calor da co-geração na hidrólise térmica
- 50% de Intensificação da taxa de digestão onde o lodo é alimentado a 7% mas com baixa viscosidade

E como desvantagens:

- Regime mais complicado para os digestores
- Não gera um lodo Classe A.

SHANA et al (2013) fizeram uma avaliação crítica de se adotar o Cambi somente para o descarte de lodo ativado e iniciaram a discussão observando as diferenças entre a Digestão Convencional e a Digestão Avançada com Cambi, conforme o tipo de lodo. Neste estudo considerou que a composição do lodo em base seca é de 60% de lodo primário e 40% de descarte de lodo ativado.

Tabela 2: Comparação do efeito da Hidrólise Térmica conforme o tipo de Lodo

	Digestão Convencional	Digestão Avançada com Hidrólise Térmica
Destruição de Sólidos Voláteis		
Primário	60%	70%
Descarte de Lodo Ativado	20%	50%
Média	45%	62%
Taxa de Aplicação (kg SV/m³/dia)		
Primário	6,0	7,0
Descarte de Lodo Ativado	1,0	5,0
Média	2,5	6,0
Efeito da Digestão na Desidratação		
Primário	-	Mínima melhoria
Descarte de Lodo Ativado	-	Maior parte da melhoria

FONTE: SHANA et al (2013)

Na prática a Thames Water acabou adotando para a ETE de Long Reach a configuração de Cambi “WAS only”, cujos resultados obtidos para efeito de dimensionamento de novas instalações foram:

- Taxa de Aplicação de Sólidos Voláteis: 5,0 kg SV/m³.dia;
- Redução de Sólidos Voláteis: 56%;
- Produção de Biogás: 433 m³/t seca de sólidos;
- Desidratação de Lodo: 28% de Teor de Sólidos;



Figura 3: Reatores de Hidrólise Térmica dedicada a descarte de lodo ativado da ETE de Long Reach – Thames Water

Fonte: Autor (2018)

Conforme ZIKAKIS et al (2017), para a planta Psyttalia em Atenas também foi adotada a concepção de “WAS Only” combinada com secagem térmica. Nesta planta com atendimento de uma população de 3,5 milhões de pessoas, aproximadamente metade da contribuição de descarte de lodo ativado vai para o processo Cambi. Neste projeto foi adotada a meta mínima de redução de sólidos voláteis de 52%, sendo atingido na prática até 60% de redução de sólidos voláteis.

:

Demanda Energética para os processos de Digestão Convencional e Hidrólise Térmica

MILLS (2015) fez uma avaliação crítica de rotas energéticas da Fase Sólida do lodo com diferentes configurações de processos. As hipóteses adotadas para este estudo foram:

- composição de lodo com 60% de lodo primário e 40% de descarte de lodo ativado;
- 80% de SV para ambos tipos de lodo;
- fluxo de 1 kg por hora de Sólidos Secos.
- Pré-desidratação do lodo antes da Hidrólise para um teor de sólidos de 16,5%;

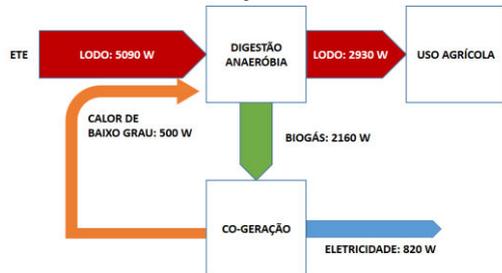


Figura 4: Fluxo Energético para Digestão Convencional com Co-Geração e Uso Agrícola (1kg/hora)
Fonte: MILLS (2015)

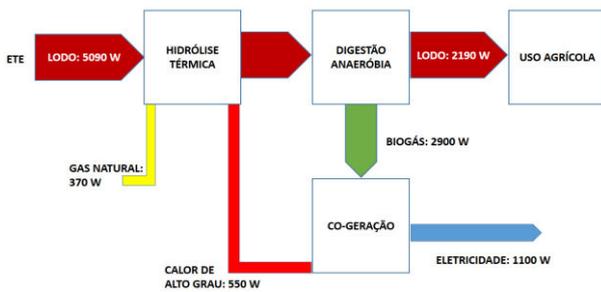


Figura 5: Fluxo Energético para Digestão Avançada com Hidrólise Térmica, com Co-Geração e Uso Agrícola (1kg/hora)
Fonte: MILLS (2015)

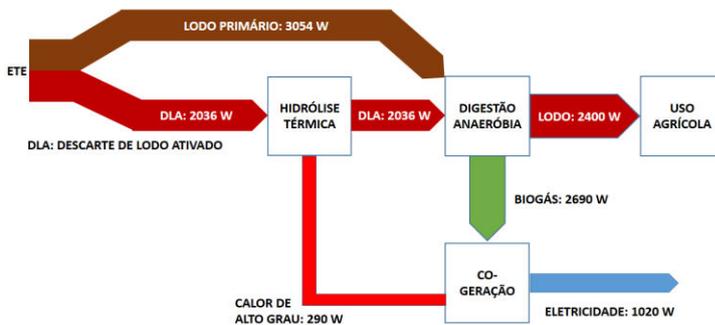


Figura 6: Fluxo Energético para Digestão Avançada com Hidrólise Térmica para Descarte de Lodo Ativado, Co-Geração e Uso Agrícola
Fonte: MILLS (2015)

Dos fluxos apresentados nas Figuras 4, 5 e 6, podemos observar que a demanda energética para Digestão Convencional é de 500 Wh por kg de entrada de lodo de entrada, enquanto que para “Full Cambi” é de 920 Wh por kg de entrada de lodo e para WAS Only é de 290 Wh por kg de entrada de lodo.

Ou seja, a Digestão Convencional demanda mais energia térmica que a configuração de Digestão Avançada com “WAS Only”. Apesar da Hidrólise Térmica trabalhar em alta temperatura e pressão, a demanda energética resulta menor que a Digestão Convencional, pois o lodo é processado num alto teor de sólidos. Ou seja, gasta-se mais energia numa Digestão Convencional pois “cozinha-se água”. Como a Hidrólise Térmica altera a viscosidade do lodo, o lodo combinado com alto teor de sólidos (descarte de lodo ativado hidrolisado e lodo primário) resultante não irá atrapalhar a questão de mistura interna no digestor. E a temperatura resultante da mistura é muito próxima da temperatura ótima do regime mesofílico. Este balanço de massa e de energia tem um fluxo favorável.



Com base nestes estudos, propõe-se neste artigo reconstruir os balanços de energia e de massa com os dados da literatura de forma a buscar uma maior familiaridade e sensibilidade com os parâmetros técnicos envolvidos num projeto com Hidrólise Térmica.

Do trabalho de BARBER (2016) é possível extrair a demanda específica de energia em base seca:

- Entrada de Lodo: 10.000 ton/ano;
- Lodo Adensado: 9800 ton/ano => 1,1187 ton/hora;
- Energia para Hidrólise Térmica: 824 kWh/h;
- Demanda específica de energia em base seca para Hidrólise Térmica: 736,6 kWh/ton (633.362 kcal/ton)

Demanda energética específica para Secagem Térmica

Os sistemas de secagem de lodo demandam alta quantidade de energia com valores entre 1400 – 1700 Btu por kg de água evaporada, de acordo com US EPA (2006), enquanto que a demanda teórica para água é de 970 Btu/lb de água.

Tabela 3: Demanda de Energia por massa de água removida

Demanda de Energia por água removida
1400 – 1700 (Btu/Pound)
3256 – 3954 (kJ/kg)
777 – 944 (kcal/kg)

Fonte: US EPA (2006)

De acordo com MILLS (2015), os secadores térmicos de baixo grau de calor podem utilizar fontes de calor com até 50°C. Na década de 90 houve uma expansão da tecnologia de secagem térmica de lodo por secador de esteira, após a ocorrência de explosões de secadores do tipo tambor. Para esta tecnologia, a demanda específica de energia é de 0,8 – 0,9 MWh/ton de água removida (2,9 - 3,2 MJ/kg água de removida). Devido à alta vazão de ar de circulação, a demanda de energia elétrica é de 80kWh/ton de água removida. Apesar do secador térmico do tipo esteira poder trabalhar com uma fonte de calor a 50°C, é mais comum encontrar na prática temperaturas de trabalho de 90°C, que é calor que pode ser extraído de unidades de co-geração.

De acordo com BARBER, CHRISTY (2018), normalmente os secadores requerem 800 a 1100 kWh por tonelada de água removida (688 a 946 kcal/kg água removida).

Para efeitos de cálculo posteriores, será adotado o valor de **946 kcal/kg** de água removida demanda específica de secagem.

