FUNDAÇÃO ESCOLA DE SOCIOLOGIA E POLÍTICA DE SÃO PAULO
MASTER IN BUSINESS ADMINISTRATION

TAINÃ SOARES BOMFIM MILANELO

Uso do Lodo de Esgoto como Biomassa para Geração de Energia em Alternativa à sua Disposição em Aterro Sanitário

SÃO PAULO
2020

Tainã Soares Bomfim Milanelo

Uso do Lodo de Esgoto como Biomassa para Geração de Energia em Alternativa à sua Disposição em Aterro Sanitário

Artigo científico apresentado à Fundação Escola de Sociologia e Política de São Paulo, como exigência parcial para obtenção do título de *Master in Business Administration* em Saneamento Ambiental, sob a orientação da professora doutora Luciana Pranzetti Barreira.

São Paulo

2020

Biblioteca FESPSP – Catalogação-na-Publicação (CIP)

628.3
M637u Milanelo, Tainã Soares Bomfim.
Uso do lodo de esgoto como biomassa para geração de energia em alternativa à sua disposição em aterro sanitário / Tainã Soares Bomfim Milanelo. – 2020.
32 p. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Professora doutora Luciana Pranzetti Barreira.
Trabalho de Conclusão de Curso (MBA em Saneamento Ambiental) – Fundação Escola de Sociologia e Política de São Paulo.
Bibliografia: p. 30-32.

1. Combustível Derivado de Resíduo. 2. Reaproveitamento Energético do Lodo de Esgoto. 3. Resíduo para Energia. 4. Lodo para Energia. 5. Energia do Resíduo. I. Barreira, Luciana Pranzetti II. Título.

CDD 23. : Esgotos e águas residuais – Tecnologia 628.3

Elaborada por Éderson Ferreira Crispim CRB-8/9724

Tainã Soares Bomfim Milanelo

Uso do Lodo de Esgoto como Biomassa para Geração de Energia em Alternativa à sua Disposição em Aterro Sanitário

Artigo científico apresentado à Fundação Escola de Sociologia e Política de São Paulo, como exigência parcial para obtenção do título de *Master in Business Administration* em Saneamento Ambiental, sob a orientação da professora doutora Luciana Pranzetti Barreira.

Data de aprovação:

_____/_____/_____.

Banca examinadora:

_____

Nome do (a) professor (a), titulação,

Instituição e assinatura.

_____

Nome do (a) professor (a), titulação,

Instituição e assinatura.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, nosso Pai do céu, pelas oportunidades e livramentos na vida, pela minha saúde e da minha família.

Ao meu Pai, Paulo Milanelo, que agora também mora no céu, por me apoiar e sustentar todos os meus estudos, por me ensinar, através de toda sua simplicidade, o caminho do bem e a aproveitar e dar importância à educação e ao trabalho honesto. Por, durante toda a sua vida, mostrar bondade ao próximo, não importa quem fosse. Por me dar um nome, uma família, prover meu alimento e crescimento num lar cheio de alegria e amor. Por me enxergar e me fazer sentir como se eu fosse gigante. Por vibrar comigo a cada conquista. Por me ensinar que o que vale nesse mundo é viver intensamente cada dia como se fosse o último, pois, infelizmente, um dia será. *A você, dedico esse trabalho e tudo o que eu fizer de bom na minha vida. Meu amor por você é eterno. Saudade, pai.*

À minha mãe e irmã, Cléia e Tamiris, por me amarem, por me incentivarem a estudar, estarem comigo em todos os momentos e partilharem das minhas melhores lembranças. Vocês são partes de mim e as amo, muito.

Ao meu parceiro de vida, Kauê, por todo amor e cuidado, por crescermos, sonharmos e nos aventurarmos juntos pelo mundo. Amo-te.

Aos meus avós, Laís, Olívia e Pedro, que por meio de suas histórias de vida, lembram-me de que meus valores não estão nos títulos que eu possa ter e que não me tornam melhor do que ninguém. Por todo carinho e ternura comigo.

Aos meus professores, em especial à minha orientadora, professora Luciana, que, através de sua incrível sensibilidade, soube trazer inspiração e entusiasmo para outra alma humana, no momento em que mais precisei, além de ter toda paciência em partilhar seus conhecimentos de forma humilde, jamais esquecerei.

“Um livro, uma caneta, uma criança e um professor podem mudar o mundo.”

(MALALA YOUSAFZAI)

RESUMO

Este artigo discute o uso do lodo proveniente do tratamento de esgotos como Combustível Derivado de Resíduo (CDR) em alternativa à destinação a aterro sanitário. Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), deveriam ter aterros sanitários como destino final apenas rejeitos, ou seja, resíduos sólidos que não apresentem outra possibilidade senão a disposição final ambientalmente adequada, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, já que aterros ocasionam problemas para a saúde pública e meio ambiente, além de incorrerem altos custos para armazenamento, transporte e disposição final sobre esse tipo de destinação, desprezando o potencial do lodo como fonte alternativa de energia. Serão apresentados equipamentos e técnicas utilizados em Tóquio, no Japão, bem como sua aplicabilidade numa Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), em São Paulo, Brasil, no tocante ao tratamento e preparação do lodo para queima como biomassa na geração de energia a fim de se propor um estudo de pré-viabilidade dessa técnica em comparação com a disposição do lodo em aterro.
Palavras-chave: Combustível Derivado de Resíduo. Reaproveitamento Energético do Lodo de Esgoto. Resíduo para Energia. Lodo para Energia. Energia do Resíduo.