Co-Geração

A ênfase na geração de recursos em ETEs tem motivado a adoção de tecnologias produtoras de energia, como por exemplo, a co-geração que produz a energia elétrica e a energia térmica. Outra rota que também vem ganhando destaque é a produção de biometano.

No estudo de ROEDIGER et al (2009), assumiu-se a eficiência energética em 35% e a térmica em 55% para um estudo com secador térmico de esteira.

Já para PFEFFER et al (2018) adotaram para um estudo em Tampa, uma eficiência energética de 35% e a térmica em 40%.

Para efeitos de cálculos posteriores, será adotado o valor de **eficiência energética de 35% e a térmica em 40%**.

RESULTADOS OBTIDOS

De forma a prosseguir no estudo estabelecido por MILLS (2015), propôs-se uma modelagem teórica da configuração de Hidrólise Térmica – “WAS Only”, Motor de Co-Geração e Secagem Térmica, de modo a fazer uma avaliação crítica desta rota. Esta alternativa pode ser bem interessante para a Região Metropolitana de São Paulo/RMSP, uma vez que uso benéfico do lodo no solo possui barreiras tanto quanto a disponibilidade de área agrícola como a qualidade atual de contaminantes. Assim esta solução teria como vantagem a redução drástica de volume de lodo, devido a secagem térmica sem a utilização de combustível externo, e sem fazer uso da Incineração.

Hipóteses adotadas no estudo:

Entrada:

- 10.000 toneladas/ano de Lodo Seco Processado, mesma base utilizada por BARBER (2016) e MILLS (2015);

- 60% de Lodo Primário e 40% de Lodo Secundário;
- Relação SV/ST: 80% (tanto para lodo primário como para lodo secundário);
- Teor de Sólidos do Lodo Primário após Adensamento por Gravidade: 5%;
- Teor de Sólidos do Lodo Secundário após Adensamento Mecânico: 6%;
- Captura de Sólidos na Desidratação: 98%
- Captura de Sólidos no Adensamento: 98%;

Digestão Convencional

- Teor de sólidos do Lodo Primário Adensado por Gravidade: 5%;
- Teor de sólidos do Lodo Secundário Adensado Mecanicamente: 6%;
- Captura de Sólidos nos Adensamentos Mecânico e Por Gravidade: 98%, (na prática estes valores são menores);
- Destruição de Sólidos Voláteis na Digestão Convencional: 45%, SHANA et al (2013);
- Demanda específica de Energia na Digestão Convencional: $E \text{ (kcal/dia)} = m \text{ (kg/dia)} * 1 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C} * \Delta t \text{ (}^\circ\text{C)} \Rightarrow$
- Temperatura do Lodo Inicial: 20°C;
- Temperatura do Lodo na Digestão Convencional: 40°C

Processo Hidrólise Térmica – “WAS Only”:

- Teor de sólidos da torta na desidratação: 28%, MILLS (2015);
- Pré-Desidratação a 16,5%; MILLS (2015);
- Destruição de Sólidos Voláteis na Digestão Avançada: 54%, MILLS (2015);
- Demanda específica de energia de Hidrólise Térmica em base seca: 633.362 kcal/ton; BARBER (2016)
- Temperatura de Saída do Lodo após Hidrólise Térmica: 90°C;

Biogás:

- Premissa Produção de Biogás, 1 Nm³/kg SV destruídos;
- Premissa de Metano no Biogás: 65%;
- Premissa de Poder calorífico inferior do metano (PCI do CH₄): 8550 kcal/Nm³ (9,94 kWh/Nm³);

Desidratação de Lodo

- Após Digestão Convencional: 22% PANTER et al (2018)
- Após Hidrólise Térmica: 28%; SHANA et al (2013);

Demanda Específica na Secagem Térmica: 946 kcal/kg de água removida, BARBER; CHRISTY (2018)

Co-Geração, PFEFFER et al (2018):

- Eficiência Energética: 35%;
- Eficiência Térmica: 40%

Modelagem Matemática

Fluxo de Massa Simplificado na Digestão Convencional

- Lodo de Entrada: 10.000 ton/ano;
 - Lodo de Entrada em SF: 20% * 10.000 = 2.000 ton/ano;
 - Lodo de Entrada em SV: 80% * 10.000 = 8.000 ton/ano;
- Lodo Adensado: 98% * 10.000 = 9.800 ton/ano;
 - Lodo Adensado em SF: 98% * 2.000 = 1.960 ton/ano;
 - Lodo Adensado em SV: 98% * 8.000 = 7.840 ton/ano;
- Lodo Digerido: 45% de destruição de SV
 - Lodo Digerido em SF: 1.960 ton/ano;
 - Lodo Digerido em SV: 55% * 7.840 = 4.312 ton/ano;
 - Lodo Digerido em ST: 6272 ton/ano
- Lodo Desidratado (base seca): 98% de captura = 98% * 6272 = 6.147 ton/ano;
 - Lodo Desidratado em SF: 98% * 1.960 = 1.921 ton/ano;
 - Lodo Desidratado em SV: 98% * 4.312 = 4.226 ton/ano;

- Lodo Desidratado em ST: 6147 ton/ano; (16,8 ton/dia)
- Lodo Desidratado em torta:
 - Teor de Sólidos da Torta: 22%;
 - Lodo Desidratado em ST: 6147 ton/ano;
 - Lodo Desidratado em Torta: 27.941 ton/ano; (76,6 ton/dia)
- Lodo Seco Termicamente:
 - Teor de Sólidos do Lodo Seco: 90%;
 - Lodo Desidratado em ST: 6147 ton/ano;
 - Lodo Seco Termicamente: 6.830 ton/ano = 18,7 ton/dia;
 - Quantidade de Água Removida (de 22% a 90%): $27.941 - 6.830 = 21.111$ ton água removida/ano;
57,8 ton água removida/dia;

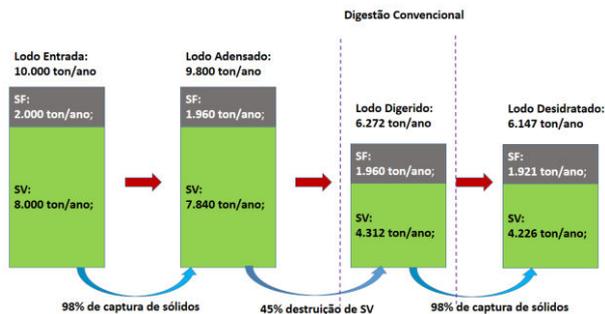


Figura 7: Fluxo de Massa Seca na Digestão Convencional

Produção Diária de Lodo em Massa Úmida

- Lodo Desidratado em Torta a 22%: 27.941 ton/ano; 76,5 ton/dia;
- Lodo Seco Termicamente a 90%: 6.830 ton/ano; 18,7 ton/dia;

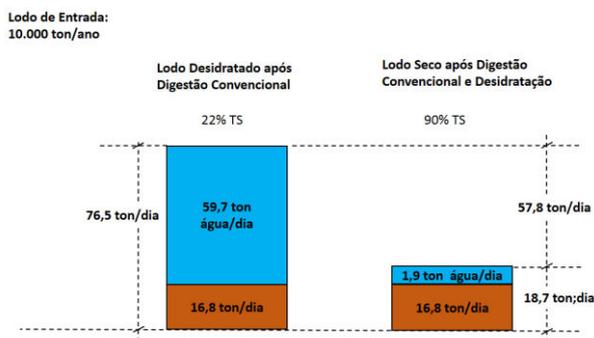


Figura 8: Produção Diária de Lodo em Massa Úmida para Digestão Convencional

Produção Total de Biogás

Destruição de Sólidos Voláteis = $(45\%) \times 7.840 \text{ ton/ano} = 3.528 \text{ ton/ano} = 9,6658 \text{ ton/dia}$;

Produção de Biogás = $9,666 \text{ Nm}^3/\text{dia}$;

Produção Energética de Biogás = $8550 \text{ kcal} \times 0,65 \times 9,666 = 53.717,425 \text{ kcal/dia}$

Demanda Energética para Digestão Convencional

- Lodo Adensado: 9.800 ton/ano (base seca);
 - Lodo Primário Adensado: 60% do Lodo Adensado;
 - Lodo Primário Adensado: 5.880 ton/ano (base seca);
 - Teor de Sólidos do Lodo Primário: 5%;
 - **Lodo Primário Adensado:** 117.600 ton/ano (base úmida);
 - Lodo Secundário Adensado: 40% do Lodo Adensado;
 - Lodo Secundário Adensado: 3.920 ton/ano (base seca);
 - Teor de Sólidos do Lodo Primário: 6%;
 - **Lodo Secundário Adensado:** 65.333 ton/ano (base úmida);
- Demanda de Energia para Digestão Convencional:
 - Lodo Primário Adensado + Lodo Secundário Adensado: $117.600 + 65.333 = 182.933 \text{ ton/ano}$;



- ΔT = Admitindo a temperatura de 40°C na digestão convencional e temperatura inicial de 20°C, temos um diferencial de 20°C
- Demanda de Energia para Digestão Convencional: $182.933.000 \text{ kg/ano} * 1 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C} * 20^\circ\text{C} = 3.658.660.000 \text{ kcal/ano} = 10.023.726 \text{ kcal/dia}$;

Demanda Energética para Secagem Térmica Integral de Lodo

- Lodo Desidratado em Torta a 22%: 27.941 ton/ano;
- Lodo Seco Termicamente: 6.830 ton/ano;
- Quantidade de Água Removida (de 22% a 90%): $27.941 - 6.830 = 21.111 \text{ ton água removida/ano}$;
- Demanda Energética para Secagem Térmica:
 - Demanda Específica na Secagem Térmica: 946 kcal/kg de água removida;
 - Qtde: 21.111 ton/ano;
 - Demanda Energética para Secagem Térmica: $946.000 * 21.111/365 = 54.715.085 \text{ kcal/dia}$

Checagem Intermediária de Balanço Energético

- Produção Energética de Biogás: 53.717.425 kcal/dia;
- Demanda de Energia para Digestão Convencional: 10.023.726 kcal/dia
- Demanda Energética para Secagem Térmica: 54.715.085 kcal/dia

Ou seja, com a adoção da Digestão Convencional as Demandas Energéticas da Digestão e da Secagem Térmica superam a Produção Energética de Biogás dos Digestores.

Como rotas possíveis de serem adotadas:

- Utilização de uma fonte externa de combustível, como por exemplo Gás Natural, de forma a suplementar a demanda da Digestão Convencional e da Secagem Térmica.
- Utilização de Biogás para Co-Geração, sendo o calor utilizado para atender a demanda da Digestão Convencional e a energia elétrica pode ser utilizada para abater os custos operacionais ou colocada à venda. Já em relação ao lodo, pode-se optar por fazer a secagem térmica com a introdução de uma fonte externa de combustível.

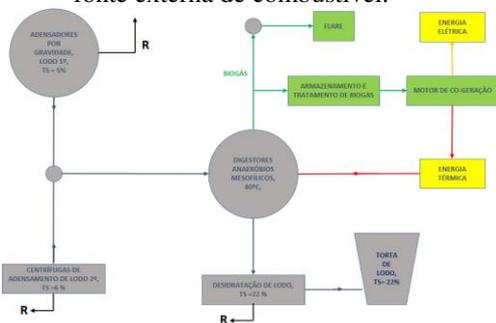


Figura 9: Fluxograma de Digestão Convencional

No caso da utilização da Co-Geração tem-se:

- Produção de Biogás Total = 53.717.425 kcal/dia;
- Demanda de Energia para Digestão Convencional: 10.023.726 kcal/dia
- Demanda Energética para Secagem Térmica: 54.715.085 kcal/dia

Admitindo que toda Produção de Biogás seja direcionada para a Co-Geração:

- Produção de Biogás Total = 53.717.425 kcal/dia;
- Produção de Energia Elétrica: $35\% * 53.717.425 \text{ kcal/dia} = 18.801.099 \text{ kcal/dia} = 21.866 \text{ kWh/dia}$;
- Produção de Energia Térmica: $40\% * 53.717.425 \text{ kcal/dia} = 21.486.970 \text{ kcal/dia}$;

Demanda de Energia Térmica:

- Produção de Energia Térmica: = 21.486.970 kcal/dia;
- Demanda de Energia Térmica (Digestão Convencional + Secagem): $10.023.726 + 54.715.085 = 64.738.811 \text{ kcal/dia}$;
- Demanda de Energia Externa: $64.738.811 - 21.486.970 = 43.251.841 \text{ kcal/dia}$;

Admitindo:

- Poder Calorífico do Gás Natural: 9400 kcal/Nm³;
- Demanda Volumétrica de Gás Natural/Suprimento externo: $43.251.841/9400 = 4.601\text{Nm}^3/\text{dia}$;

Na Secagem Térmica há uma demanda de energia elétrica a mais na concepção original, que deve ser quantificada.

Secagem Térmica

- Consumo específico de energia elétrica para secagem térmica de 80kWh/ton de água removida;
- Quantidade de água removida por ano = 21.111 ton água removida/ano
- Consumo Anual de Energia Elétrica na Secagem Térmica = $21.111 * 80 \text{ kWh} = 1.688.880 \text{ kWh/ano}$

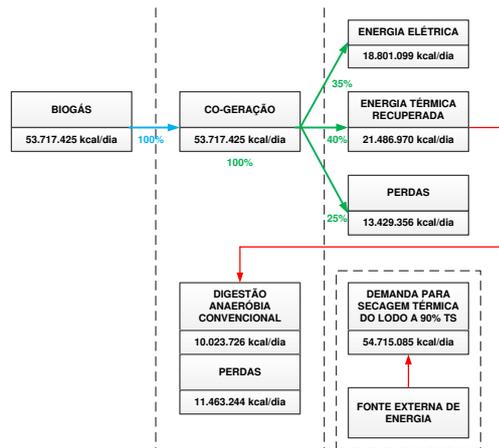


Figura 10: Balanço Energético com Fluxo de Lodo de 10.000 ton/ano e Configuração de Digestão Convencional e Co-Geração (Secagem Térmica opcional)

Fluxo de Massa Seca na Digestão Avançada com Hidrólise Térmica Dedicada ao Descarte de Excesso de Lodo Ativado

- Lodo de Entrada: 10.000 ton/ano;
 - Lodo de Entrada em SF: $20\% * 10.000 = 2.000 \text{ ton/ano}$;
 - Lodo de Entrada em SV: $80\% * 10.000 = 8.000 \text{ ton/ano}$;
- Lodo Adensado: $98\% * 10.000 = 9.800 \text{ ton/ano}$;
 - Lodo Adensado em SF: $98\% * 2.000 = 1.960 \text{ ton/ano}$;
 - Lodo Adensado em SV: $98\% * 8.000 = 7.840 \text{ ton/ano}$;
- Lodo Digerido: 54% de destruição de SV
 - Lodo Digerido em SF: 1.960 ton/ano;
 - Lodo Digerido em SV: $46\% * 7.840 = 3.606 \text{ ton/ano}$;
 - Lodo Digerido em ST: = 5.566 ton/ano;
- Lodo Desidratado: 98% de captura = $98\% * 5.566 = 5.455 \text{ ton/ano}$;
 - Lodo Desidratado em SF: $98\% * 1.960 = 1.921 \text{ ton/ano}$;
 - Lodo Desidratado em SV: $98\% * 3.606 = 3.534 \text{ ton/ano}$;
 - Lodo Desidratado em ST: 5.455 ton/ano;
- Lodo Desidratado em torta:
 - Teor de Sólidos da Torta: 28%;
 - Lodo Desidratado em ST: 5.455 ton/ano; (14,9 ton/dia)
 - Lodo Desidratado em Torta: 19.482 ton/ano; (53,4 ton/dia);
- Lodo Seco Termicamente:
 - Teor de Sólidos do Lodo Seco: 90%;
 - Lodo Desidratado em ST: 5.455 ton/ano;
 - Lodo Seco Termicamente: 6.061 ton/ano; (16,6 ton/dia)
 - Quantidade de Água Removida (de 28% a 90%): $19.482 - 6.061 = 13.421 \text{ ton água removida/ano} = 36,8 \text{ ton água/removida dia}$;

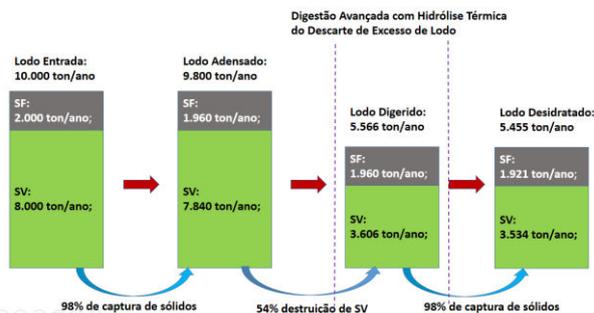


Figura 11: Fluxo de Massa Seca na Digestão Avançada com Hidrólise Térmica do Descarte de Excesso de Lodo Ativado

Produção de Lodo em Massa Úmida

- Lodo Desidratado em Torta a 22%: 19.482 ton/ano; 53,4 ton/dia;
- Lodo Seco Termicamente a 90%: 6.061 ton/ano; 16,6 ton/dia;