ABSTRACT

This article discusses about use of sludge from sewage treatment as Refuse Derived Fuel (RDF) as an alternative to disposal in landfill. According to the National Solid Waste Policy (PNRS), sanitary landfills should only be the final destiny of refuse, that is, solid waste that has no other option than the environmentally appropriate final disposal, after have been exhausted all the possibilities for treatment and recovery through technological processes available and economically viable, since landfills cause problems for public health and the environment, in addition to incurring high costs for storage, transportation and final disposal on this type of destination, neglecting the potential of sludge as an alternative source of energy. Equipment and techniques used Tokyo, Japan, will be presented, as well as their applicability on a Sewage Treatment Plant (STP), in São Paulo, Brazil, with regard to treatment and preparation of sludge for burning as biomass in the energy generation in order to propose a pre-feasibility study of this technique in comparison with the disposal of sludge in landfill.
Keywords: *Refuse Derived Fuel. Energetic Recovery of Sewerage Sludge. Waste to Energy. Sludge to Energy. Energy from Waste.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Poder calorífico inferior de fontes de biomassa em função da sua umidade 16
Figura 2 – Componentes de uma planta de pirólise para tratamento de resíduos sólidos 18
Figura 3 – Diagrama esquemático do processo de carbonização do lodo 20
Figura 4 – Conteúdo do lodo ao longo do processo de carbonização.....20
Figura 5 – Combustível feito através da carbonização do lodo 21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Custo para disposição de lodo em aterro sanitário na RMRJ por faixa de teor de sólidos 22
Tabela 2 – Caracterização do lodo da ETE Barueri 25
Tabela 3 – Comparação de custos entre processo de pirólise e disposição de lodo em aterro sanitário 26

LISTA DE ABREVIATURAS

ºC	Celsius
$	Dólar
€	Euro
h	Hora
kg	Quilograma
LA	Lodos ativados
LDAn	Lodo anaeróbio
MJ	Mega Joule
MWh	Megawatt-hora
R$	Reais
S	Secagem
t	Tonelada
¥	Iene

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEDAE	Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro
CDR	Combustível Derivado de Resíduo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EfW	*Energy from Waste*
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
ETEs	Estações de Tratamento de Esgoto
GEE	Gases de Efeito Estufa
IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change*
O&M	Operação e Manutenção
PCI	Poder Calorífico Inferior
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PROSAB	Programa de Pesquisas em Saneamento Básico
RDF	*Refuse Derived Fuel*
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
URE	Usina de Recuperação Energética
WtE	*Waste-to-energy*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
2 DESENVOLVIMENTO 14
2.1 Características do Lodo para Recuperação Energética 15
2.2 Pirólise 17
2.3 A Experiência do Japão 18
3 ESTUDO DE PRÉ-VIABILIDADE DE UMA USINA DE PIRÓLISE PARA TRATAMENTO DE LODO DE ESGOTO 21
3.1 Parâmetros de Cálculo do Estudo de Pré-viabilidade 21
3.2 Apresentação e Discussão dos Resultados 26
4 CONCLUSÃO 28
REFERÊNCIAS 30

1 INTRODUÇÃO

Uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) tem como subprodutos o efluente líquido - comumente dispersado em um corpo hídrico, e o lodo de esgoto - resíduo sólido-pastoso que consiste em um mistura de minerais, coloides e partículas, com a presença de matéria inorgânica mas rico em matéria orgânica, formando um sedimento composto resultado da decomposição de matéria orgânica em suspensão no meio aquoso, de difícil manuseio por apresentar aspecto e odor desagradáveis e com concentração de água em percentuais elevados de até 95% (RUBIM, 2013).

A disposição final de lodos em aterros sanitários deve ser realizada de maneira segura a fim de evitar problemas ambientais e à saúde pública, seja por conter agentes patogênicos ou pelo poder de atração de vetores. O gerenciamento (condicionamento, armazenamento e transporte) do lodo de esgotos é um problema para os operadores de Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs). No Brasil, os projetos de ETEs ignoram a destinação do lodo, sendo esse assunto não priorizado e tratado posteriormente de maneira emergencial, ocasionando custos financeiros elevados e impactos ambientais. Segundo o Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB), o descarte do lodo pode chegar a representar de 20% até 60% dos gastos operacionais de uma ETE, demandando, além disso, um gerenciamento complexo (ANDREOLI *et al.*, 2001, 2006; RUBIM, 2013).

Uma das alternativas à disposição do lodo de esgotos em aterros sanitários é o seu aproveitamento energético, uma forma de reciclagem que consiste em transformar a energia presente nos resíduos em vapor (calor), energia elétrica ou combustível. Considerando a hierarquia imposta pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) para a gestão dos resíduos sólidos (art. 9º), este artigo técnico propõe discutir uma alternativa à disposição de lodo de esgoto em aterros por meio da análise preliminar do uso de esgoto como combustível para geração de energia, através da pirólise.

A alternativa do uso de lodo de esgoto como biomassa para queima em caldeira para geração de energia é uma possível solução para os problemas inerentes ao seu gerenciamento, considerando, ainda, seu potencial como fonte alternativa de geração energética. Para tanto, pretende-se apresentar os processos tecnológicos envolvidos para a transformação do lodo de esgoto em combustível, as características necessárias ao seu emprego como biomassa e uma comparação de custos dessa

alternativa versus seu manejo, transporte e disposição no caso de destinação final a aterro sanitário, numa análise de pré-viabilidade.

Pela ausência de referências no Brasil sobre os custos de implantação e de operação de usinas de pirólise, é apresentado o caso da usina implantada em Tóquio, no Japão, destinada a produção de Combustível Derivado de Resíduo (CDR) a partir do lodo do sistema de tratamento de esgotos.

2 DESENVOLVIMENTO

Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2019) apontam que, no Brasil, a cobertura da coleta de esgotos na área urbana corresponde a 53,2% e, desse volume, recebe tratamento adequado 74,5%. Porém, o índice de tratamento de todos os esgotos gerados é de 46,3%. Devido ao fato de a geração de lodo ser diretamente proporcional aos índices de coleta e tratamento de esgotos, a perspectiva é de que, com a busca pela universalização da cobertura e tratamento, a quantidade de lodo gerado aumente significativamente no país (BRASIL, 2019a).

A opção das operadoras de ETEs pela destinação de lodos de esgotos em aterros, em detrimento a rotas tecnológicas como biodigestão, gaseificação, incineração ou pirólise, é justificada pelos menores custos da disposição em solo em relação a outras formas de tratamento e pela baixa disponibilidade dessas alternativas no Brasil. Além disso, para reuso do lodo no reaproveitamento industrial, na construção civil (fabricação de tijolos e cerâmicas ou como agregado leve para produção de concreto), ou mesmo para reaproveitamento agrícola (como fertilizante orgânico, na compostagem e recuperação de solos degradados), é preciso atender a uma série de requisitos contidos nas resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), o que desestimula tais iniciativas, fazendo com que o lodo seja encaminhado a aterros, desprezando todo seu potencial de recuperação energética.

O aproveitamento energético é uma das formas para lidar com o problema do volume e periculosidade de resíduos sólidos, como os lodos de esgoto, extraindo o potencial energético contido nesses resíduos por meio de técnicas de *Waste-to-Energy* (*WtE*), ou *Energy from Waste* (*EfW*), como, por exemplo, biodigestão, gaseificação, incineração, pirólise, plasma e *mass-burning* (MIRALVEZ, 2019).

No entanto, os custos para geração de energia através de técnicas como biodigestão e incineração são elevados em comparação com os valores praticados no

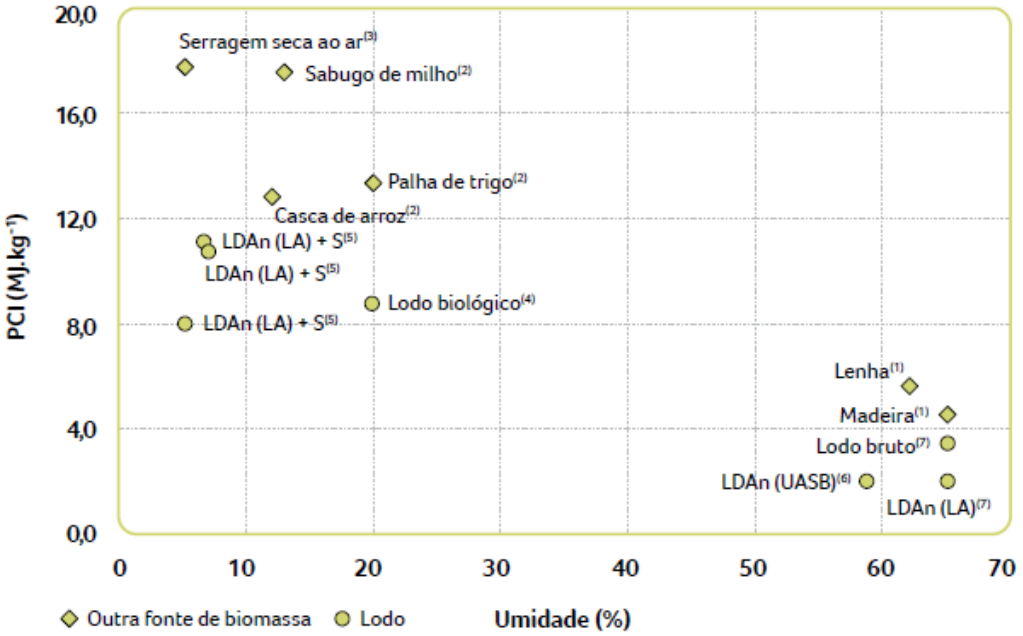
setor elétrico, o que muitas vezes baseia as justificativas da falta de investimento em tecnologias como essas. Dados da nota técnica de 2014 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) sobre Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) mostram que a biodigestão e a incineração para geração de eletricidade custariam, respectivamente, R$ 282/MWh e R$ 247/MWh, enquanto o preço médio no leilão de energia foi de R$ 165,91/MWh (CCEE, 2019). Porém, se levarmos em consideração financiamentos através do Fundo Clima para projetos que visem redução da emissão dos Gases de Efeito Estufa (GEE), com subsídios, os valores de biodigestão e incineração poderiam cair, respectivamente, para R$ 68/MWh e R$ 202/MWh, o que já os tornaria bastante atrativos (BRASIL, 2014a).

2.1 Características do Lodo para Recuperação Energética

O lodo bruto, após passar pelos processos de adensamento, desaguamento e secagem (com o intuito de reduzir ao máximo o teor de água), possui alto poder calorífico apresentando potencial de utilização nos mais variados tipos de tratamentos térmicos, como mono-incineração, co-incineração, gaseificação e pirólise. Uma característica comum a essas rotas tecnológicas de reaproveitamento energético do lodo é a necessidade de implantação de uma termelétrica a fim de se realizar a cogeração de energia. Durante o tratamento do esgoto, há produção de gás metano, que pode ser canalizado para termelétrica e empregado na geração de calor nas turbinas e também para aquecimento do lodo durante a reação anaeróbia do processo de tratamento. A recuperação energética é válida quando o resíduo apresenta Poder Calorífico Inferior (PCI) alto (LEGNER, 2014). Segundo a EPE, considera-se viável a incineração de resíduo com PCI maior do que 8,37MJ/kg, pois para valores menores há dificuldades técnicas, necessidade de adição de combustível auxiliar ou algum tipo de pré-tratamento a fim de elevar seu poder calorífico (BRASIL, 2014b).