Lodo de Entrada:
10.000 ton/ano

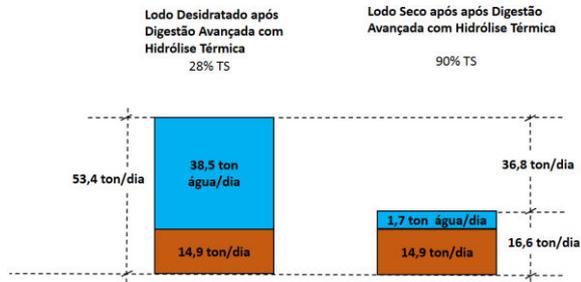


Figura 12: Produção Diária de Lodo em Massa Úmida para Digestão Avançada com Hidrólise Térmica

Produção Total de Biogás

Destruição de Sólidos Voláteis = $(54\%) \times 7.840 \text{ ton/ano} = 4233,6 \text{ ton/ano} = 11,5989 \text{ ton/dia}$;

Produção de Biogás = $11,599 \text{ Nm}^3/\text{dia}$;

Produção Energética de Biogás = $8550 \text{ kcal} \times 0,65 \times 11,599 = 64.461.442 \text{ kcal/dia}$

Demanda Energética para Hidrólise Térmica dedicada ao Descarte de Lodo Ativado

- Lodo Adensado: 9.800 ton/ano;
 - Lodo Adensado em SF: 1.960 ton/ano;
 - Lodo Adensado em SV: 7.840 ton/ano;
 - Lodo Primário Adensado: 60% do Lodo Adensado;
 - Lodo Secundário Adensado: 40% do Lodo Adensado => **3.920 ton/ano**;
- Demanda de Energia para Hidrólise Térmica:
 - Demanda Específica de Energia para Hidrólise Térmica: 633.362 kcal/ton;
 - Demanda de Energia para Hidrólise Térmica: $3.920 \text{ ton/ano} \times 633.362 \text{ kcal/ton} = 2.482.779.040 \text{ kcal/ano} = 6.802.134 \text{ kcal/dia}$

Demanda Energética para Secagem Térmica Integral de Lodo

- Lodo Desidratado: 5.455 ton/ano (base seca); (14,9452 ton/dia)
 - Teor de Sólidos da Torta: 28%;
 - Lodo Desidratado: $19.482 \text{ ton/ano} = (53,3753 \text{ ton/dia})$
- Lodo Seco Termicamente: 5.455 ton/ano (base seca);
 - Teor de Sólidos da Lodo Seco: 90%;
 - Lodo Seco Termicamente: $6.061 \text{ ton/ano} = 16,6055 \text{ ton/dia}$
- Quantidade de Água Removida:
 - Qtde: $19,482 - 6,061 = 13,421 \text{ ton/ano}$
- Demanda Energética para Secagem Térmica:
 - Demanda Específica na Secagem Térmica: 946 kcal/kg de água removida;
 - Qtde: $19,482 - 6,061 = 13,421 \text{ ton/ano}$;

- Demanda Energética para Secagem Térmica: $946.000 * 13.421 / 365 = 34.784.290$ kcal/dia

Checgem de temperatura de entrada do Lodo Combinado no Digestor Anaeróbio após Hidrólise Térmica do Descarte de Lodo Ativado

- Lodo Adensado: 9.800 ton/ano;
 - Lodo Primário Adensado: 60% do Lodo Adensado => 5.880 ton/ano
 - Lodo Secundário Adensado: 40% do Lodo Adensado => 3.920 ton/ano;
- Temperatura do Lodo Combinado:
 - Temperatura do Lodo Primário Adensado: 20°C;
 - Temperatura do Lodo de Descarte Hidrolisado: 90°C;
 - Temperatura do Lodo Combinado: $(20 * 5880 + 90 * 3920) / (5880 + 3920) = 48^\circ\text{C} > 40^\circ\text{C}$, **OK!**

Ou seja, é necessário um sistema de resfriamento de lodo de modo a abaixar a temperatura de 48°C para 40°C. A demanda para Digestão do Lodo já seria suprida pela Hidrólise Térmica do Descarte de Lodo Ativado.

Checgem Intermediária de Balanço Energético para Digestão Avançada com Hidrólise Térmica

- Produção Energética de Biogás: 64.461.442 kcal/dia;
- Demanda de Energia para Hidrólise Térmica: 6.802.134 kcal/dia
- Demanda Energética para Secagem Térmica: 34.784.290 kcal/dia

Ou seja, com a adoção da Hidrólise Térmica para o Descarte de Lodo Ativado há um Balanço Energético Favorável onde é possível fazer a Secagem Térmica Integral do Lodo sem a necessidade de combustível externo.

Co-Geração

De forma a aproveitar a Energia Excedente na Geração de Recursos, pode-se adotar a rota da Co-Geração de forma a produzir Energia Elétrica e Calor.

Um critério adotado no estudo é direcionar parte do Biogás diretamente para o Sistema de Hidrólise Térmica, deixando-o independente do sistema de co-geração.

- Produção Energética Total de Biogás: 64.461.442 kcal/dia;
- Demanda de Energia para Hidrólise Térmica: 6.802.134 kcal/dia;
- Produção Energética Disponível: 57.659.308 kcal/dia;

Primeira Tentativa

Direcionando esta produção energética disponível para Co-Geração, descontando a demanda da Hidrólise Térmica “WAS Only” temos:

- Produção Energética Disponível: 57.659.308 kcal/dia;
- Produção de Energia Elétrica: $35\% * 57.659.308$ kcal/dia = 20.180.758 kcal/dia;
- Produção de Energia Térmica: $40\% * 57.659.308$ kcal/dia = 23.063.723 kcal/dia;

A Demanda de Energia Térmica para Secagem Térmica é maior que a Energia Térmica disponível do Sistema de Co-Geração:

- $34.784.290$ kcal/dia >> $23.063.723$ kcal/dia;

Segunda Tentativa

Podemos adotar o artifício de em primeiro lugar direcionar parte do biogás para a Hidrólise Térmica “WAS Only”, direcionar parte do biogás direto para Secagem Térmica e parte do Biogás para a Co-Geração, para produção de Energia Elétrica e Calor, que é somada a Energia Térmica do direcionamento direto.

Adotando-se o Fluxograma da Figura 13, podemos estabelecer:

$$\text{Produção de Biogás Total} = B_1 + B_2 + B_3$$

$$B_1 = \text{Demanda Energética para a Hidrólise Térmica}$$

$$B_2 = \text{Fluxo de Biogás para Co-Geração};$$

$$B_3 = \text{Fluxo direto para Secagem Térmica};$$

$$B_3 + \text{Energia Térmica da Co-Geração} = \text{Demanda Energética para Secagem Térmica}$$

$$\text{Energia Térmica da Co-Geração} = 40\% * B_2$$

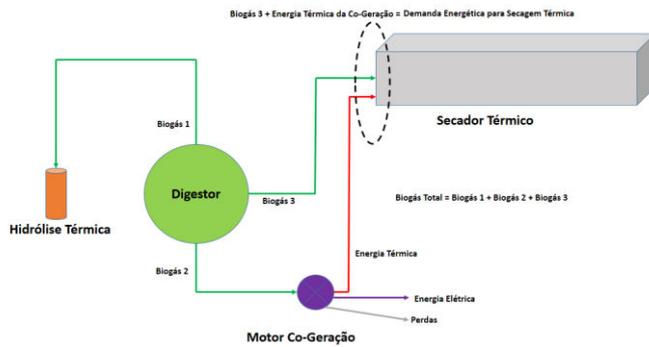


Figura 13: Fluxograma de Biogás para Hidrólise, Secador Térmico e Motor de Co-Geração
Assim temos:

$$\begin{aligned} \text{Produção de Biogás Total} &= B_1 + B_2 + B_3 = 64.461.442 \text{ kcal/dia} \\ B_1 &= \text{Demanda Energética para a Hidrólise Térmica} = 6.802.134 \text{ kcal/dia} \\ B_2 &= \text{Fluxo de Biogás para Co-Geração;} \\ B_3 &= \text{Fluxo direto para Secagem Térmica;} \\ B_3 + \text{Energia Térmica da Co-Geração} &= \text{Demanda Energética para Secagem Térmica} = \\ &= 34.784.290 \text{ kcal/dia} \\ \text{Energia Térmica da Co-Geração} &= 40\% * B_2 \\ \\ 6.802.134 + B_2 + B_3 &= 64.461.442 \text{ kcal/dia} \\ B_2 + B_3 &= 57.659.308 \text{ kcal/dia} \\ \\ B_3 + 40\% * B_2 &= 34.784.290 \text{ kcal/dia} \\ \\ 60\% * B_2 &= 22.875.018 \\ B_2 &= 38.125.030 \text{ kcal/dia} \\ B_3 &= 19.534.278 \text{ kcal/dia} \end{aligned}$$

Cabe ressaltar que este cálculo é meramente ilustrativo de forma a dar ideia da ordem de grandeza e da rotina de cálculo adotada. O correto seria checar um motor de co-geração e suas devidas características, como capacidade de forma a permitir a modularização, a eficiência energética e a eficiência térmica. Ou seja, podemos afirmar que toda a produção de biogás disponível não pode ser direcionada para a co-geração. É mais recomendável direcionar uma parte do fluxo de biogás diretamente para o secador térmico, que irá se somar a energia térmica do motor de co-geração.

Balanco Energético com Co-Geração:

- Produção de Biogás Total = 64.461.442 kcal/dia
- Energia Direta para Secagem Térmica: 19.534.278 kcal/dia;
- Energia para Co-Geração: 38.125.030 kcal/dia;
- Produção de Energia Elétrica: 13.343.760,5 kcal/dia = 15.519 kWh/dia;
- Produção de Energia Térmica: 15.250.012 kcal/dia;
- Energia Combinada para Secagem Térmica: 19.534.278 + 15.250.012 = 34.784.290 kcal/dia = Demanda Energética para Secagem Térmica: 34.784.290 kcal/dia; => **OK!**

A figura 14 representa o Fluxograma de Digestão Avançada com Hidrólise Térmica

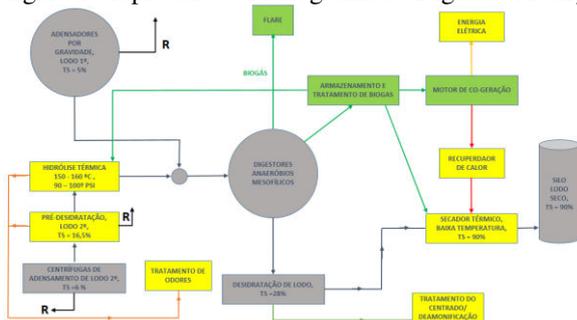


Figura 14: Fluxograma de Digestão Avançada com Hidrólise Térmica do Descarte de Lodo Ativo

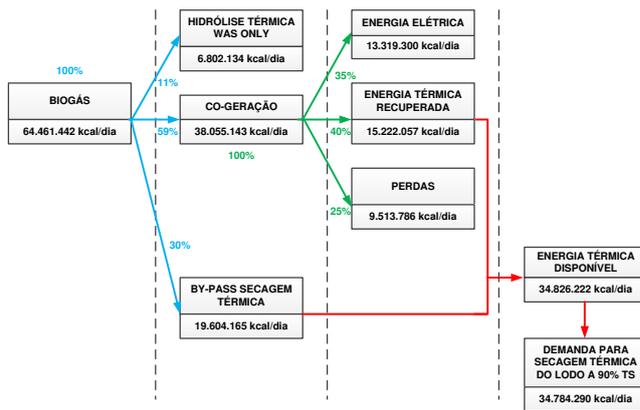


Figura 15: Balanço Energético com Fluxo de Lodo de 10.000 ton/ano e Configuração de Digestão Avançada com Hidrólise Térmica do Descarte de Lodo Ativado

Uma característica dos empreendimentos de ETEs no Brasil é que os horizontes de atendimento são sempre crescentes de modo a acompanhar o crescimento populacional. Nos países desenvolvidos, muitas vezes os projetos de otimização são construídos em locais com linhas base já bem delineadas e com demandas de atendimento futuro não tão crescentes como nos países em desenvolvimento. Desta forma a implantação de projetos de ETEs, complexos como os que envolvem a co-geração, devem ser planejados de forma que a implantação seja feita em fases.

Uma recomendação derivada desta concepção com a introdução da Co-Geração é de que a Hidrólise Térmica deve ter uma fonte de energia independente da Co-Geração, pois caso haja a interrupção do seu funcionamento, toda a engrenagem da fase sólida fica comprometida. Assim prioriza-se que o processo de Digestão Avançada esteja numa hierarquia superior de prioridade. A Secagem Térmica também estaria num patamar superior, na medida que sua operação pode ser feita diretamente tanto com o biogás devidamente tratado como combinado com o calor da Co-Geração.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Produção de Lodo em Massa Seca

Em termos de geração de massa seca, a adoção da Hidrólise Térmica leva a uma produção 11% menor que a Digestão Convencional, pois a redução de sólidos voláteis passa a ser de 54% no lugar de 45%.

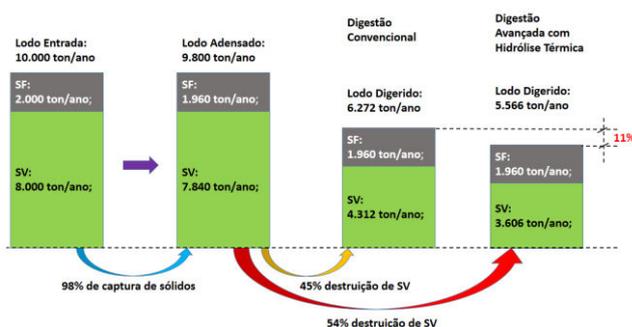


Figura 16: Comparativo entre Processos de Produção Anual de Lodo em massa seca

Produção de Torta de Lodo

Em termos de geração de torta de lodo, a adoção da Hidrólise Térmica leva a uma produção 30% menor que a Digestão Convencional, devido à combinação de dois efeitos a saber:

- menor geração de lodo em massa seca devido a maior destruição de voláteis (conforme item anterior);
- maior grau de desidratação do lodo com hidrólise térmica, cujo valor é de 28% em detrimento do lodo com digestão convencional, com 22% de teor de sólidos.

Ou seja, a adoção da Hidrólise Térmica traz um impacto considerável na produção de torta devido a melhor desidratação. Em nossa modelagem, a geração de torta resultou numa quantidade 30% menor para Digestão Avançada com Hidrólise Térmica dedicada ao Descarte de Lodo Ativado em relação a Digestão Convencional.

NEYENS et al (2004) apud BARBER (2016) cita que a digestão avançada com hidrólise melhora a desidratação de lodo através de duas maneiras: a) degradação de proteínas e polissacarídeos provindas das substâncias poliméricas extracelulares, portanto reduzindo a capacidade de retenção de água e b) promoção da floculação que reduz a quantidade de amontoados de flocos finos.

BARBER (2018) cita que apesar de muita ênfase ser dada ao aumento da biodegradabilidade do lodo, a hidrólise térmica foi originalmente concebida para melhorar a desidratação do lodo. Atualmente somente num lugar do mundo foi instalado, de forma intencional, a hidrólise térmica após a digestão, com o objetivo de melhorar a desidratação do lodo, que é em Amperverband, Alemanha, próximo a Munique.

Esta aplicação é denominada de “*Solids Stream*” pela Cambi, sendo que o centrado retorna para o digestor de modo aumentar a produção de biogás e destruir mais sólidos voláteis. Em Amperverband, a destruição de Sólidos Voláteis é de 70 – 75% e o lodo atinge 40% de teor de sólidos na centrifuga.

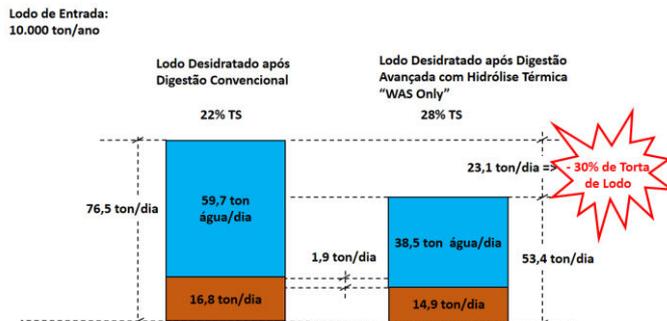


Figura 17: Comparativo de Produção Diária de Torta de Lodo entre Digestão Convencional e Digestão Avançada com Hidrólise Térmica “WAS Only”

Quantidade de Água Removida na Secagem Térmica

Na comparação dos efeitos da Digestão Convencional versus a Digestão Avançada com Hidrólise Térmica, notamos um dos impactos mais relevantes da adoção desta inovação, decorrente da somatória de sucessivos ganhos de desempenho operacional.

A adoção da Hidrólise Térmica leva a uma redução de 36% da quantidade de água a ser removida do lodo desidratado para o lodo seco termicamente, devido à redução da geração de lodo em massa seca e devido a ganho excepcional na desidratação de lodo.