Como forma de exemplificar, a Figura 1 compara o poder calorífico inferior de algumas fontes de biomassa em função da sua umidade. De acordo com Rosa, Chernicharo e Melo (2015), o poder calorífico do lodo úmido é comparável ao da madeira ou da lenha. Porém, quanto maiores seus teores de sólidos (menor umidade) e de matéria orgânica, maior seu poder calorífico, chegando mais próximo a valores de poder calorífico como, por exemplo, o do carvão mineral (LEGNER, 2014).

Figura 1 – Poder calorífico inferior de fontes de biomassa em função da sua umidade



Nota: LDAn: lodo anaeróbio **LA:** lodos ativados **S:** secagem

Fonte: ROSA; CHERNICHARO; MELO, (2015)

Independente da rota tecnológica ou processo de tratamento adotado é necessário que durante a combustão do lodo seco não se formem substâncias tóxicas ou corrosivas, devendo-se empregar controle da emissão de gases que varia de acordo com a composição química do lodo. Como precauções, filtros manga ou eletrostático e carvão ativado podem ser aplicados durante a queima a fim de se obedecer a todas as exigências legais existentes.

Segundo a Resolução CONAMA 316 de 2002, que dispõe sobre procedimentos e critérios para funcionamento de sistemas térmicos de resíduos, o lodo pode substituir uma demanda significativa de combustíveis fósseis, além disso, sua transformação em subproduto útil pode tornar viável o investimento em sua destinação (LEGNER, 2014).

A mais recente Portaria Interministerial nº 274, de 30 de abril de 2019, que disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, apresenta que qualquer unidade que vise recuperar energia de resíduos a fim de reduzir seu volume e periculosidade por meio de tratamento térmico (incluindo processos por oxidação térmica e outros como a pirólise) deve comprovar sua viabilidade técnica, ambiental e econômico-financeira além de implantar monitoramento contínuo de suas emissões de gases tóxicos e possuir planos de contingência e emergência.

2.2 Pirólise

Um dos processos termoquímicos para aproveitamento energético de resíduos, e que é foco deste artigo, é a pirólise. Pirólise pode ser definida como a ocorrência de degradação térmica, sob fornecimento reduzido de oxigênio ou na sua total ausência (a fim de se evitar gaseificação demasiada), em temperaturas baixas (400 a 800ºC) em comparação a gaseificação (800 a 1100 ºC) (LISBOA, 2016 apud BRIDGWATER e BRIDGE, 1991).

Sem a presença de oxigênio não ocorre combustão da matéria e sim um processo de decomposição termoquímica que produz biocombustíveis gasosos, líquidos e carvão. No Brasil o aproveitamento da energia térmica gerada pelo calor é o mais comum (BIRDING, 2020).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), durante a pirólise, há aquecimento de um combustível a fim de remover o material volátil, ocorrendo sua transformação em outro combustível de melhor qualidade e conteúdo energético. Como exemplo, tem-se a transformação de lenha em carvão (BRASIL, 2005).

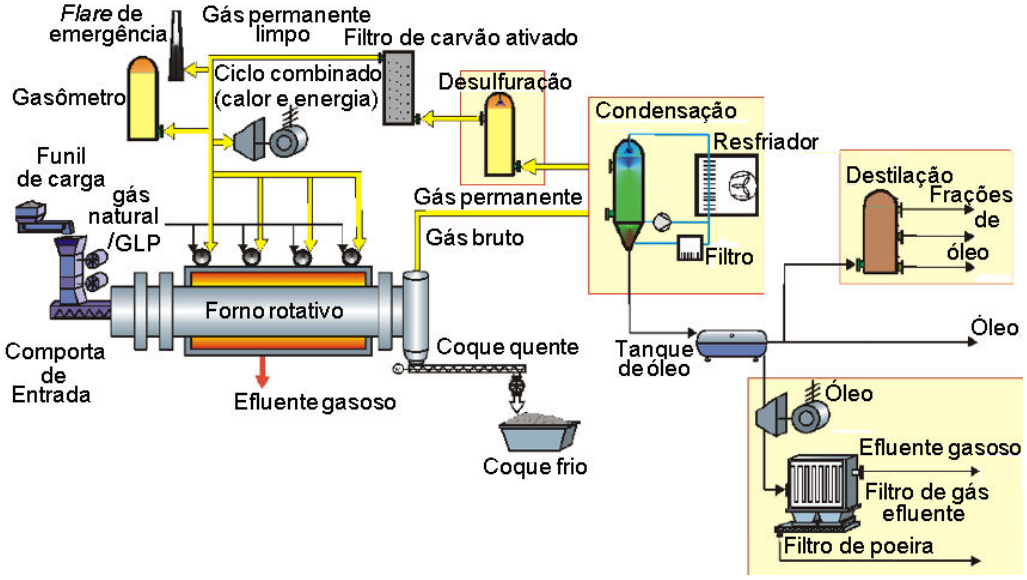
Durante o processo de pirólise são formados gás combustível, alcatrão, um ácido pirolenhoso (licor) e carvão vegetal em proporções que variam de acordo com o método e parâmetros de reação. Os parâmetros de operação, como tempo de residência dos resíduos e a temperatura a qual são submetidos, separam os processos em: Pirólise Lenta, cuja temperatura é de aproximadamente 400°C e há longo período de permanência de resíduos (entre 40 minutos e 1hora) e Pirólise Rápida, cuja temperatura varia entre 400°C e 600°C e os períodos de residência de resíduos são mais curtos (menores do que 2 segundos). Há ainda um terceiro tipo, a *Flash* Pirólise, cuja temperatura é superior a 800°C e os períodos de permanência de resíduos são bastante reduzidos (menores do que 1 segundo) (INDDRA, 2020).

Considerando ainda os produtos desejados, na pirólise rápida, a geração de produtos líquidos pode ser maximizada, e na pirólise lenta, conhecida também como carbonização, a produção de carvão sólido é maior (BRASIL, 2005; LISBOA, 2016).

Resumidamente, observando a Figura 2, onde estão ilustrados alguns componentes de uma usina de pirólise, podem-se distinguir as seguintes etapas: alimentação de resíduos por meio de um forno rotativo com entrada e saída isoladas (a fim de não permitir entrada de oxigênio); produção de gases do processo que

podem ser reutilizados em complementação com outra fonte de calor para aquecimento do forno; limpeza dos produtos gasosos; e a produção de produtos oleosos e de sólidos que também podem ser utilizados como fonte de energia.

Figura 2 – Componentes de uma planta de pirólise para tratamento de resíduos sólidos



Fonte: MUTZ *et al.* (2017) adaptado

Numa Usina de Recuperação Energética (URE) de pirólise há mais geração do que consumo de energia, uma vez que é característico do processo de decomposição química pelo calor, na ausência de oxigênio, gerar mais energia do que consumir, provendo um processo autossustentável sob a ótica energética. A área a ser ocupada por uma URE de pirólise costuma ser muito inferior a uma área para um aterro com mesmo porte de tratamento, com as vantagens de não produzir efluentes líquidos capazes de contaminar mananciais e não apresentar necessidade de área para acúmulo de resíduos, que podem ser processados à medida em que chegam (BIRDING, 2020).

2.3 A Experiência do Japão

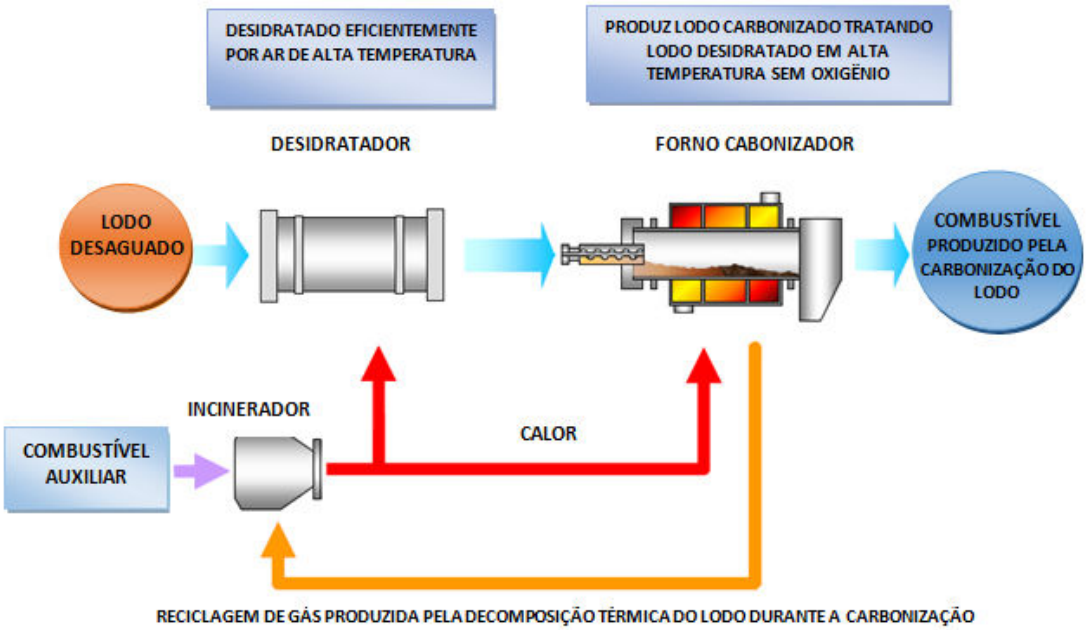
Um exemplo de uso de lodo de esgoto para geração de energia é o da Repartição de Sistemas Esgotos de Tóquio, no Japão. Antes de 2007, em Tóquio, todo o lodo desaguado, costumava ser incinerado e suas cinzas dispostas no oceano ou utilizadas como matéria-prima na indústria de cimento. Em 2005, as atividades da Repartição de Sistemas Esgotos de Tóquio eram responsáveis por 43% das emissões

de GEE atribuídas às atividades do Governo Metropolitano, sendo 36% delas devido à incineração de lodo. Unindo as necessidades de preservação ambiental e da diversificação das fontes de energia, a Repartição de Sistemas Esgotos de Tóquio lançou um projeto no qual o lodo de esgoto desaguado é transformado em carvão combustível e vendido para a planta geradora de energia termelétrica (ODA, [2007?], tradução da autora).