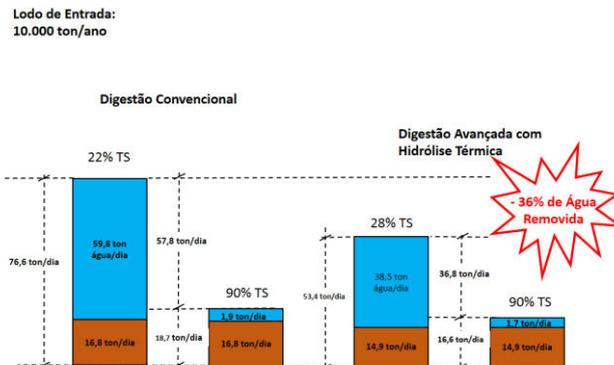


Figura 18: Comparativo de Remoção de Água Anual em Processo de Secagem Térmica entre Digestão Convencional e Digestão Avançada com Hidrólise Térmica “WAS Only”

Produção de Biogás

Em termos de geração de biogás, a adoção da Hidrólise Térmica leva a uma produção 20% maior que a Digestão Convencional, também devido pois a redução de sólidos voláteis passa a ser de 54% no lugar de 45%.

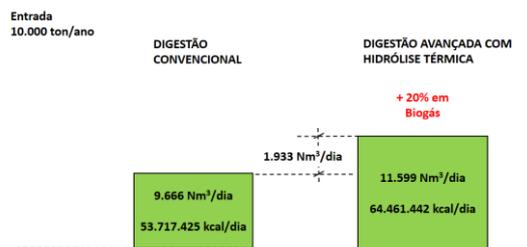


Figura 19: Comparativo entre Processos de Produção Diária de Biogás

Balanco de Energia Térmica

Processo	Produção de Energia de Biogás (kcal/dia)	Demanda de Energia para Processo (kcal/dia)	Demanda de Energia para Secagem Térmica (kcal/dia)	Produção - Demanda (kcal/dia)
Digestão Convencional	53.717.425	10.023.726	54.715.085	- 11.021.386
Digestão Avançada com Hidrólise Térmica - WAS only	64.461.442	6.802.134	34.784.290	22.875.018
Diferença (%)	20%	-32%	-36%	308%

Tabela 4: Comparativo de Balanço de Energia Térmica entre Digestão Convencional e Digestão Avançada com Hidrólise Térmica – WAS only para um Fluxo de Lodo de Entrada de 10.000 ton/ano (60% primário e 40% secundário).

Através da modelagem com os dados da literatura foi possível fazer um balanço de energia térmica onde é possível constatar as vantagens da Digestão Avançada com Hidrólise Térmica dedicada ao Descarte de Lodo Ativado.

Conforme já constatado por MILLS (2015), apesar da Hidrólise Térmica trabalhar em alta temperatura e pressão, a demanda energética constatada foi 32% menor que a Digestão Convencional, pois a Hidrólise Térmica ficou dedicada ao descarte de lodo ativado, onde é mais nítido o seu impacto, bem como numa massa mais concentrada de sólidos.

A posterior combinação de lodo hidrolisado termicamente com o lodo primário e lodo secundário resulta numa temperatura de 48°C, ou seja, acima da temperatura ótima mesofílica, situada na faixa de 35° - 40°C.

Esta é uma característica a ser destacada na utilização da Hidrólise Térmica que é um processo intensivo na utilização de calor. Na configuração “WAS Only” a temperatura combinada resultante encontra-se numa faixa bem próxima da mesofílica, sendo recomendável a instalação de um trocador de calor para resfriamento do lodo. Já na configuração “Full Cambi”, a temperatura do lodo de saída é em torno de 90°C, sendo necessário além da redução de temperatura a necessidade de uma diluição do lodo. Como no “Full Cambi” há uma demanda de produção de lodo isento de patógenos devido ao uso agrícola, a água de diluição deve também estar isenta de patógenos, cuja fonte pode ser água potável ou água de reuso devidamente isenta de patógenos. Quer seja no “Full Cambi” como no “Was Only”, a temperatura mais alta do lodo leva a não necessidade da instalação de trocadores externos de temperatura nos digestores anaeróbios. Enquanto que na Digestão Convencional há a necessidade de se preservar ao máximo a quantidade de calor dentro do processo, na Digestão Avançada ocorre justamente o contrário, pois o lodo de entrada tem energia térmica a mais para o processo de digestão anaeróbia. Conforme STEAD, T (2018), na ETE de Davyhulme com “Full Cambi” o controle dos digestores anaeróbios é realizado através do controle e monitoramento da temperatura do lodo na entrada e saída dos digestores. No caso de Davyhulme com “Full Cambi” o ponto crítico neste caso é o resfriamento do lodo que deve sair da faixa de 90°C para 40°C.



Figura 20: Trocadores de Calor para resfriamento do lodo processado em Full Cambi na ETE de Davyhumle operada pela United Utilities

Fonte: Autor (2018)

Conforme já discutido previamente pelo autor em MIKI (2017), no Brasil não há a tradição de se utilizar digestores anaeróbio mesofílicos aquecidos na faixa adequada. Caso a Digestão Avançada com Hidrólise Térmica comece a ser inserida nas plantas existentes do Brasil, pode-se pular esta etapa tecnológica de se inserir inicialmente sistemas de trocadores externos de calor nos digestores anaeróbios, aumentando em muito a produção de biogás e a diminuição da produção de lodo.

Demanda de polímero

Na Hidrólise Térmica deve ser destacado que o processo impacta na demanda de polímero de maneira negativa em relação ao processo de Digestão Convencional.

O primeiro impacto refere-se a própria etapa de preparação da Hidrólise Térmica através da Pré-Desidratação do lodo a 16,5%. Isto significa tanto o investimento de uma nova fase sólida de pré-desidratação com centrífugas e sistema de preparo de solução de aplicação de polímero, bem como todo o custo operacional de produtos químicos, operação e manutenção.

Na ETE de Long Reach operada pela Thames Water, próximo a Londres, foi adotada a concepção de Cambi “WAS only”. Nesta região não há uma necessidade de geração de um lodo Classe A, bem como não há recebimento significativo de lodo de outras ETEs. Conforme PANTER (2018), de modo a otimizar a dosagem de polímero na pré-desidratação do lodo biológico, adotou-se como estratégia operacional a mistura de uma fração de lodo primário de forma a atingir teores de sólido na faixa de 17 – 18% e uma menor dosagem de polímero, na faixa de 4 – 5 kg/ton.

Para avaliar o impacto referente ao consumo de polímero iremos assumir:

- Dosagem de polímero para pré-desidratação de lodo secundário: 7 kg/ton;
- Dosagem de polímero para desidratação após Digestão Convencional: 8 kg/ton;
- Dosagem de polímero para desidratação após Digestão Avançada com Hidrólise Térmica: 9 kg/ton;

Como a etapa de adensamento mecânico é comum em ambas alternativas, não será feito o cálculo de consumo.

Consumo de Polímero na Digestão Avançada com Hidrólise Térmica “WAS Only”:

- Lodo Digerido => 6.272 ton/ano;
 - Dosagem de polímero para desidratação após Digestão Convencional: 8 kg/ton;
 - Demanda Anual de Polímero: $6.272 \times 8 = \mathbf{50.176 \text{ kg/ano}}$;

Consumo de Polímero na Digestão Avançada com Hidrólise Térmica “WAS Only”:

- Lodo Secundário Adensado: 40% do Lodo Adensado => 3.920 ton/ano;
 - Dosagem de polímero para pré-desidratação de lodo secundário: 7 kg/ton;
 - Demanda Anual de Polímero: $3920 \times 7 = 27.440 \text{ kg/ano}$;
- Lodo Digerido => 5.566 ton/ano;
 - Dosagem de polímero para desidratação após Digestão Avançada com Hidrólise Térmica: 9 kg/ton;
 - Demanda Anual de Polímero: $5.566 \times 9 = 50.084 \text{ kg/ano}$;
- Consumo total de Polímero => $27.440 + 50.084 = \mathbf{77.524 \text{ kg/ano}}$;

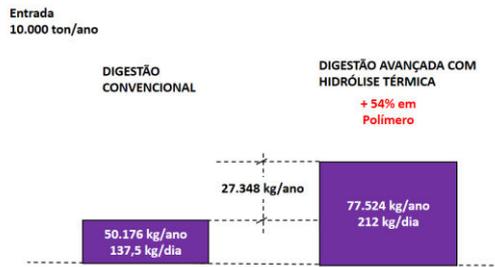


Figura 21: Comparativo de Demanda anual de Polímero entre Digestão Convencional e Digestão Avançada com Hidrólise Térmica – “WAS Only” para um Fluxo de Lodo de Entrada de 10.000 ton/ano (60% primário e 40% secundário).