Por meio da carbonização, o lodo tem seu volume reduzido a 1/12, facilitando seu manuseio e eliminando seu odor ofensivo. A carbonização do lodo apresenta um potencial teórico de redução de 20% nas emissões de GEE. O processo de carbonização ocorre sem oxigênio e gera pouca quantidade de óxido nitroso (N_20). Após esse processo, o material carbonizado se torna um combustível neutro em carbono, com poder calorífico de 8,4 MJ/kg (metade se comparado ao do carvão) podendo ser utilizado como combustível de biomassa nas plantas de geração de energia termelétrica numa mistura a uma taxa de 1% de carvão, contribuindo para a redução da emissão de CO_2 (ODA, [2007?], tradução da autora).

De acordo com a Figura 3, que ilustra o esquema da tecnologia, primeiramente, o lodo desaguado passa por secagem a fim de reduzir para, aproximadamente, 25% seu teor de água. O secador de lodo com agitador de pá recupera o calor exaurido do forno de carbonização e evita geração de odores. Adicionar o processo de secagem do lodo permite que o forno de carbonização seja mais compacto e eficiente do que seria em comparação com a carbonização direta do lodo desaguado. O lodo seco abastece o forno de carbonização onde é aquecido à alta temperatura. Após um período de uma hora com o oxigênio desligado, é produzido o material carbonizado. O forno de carbonização do tipo rotativo é de simples construção e amplamente utilizado. Sua liga resistente a calor e sua vedação permitem que a carbonização aconteça em altas temperaturas e em atmosfera com pouco oxigênio, conferindo estabilidade ao material carbonizado. O gás combustível gerado pela decomposição térmica do lodo durante o processo é utilizado como fonte de calor para secagem e carbonização, o que aumenta a eficiência energética do sistema como um todo (ODA, [2007?], tradução da autora).

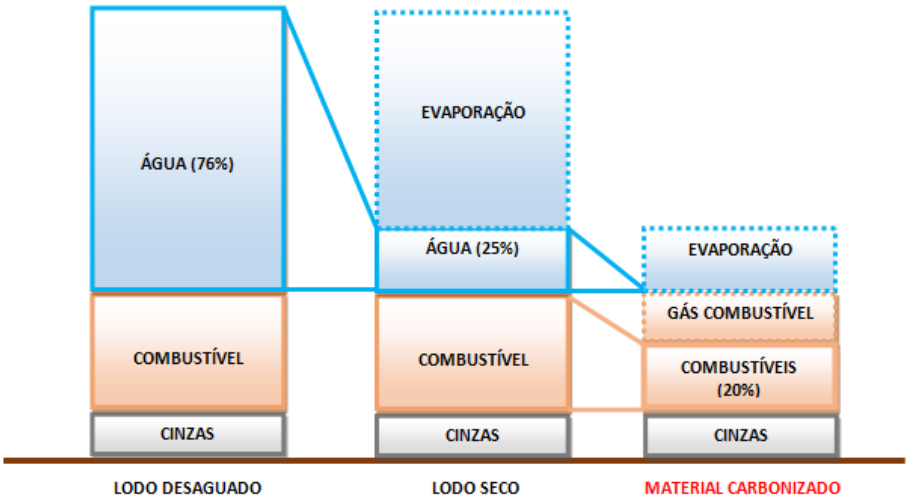
Figura 3 – Diagrama esquemático do processo de carbonização do lodo



Fonte: ODA ([2007?]), tradução da autora.

Conforme representado na Figura 4, o lodo desaguado contém aproximadamente 76% de água; já no lodo desidratado, ou seco, pela evaporação, a concentração de água é reduzida para 25%. Após o processo de carbonização, o restante de água é evaporado e a parte combustível do material é reduzida a 20%, material cujo aspecto pode visto na Figura 5, e o restante transformado em gases combustíveis (ODA, [2007?], tradução da autora).

Figura 4 – Conteúdo do lodo ao longo do processo de carbonização



Fonte: ODA ([2007?]), tradução da autora.

Figura 5 – Combustível feito através da carbonização do lodo

Fonte: ODA ([2007?])

3 ESTUDO DE PRÉ-VIABILIDADE DE UMA USINA DE PIRÓLISE PARA TRATAMENTO DE LODO DE ESGOTO

3.1 Parâmetros de Cálculo do Estudo de Pré-viabilidade

Para a análise preliminar do potencial de implantação e operação de uma usina de pirólise para tratamento de lodo de esgoto, são apresentados os seguintes parâmetros:

a) Custos com serviço de transporte do lodo de esgoto até aterro sanitário;
b) Custos com a disposição do lodo de esgoto em aterro sanitário;
c) Quantitativos de lodo de esgoto gerado para estudo de pré-viabilidade;
d) Custos indicativos com implantação e operação de usinas de pirólise;
e) Características do lodo de esgoto para geração de energia;
f) Eficiência do sistema de geração de energia elétrica.

Nesse artigo, o custo da destinação final do lodo de esgoto em aterro sanitário, será composto pelos custos com serviço de transporte até o aterro (a) somados aos custos de disposição por tonelada no aterro sanitário (b).

a) Custos com Serviço de Transporte até Aterro Sanitário

Embora este estudo tenha como resíduo o lodo de esgoto, não há informações disponíveis e divulgadas sobre os custos de transporte desse material. Portanto, como referência, foram aplicados os custos de transporte de resíduos sólidos urbanos (resíduos domésticos e públicos).

Para o levantamento desses custos, utilizou-se o indicador CO146, do SNIS, que corresponde aos valores contratuais do serviço de transporte de resíduos domésticos e públicos da unidade de transbordo (ou ponto correspondente) até o aterro, lixão, incinerador ou outra unidade de destinação final.