Ou seja, pode-se afirmar que os balanços energético e de massa favoráveis para Digestão Avançada com Hidrólise Térmica – “WAS Only” demandam etapas de pré-desidratação e desidratação com consumo significativo de polímero.

Balanco de Energia Elétrica com Digestão Avançada com Hidrólise Térmica – “WAS only”

Outro balanço relevante a ser destacado refere-se a questão de energia elétrica que é um dos maiores insumos numa Estação de Tratamento de Esgotos.

A tecnologia de Secador Térmico de Esteira é reconhecida por ter capacidade de trabalhar com o chamado calor de baixo grau produzido num motor de co-geração, conforme ROEDIGER et al (2009). Em compensação há a demanda de trabalhar com grandes fluxos de ar, o que leva a um maior consumo de energia elétrica para promover esta circulação do ar, com uma demanda típica de 80kWh/ton de água removida conforme descrito por MILLS (2015).

Para a Hidrólise Térmica, MILLS et al (2014), cita o consumo específico de energia elétrica: 50 kWh/ton seca e consumo específico de desidratação em 50 kWh/ton seca.

Pré-Desidratação

- Lodo Secundário Adensado: 40% do Lodo Adensado => **3.920 ton/ano;**
- Consumo específico de desidratação em 50 kWh/ton;
- Consumo Anual de Energia Elétrica na Pré-Desidratação: $3.920 \times 50 = 196.000$ kWh/ano;

Hidrólise Térmica do Descarte de Lodo Ativado

- Lodo Secundário Adensado: 40% do Lodo Adensado => **3.920 ton/ano;**
- Consumo específico de energia elétrica na Hidrólise Térmica: 50 kWh/ton seca;
- Consumo Anual de Energia Elétrica na Hidrólise Térmica “WAS Only”: $3.920 \times 50 = 196.000$ kWh/ano;

Secagem Térmica

- Consumo específico de energia elétrica para secagem térmica de 80kWh/ton de água removida;
- Quantidade de água removida por ano = 13.421 ton/ano
- Consumo Anual de Energia Elétrica na Secagem Térmica = 13.421×80 kWh = 1.073.680 kWh/ano

Demanda decorrente do Retorno de Amônia no Centrado/Filtrado para o Tanque de Aeração: este é um impacto que deve ser melhor avaliado através de modelos matemáticos de modo a quantificar o aumento do gasto energético no tanque de aeração. Neste modelo não foi feita esta quantificação.

As outras etapas de processo de lodo, como adensamento mecânico e desidratação final são comuns na Digestão Convencional e na Digestão Avançada e, portanto, não serão contabilizadas.

Demanda Adicional de Energia Elétrica:

- $196.000 + 196.000 + 1.073.680 = 1.465.680$ kWh/ano

Produção de Energia Elétrica na Co-Geração

- Produção de Energia Elétrica: 13.319.300 kcal/dia; 15.490 kWh/dia = 5.653.976 kWh/ano

Saldo Positivo em: $5.653.976 - 1.465.680 = 4.188.296$ kWh/ano

Ou seja, a Secagem de lodo tem uma alta demanda de energia térmica e elétrica. Em estimativas preliminares, o investimento da secagem térmica é um dos mais altos nesta configuração de alternativa. O alto custo operacional em parte explica a desativação de instalações de secagem térmica no Reino Unido após a introdução da hidrólise térmica. A obtenção de um lodo higienizado na torta desidratada possibilitou o uso benéfico no solo de forma mais imediata.

Já no caso de regiões mais densamente povoadas e com dificuldades de viabilizar o uso benéfico de lodo no solo, como é o caso da Região Metropolitana de São Paulo, a adoção da Digestão Avançada com Hidrólise Térmica do Descarte de Lodo Ativado e Secagem Térmica torna-se uma alternativa atrativa em razão do Balanço Energético e de Massa favorável.

Tendências Futuras

Cada vez mais a abordagem de recuperação de recursos em ETEs tem sido destacada, sendo a extração de energia um dos direcionadores mais fortes.

Conforme PERRAULT, A. (2018) a rota tecnológica a ser seguida pela Thames Water é acoplar aos sistemas de Digestão Avançada com Hidrólise Térmica, a Desidratação com alto teor de sólidos através do Bucher Press bem como a Pirólise do lodo. Serão realizados testes piloto em lodo seco termicamente para as seguintes condições: teor de sólidos de 90-95%, relação SV/ST de 65 a 70%, poder calorífico de 20 MJ/kg e carga de entrada de 480 kg/h. A escolha da pirólise em detrimento da gaseificação pela Thames Water é relatada por MILLS (2015), que através de uma chamada pública constatou que a gaseificação é uma solução mais cara que a Pirólise. Também constatou que maior eficiência de conversão em 89% da pirólise versus 74% da gaseificação.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- A Hidrólise Térmica do Lodo é uma tecnologia em uso crescente no Mundo, devido às vantagens técnicas e econômicas, decorrentes da maior destruição de sólidos voláteis, maior taxa de aplicação de sólidos, maior desidratação do lodo. Constantes esforços de Pesquisa e Desenvolvimento são realizados de modo a aperfeiçoar o uso desta tecnologia, como a Hidrólise Térmica dedicada ao Descarte de Lodo Ativado, a Hidrólise Térmica Intermediária entre Digestores e a Hidrólise Térmica após a Digestão Anaeróbia.
- Um dos méritos da Hidrólise Térmica foi o domínio na resolução de dois problemas no processamento da fase sólida. Um problema refere-se ao controle de odores gerados no processo e que são devidamente direcionados para uma câmara de gás e encaminhados para dentro do digestor. Outro problema refere-se a questão de transferência de calor para aquecimento do lodo, que além da dificuldade técnica de processo, foi também realizada dentro do conceito de eficiência energética através da recuperação e conservação de calor. Na Hidrólise Térmica não se utiliza os tradicionais trocadores de calor para aquecimento do lodo, como ocorre na Digestão Convencional. O domínio técnico referente a trocadores de calor não é algo exclusivo do que tem ocorrido no Brasil. Conforme relatos proporcionados por STERNAD (2017), um cuidado que deve-se ter num trocador de calor para aquecimento do lodo é a não utilização de temperaturas muito elevadas no fluido de aquecimento, de modo a não ocorra um fenômeno denominado “baking” ou cozimento do lodo nas paredes do trocador de calor, prejudicando o processo. Em outros processos de Hidrólise, também há relatos de falhas de dimensionamento em trocadores de calor, como ocorreu em Colônia, Alemanha, com o licenciamento da tecnologia Pondus de Hidrólise Termo Química. Também em Great Billing, na tecnologia Monsal, houve problemas nos trocadores de calor para o último estágio de pasteurização do lodo. Já em Hidrólise Térmica, foram relatados problemas nos trocadores de calor para o resfriamento do lodo e não para a Hidrólise em si, sendo apontado como uma das causas, a ocorrência de uma corrosão de origem microbiológica. Ou seja, o correto dimensionamento dos trocadores de calor, quer seja para aquecimento como para resfriamento do lodo, é uma tarefa que deve ser bem investigada pelos engenheiros projetistas. A Hidrólise Térmica utiliza como método de aquecimento do lodo a injeção direta de vapor em contraposição aos trocadores de calor. Ao se injetar vapor, o lodo acaba sofrendo uma diluição (aproximadamente de de 16,5% para 13,5% de teor de sólidos).
- A Hidrólise Térmica é um processo com uso intenso de calor e tem como vantagem em novas instalações, ou ainda, em instalações antigas sem monitoramento e controle de temperatura (como comumente ocorre no Brasil), a não necessidade de instalação de trocadores de calor externos para aquecimento do lodo na faixa ótima mesofílica. Para a Hidrólise Térmica necessita-se resfriar o lodo

antes de entrar no digestor. Na configuração de Hidrólise Térmica dedicada ao descarte de lodo ativado, a posterior mistura com o lodo primário promove um resfriamento, chegando numa temperatura já próxima da faixa ótima mesofílica. Em suma, enquanto numa **Digestão Convencional** a meta é **“segurar calor”** no processo, na **Digestão Avançada com Hidrólise Térmica** a meta é **“dissipar calor”** no processo, próxima da faixa ótima da temperatura mesofílica.