Por meio das séries históricas do SNIS, via sistema web, e aplicando os parâmetros de busca e de filtros, foram coletados dados desse indicador para os municípios da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), declarantes no SNIS, referentes aos anos de 2015, 2016 e 2017. Embora o último relatório SNIS tenha sido publicado em 2019 com base em 2018, esse indicador não apresentava os dados necessários para este estudo.

Após análise dos dados, calculou-se a média anual entre os valores dos serviços de transporte entre os municípios da RMSP declarantes do SNIS nos últimos três anos. Para este estudo, considerou-se o custo com serviço de transporte do lodo de esgoto até aterro sanitário [a] de R$ 77,19/tonelada.

b) Custos com Disposição em Aterro Sanitário

Em relação aos custos de disposição, é relatada a mesma ausência de informações quando se trata de lodo de esgoto, neste caso na Região Metropolitana de São Paulo. Entretanto, estão disponibilizados dados sobre os custos de disposição desse material na Região Metropolitana do Rio de Janeiro.

Segundo estudos da Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE), os custos cobrados para disposição de lodo em aterro sanitário na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) levam em consideração o teor de sólidos no lodo. Como pode se observar na Tabela 1, subdividiu-se o teor de sólidos em três faixas e à cada faixa foi atribuído um custo com disposição em aterro para o primeiro semestre de 2014 (SMIDERLE, 2016).

Tabela 1 – Custo para disposição de lodo em aterro sanitário na RMRJ por faixa de teor de sólidos

Faixa de teor de sólidos do lodo (%)	**Custo com disposição em aterro na RMRJ**
T.S. > 60	R$ 90,00 / t
30 > T.S. > 60	R$ 110,00 / t
T.S. < 30	R$ 160,00 / t

Fonte: SMIDERLE (2016) adaptado.

O valor admitido neste estudo para a disposição final do lodo de esgoto em aterro sanitário [b] será de R$ 90,00/tonelada, considerando o lodo de esgoto desaguado e seco, com teor de sólidos de 75%.

c) Quantitativos de Lodo de Esgoto Gerado

A quantidade de lodo considerada [c] neste estudo é de 500 toneladas por dia de lodo desaguado. Essa quantidade, utilizada como referência é a mesma produzida diariamente na ETE Barueri, operada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). Considerada a maior planta de tratamento de esgotos da América do Sul, com capacidade de 16m^3/s, é responsável por mais da metade de todo o volume de esgoto tratado da RMSP e cujo processo de tratamento é do tipo lodos ativados convencional (aquele que gera o maior volume de lodo a ser tratado) (SABESP, 2019).

d) Custos Indicativos com Implantação e Operação de Usinas de Pirólise

Não há informações disponíveis de custos de implantação e operação de usinas de pirólise para tratamento de lodo de esgoto no Brasil. Para que este estudo de pré-viabilidade fosse realizado, foram utilizadas referências de custos, tendo como base os seguintes dados:

- A instalação de uma unidade de pirólise com capacidade de processamento de biomassa de 47 toneladas por dia apresenta custos de U$ 3.939.454,55 (CAIBRE, 2013 *apud* RINGER *et al*., 2006) ou R$ 20.288.190,93, considerando o dólar a R$ 5,15 (cotação do dia 23 de junho de 2020);

- A planta de pirólise rápida para resíduos de pneus, com capacidade de 620 kg/h, em Cuiabá, teve custo inicial de instalação previsto de U$ 1.000.000,00 (CAIBRE, 2013) ou R$ 5.150.000,00, considerando o dólar a R$ 5,15 (cotação do dia 23 de junho de 2020);

- Os custos de instalação de uma usina de carbonização, cuja capacidade de tratamento diário é de 300 toneladas de lodo desaguado, representam ¥ 5 bilhões (ODA, [2007?], tradução da autora) ou R$ 240,00 milhões, considerando o iene a R$ 0,048 (cotação do dia 23 de junho de 2020);

- Os custos indicativos de instalação de plantas de pirólise/gaseificação em países em desenvolvimento com capacidade de processamento de resíduos entre 150 mil toneladas e 200 mil toneladas anuais, situam-se entre € 80 milhões e € 120

milhões, ou entre R$ 480,80 milhões e R$ 721,20 milhões, considerando o euro a R$ 6,01 (cotação de 25 de junho de 2020) (MUTZ *et al*., 2017).

Sistemas de pirólise possuem como característica a modularidade, permitindo a instalação em paralelo de alguns módulos de menor capacidade a fim de se alcançar a capacidade total de processamento desejada para a usina. Tal característica é importante, pois permite que se instalem fornos carbonizadores menores que podem ser ativados conforme for sendo produzido o material a passar por pirólise, não sendo necessário aguardar o preenchimento total até a capacidade máxima de um único forno rotativo maior, possibilitando trabalhar com fornos em paralelo acionados individualmente à medida que sua plena capacidade puder ser atingida, otimizando o processo como um todo. Além disso, tal característica permite que o custo de instalação de uma URE de Pirólise a ser considerado possa ser composto pela soma dos custos de instalação de cada módulo a funcionar em paralelo. Portanto, para esse estudo, primeiramente efetuaram-se os cálculos de custo médio por tonelada de cada exemplo pesquisado e a média dentre eles, obtendo-se assim o custo médio com instalação de usina de pirólise de R$ 812.780,49/tonelada. Posteriormente multiplicou-se o custo médio por tonelada pela capacidade de processamento de lodo de 500 toneladas por dia obtendo-se o valor de R$ 406.390.245,41. Esse valor está sendo aplicado neste estudo de pré-viabilidade como o custo de instalação de uma planta de pirólise com capacidade de processamento de 500 toneladas/dia de lodo [d1].