- A Hidrólise Térmica dedicada ao Descarte de Lodo Ativado apresenta um balanço interessante de energia e de massa. À primeira vista, pode-se cair no erro de que assumir que toda Hidrólise Térmica é um processo com gasto excessivo de energia térmica, devido às condições extremas de temperatura, entre 150 a 160°C e pressão, entre 90 a 100 psi (6,2 a 6,9 bar). No entanto, para a configuração de Hidrólise Térmica dedicada ao lodo ativado, o processo fica direcionado somente a um dos fluxos de massa reduzindo assim tanto a instalação física como a demanda por calor. Além disso, deve ser lembrado que a Hidrólise Térmica trabalha com teores de sólidos elevados do lodo, justamente para diminuir a demanda térmica bem como tomar proveito da mudança de viscosidade do lodo, favorecendo assim as condições de mistura e troca de calor desta massa dentro do digestor. Por outro lado, pode-se afirmar que um dos limitantes da taxa de aplicação de sólidos no digestor é justamente a alta viscosidade do lodo no caso da digestão convencional, o que levaria a necessidade de instalação de dispositivos com alto grau de agitação para promover a mistura o lodo. Esta limitação do teor de sólidos na Digestão Convencional, leva a uma considerável demanda de energia térmica para aquecimento de água. Ou seja, numa digestão convencional “cozinha-se” água, levando a uma relevante demanda térmica de processo.
- A Hidrólise Térmica dedicada ao Descarte de Lodo Ativado é uma configuração interessante quando combinada com a Secagem Térmica. Este tipo de cenário é encontrado nos grandes centros urbanos, com dificuldades de se implantar o uso benéfico do lodo no solo, tanto devido a disponibilidade de área próxima como também devido a qualidade do lodo. Este tipo de configuração de Hidrólise Térmica já atingiu um grau de maturidade mundial, com aplicações em escala real na ETE de Long Reach, operada pela Thames Water, próximo a Londres, e na ETE de Psytalia em Atenas, Grécia. Em situações onde é mais prioritário a redução de volume de lodo sem fazer uso da Incineração, torna-se uma solução altamente atrativa. Na configuração de Digestão Avançada com Hidrólise Térmica dedicada ao Descarte de Lodo Ativado há um balanço favorável de energia produzida pelo biogás, que pode ser utilizado para o próprio processo de Hidrólise Térmica, bem como para a secagem térmica integral de todo lodo gerado. Como a prioridade na ETE é a própria operação contínua da fase sólida, recomenda-se que a utilização de uma linha independente de biogás devidamente tratado para alimentar a Hidrólise Térmica, bem como a Secagem Térmica. No caso de se optar pela Co-Geração, caso todo o fluxo de biogás, descontada a demanda para Hidrólise Térmica, seja direcionada para a Co-Geração, a Energia Térmica produzida não é suficiente para a secagem integral do lodo. No entanto, através de cálculos iterativos é possível direcionar um fluxo de biogás direto para a Secagem Térmica que é somada a Energia Térmica da Co-Geração e promover a secagem integral do lodo.
- As vantagens proporcionadas pelo balanço de massa têm um preço a ser pago e estão relacionadas a pré-desidratação do lodo e a desidratação final, que são operações demandantes de polímero para condicionamento do lodo. A pré-desidratação é uma das etapas cruciais para a boa operação da Hidrólise Térmica, já que um teor de sólidos baixo irá representar um gasto de energia térmica e um teor de sólidos muito alto pode comprometer o processo em si. No mercado há uma carência confiáveis de sensores online de processo para lodo com altas concentrações de sólidos. Isto leva a necessidade de trabalhar de forma manual através da coleta de amostra de lodo e a determinação de teor de sólidos em balança aquecida de precisão. O ajuste do teor de sólidos da pré-desidratação deve ser uma combinação na regulagem do processo da centrífuga combinada com a introdução de água de diluição. Recomenda-se assim a introdução de tanques de equalização e homogeneização de suporte no processo de hidrólise térmica. Já na fase de desidratação final do lodo após a Digestão Avançada, deve ser lembrado que o alto teor de sólidos resultante pode demandar também uma maior dosagem de polímero.
- No Reino Unido, onde há a maior densidade de sistemas de hidrólise no mundo, há dois contextos regionais diferenciados que favoreceram o uso desta tecnologia. Uma característica refere-se ao conceito de Usinas Centrais de Lodo, onde o lodo de outras ETEs é direcionado para o processamento, sendo que este lodo pode estar já previamente digerido regido ou não. Neste tipo de configuração, como a ETE de Davyhulme da United Utilities (com Hidrólise Térmica) e Great Billing da Anglian Water (com Hidrólise Biológica/Enzimática), o lodo de recebimento através de torta

acaba sofrendo uma diluição antes de entrar nos processos de hidrólise. Ou seja, nestes casos não há a etapa de pré-desidratação, que é uma operação demandante de polímero. Outra característica presente no Reino Unido e diferente do restante da Europa, é a alternativa de uso benéfico de lodo no solo. Enquanto outros países da Europa, como Holanda, Alemanha e Áustria, já baniram ou estão em processo de banir o uso benéfico de lodo, no Reino Unido ainda permanece até o momento esta possibilidade. E ao se adotar a Hidrólise para a combinação de lodo primário e secundário, obtém-se um lodo isento de patógenos, possibilitando o uso benéfico de lodo na forma de torta desidratada. E em muitas instalações do Reino Unido, já dotadas de secagem térmica, resolveu-se interromper a operação destes equipamentos devido aos custos operacionais e de manutenção envolvidos.

- No Reino Unido, em regiões densamente habitadas e com barreiras logísticas para fazer o uso agrícola, há estudos em andamento, como tem ocorrido na Thames Water, onde a solução de longo prazo passa pela Digestão Avançada com Hidrólise Térmica, Secagem Térmica e termina na Pirólise do Lodo. No meio da trajetória também foi investigada a utilização de equipamentos com alto teor de sólidos, como o Bucher Press, onde em alguns casos teve resultados altamente satisfatórios e em outros casos não. Conforme o teor de sólidos resultante na desidratação de lodo, há todo um impacto no balanço de energia e de massa.

Agradecimentos:

Joelcio Saturnino, Julien Chauzy, Harald Kleiven, Keith Panter,

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARBER, W.P.F. *Thermal Hydrolysis for sewage treatment: a critical review*. Water Research, 104, 53-
2. BARBER, W.P.F.; CHRISTY, P. *Combining thermal hydrolysis with drying and downstream thermal processes to optimize energy recovery from sewage sludge*. Residuals and Biosolids Conference, Water Environment Federation, p.1188-1211, 2018.
3. MIKI, M.K. *Vicissitudes dos digestores anaeróbios de lodo no Brasil*, DOI:10.4322/dae.2016.032, Revista DAE, Edição nº: 207, 2017
4. MILLS, N. *Unlocking the full potential of sewage sludge*. Tese de Doutorado. University of Surrey. Inglaterra, 2015.
5. PANTER, K.; BARBER, W.P.F.; CHRISTY, P.; CHAUZY, J.; FOUNTAIN, P.; SHANA, A. *WAS-Only thermal hydrolysis projects reach maturity worldwide- having your cake and heating it – for free*. WEFTEC, 2018.
6. PANTER, K. Comunicação pessoal em Visita Técnica na ETE de Long Reach da Thames Water. NOV 2018.
7. PERRAULT, A. Apresentação da Thames Water para Sabesp referente a Recuperação Avançada de Energia realizada em 16/11/2018 na ETE de Long Reach, 2018.
8. PFEFFER, K.; PORTER, J.; LISK, B.; BULLARD, M.; GUZMAN, K.; CHIAVAROLI, M. *Selecting an advanced anaerobic digestion configuration and biogas management strategy for the city of Tampa*. Residuals and Biosolids Conference, Water Environment Federation, p.688-713, 2018
9. ROEDIGER, M.; BOGNER, R.; FORSTNER, G. *Medium-Temperature belt-dryers for biosolids*. Residuals and Biosolids Conference, Water Environment Federation, p.1001-1018, 2009.
10. SHANA, A.; FOUNTAIN, P.; MILLS, N.; HUNT, P. *SAS only with series digestion – more options for energy recovery*. 18th European Biosolids & Organic Resources Conference. 2013.
11. STEAD, T. Comunicação pessoal em Visita Técnica na ETE de Davyhulme da United Utilities. NOV 2018.
12. STERNAD, W. Treinamento no Acordo Fraunhofer-Sabesp, 2017.
13. US EPA, Biosolids technology fact sheet, Heat drying, 2006.
14. WILLIAMS, T.; WHITLOCK, D.; GREEN, D.; DCUNHA, L.; BERG, BURROWES, P. *Why thermal hydrolysis with anaerobic digestion is rising to the top in North America*. 19th European Biosolids & Organic Resources Conference. 2014.
15. ZIKAKIS, D.; CHAUZY, J.; DROUBOGIANNI, I.; GEORGAKOPOULOS, A. *Thermal Hydrolysis of Waste Activated Sludge only at Psytalia WWTP in Athens: operation feedbacks*. 22nd European Biosolids & Organic Resources Conference. 2017.