O custo adotado para Operação e Manutenção (O&M) de uma usina de pirólise levou em consideração o custo do caso de Tóquio, Japão, que, de acordo com Oda ([2007?]) foi de aproximadamente ¥ 5 mil/t por dia (ou R$ 240 por tonelada de lodo desaguado por dia - considerando o iene a R$ 0,048 em cotação do dia 23 de junho de 2020), e os custos segundo Mutz *et al*. (2017) de € 30/t a € 40/t (ou de R$ 180,30/t a R$ 240,40/t - considerando o euro a R$ 6,01 em cotação de 25 de junho de 2020). Calculando-se os valores médios obteve-se o custo com O&M médio de R$ 220,23/t, e, multiplicado pela quantidade de processamento de lodo desaguado adotada de 500 t/dia, chegou-se ao valor de R$ 110.116,67 diários a serem gastos com O&M [d2].

e) Características do Lodo de Esgoto para Geração de Energia

Da Tabela 2 pode-se extrair o poder calorífico inferior do lodo [e], no caso o lodo de esgotos da ETE Barueri, como sendo 10,66 MJ/kg com o teor de sólido secos

de 90% (10% de umidade, compatível com o produto da pirólise). Esse é o valor de poder calorífico utilizado neste estudo de pré-viabilidade.

Tabela 2 – Caracterização do lodo da ETE Barueri

PARÂMETROS	UNIDADE	MÍNIMO	MÁXIMO
Sólidos voláteis	%	43,0	62,6
Umidade	%	70,0	75,00
Poder Calorífico Superior	MJ/kg	11,4	*
Poder Calorífico Inferior	MJ/kg	10,66	*

Nota: (*) Poder calorífico com teor de sólidos secos a 90%

Fonte: SABESP (2016) adaptado.

f) Eficiência do sistema de geração de energia elétrica

Para uso do lodo como biomassa numa central termelétrica de cogeração deve-se levar em consideração a eficiência desse sistema. Na cogeração, a partir de um mesmo combustível (o qual pode ser um derivado de petróleo, gás natural, carvão ou biomassa), há geração tanto de energia elétrica quanto térmica com alta eficiência, entre 42 e 58% no caso do ciclo combinado (em média 50%). O tipo de operação ciclo combinado é aquele onde a queima de combustível fornece energia mecânica para um gerador de energia elétrica ao passo que os gases provenientes da queima do combustível (com temperatura em torno de 550ºC) são encaminhados a uma caldeira de recuperação de calor a fim de produzir vapor que vai movimentar uma turbina, por exemplo, turbina a gás, ou alimentar motores de combustão interna (FERRAZ, 2018).

Para o cálculo dos dados de potencial energético do lodo da ETE Barueri utilizaram-se os valores de 50% como o rendimento, ou eficiência (η), do sistema de cogeração termelétrica, de 10,66 MJ/kg para o Poder Calorífico Inferior (PCI) do lodo com teor de sólidos secos a 90%, e produção de 500 toneladas de lodo por dia, transformado em kWh, a fim de se calcular a capacidade de produção energia elétrica diária a partir do lodo numa central termelétrica de cogeração a ciclo combinado.

Com base no valor médio no leilão de energia de 2019 a R$165,91/MWh (CCEE, 2019), projeta-se que a receita estimada com a venda da energia elétrica gerada a partir da queima em central termelétrica de cogeração a ciclo combinado do lodo de esgoto transformado em CDR através de uma usina de pirólise [f] seja de R$ 44.829.148,29 por ano, assim o tempo de retorno sobre o investimento inicial para instalação de uma usina de pirólise é de 9,07 anos, sendo sua vida útil de 20 a 30

anos. Caso a energia gerada não seja vendida e sim consumida no local, o valor [f] seria o custo economizado com energia elétrica.

3.2 Apresentação e Discussão dos Resultados

Considerando os custos indicativos e de referência obtidos por meio das pesquisas realizadas, e que compõem este estudo de pré-viabilidade para implantação de uma usina de pirólise para transformação do lodo em combustível para cogeração termelétrica de energia, são apresentados os resultados na Tabela 3. Para efeito de discussão, esses custos são apresentados tendo em vista a comparação com a disposição do lodo em aterro.

Tabela 3 – Comparação de custos entre processo de pirólise e disposição de lodo em aterro sanitário

Custos com Transporte e Disposição do Lodo em Aterro Sanitário	
Custos transporte do lodo de esgoto até aterro sanitário [a]	R$ 77,19/t
Custos disposição do lodo de esgoto em aterro sanitário [b]	R$ 90,00/t
Quantidade lodo de esgoto gerado [c]	500 toneladas/dia
Custo transporte e disposição lodo em aterro sanitário [a+b]	**R$ 83.595,00/dia**
Custos Referenciais de Instalação de uma Usina de Pirólise	
Capacidade de processamento da usina de pirólise	500 toneladas/dia
Custo médio com instalação da usina de pirólise	**R$ 812.780,49/t**
Custo instalação usina pirólise Capacidade 500 toneladas/dia [d1]	**R$ 406.390.245,41**
Custo com O&M de uma Usina de Pirólise	
Custo médio com O&M de uma usina de pirólise por tonelada	**R$ 220,23/t/dia**
Custo O&M usina pirólise Capacidade 500 toneladas/dia [d2]	**R$ 110.116,67/dia**
Receitas Estimadas com Energia a partir do Lodo Pirolisado	
Poder Calorífico Inferior do lodo (90% teor sólidos) [e]	10,66 MJ/kg
Energia cogeração termelétrica η=50%	740.278 kWh/dia
Valor médio energia no leilão de 2019	R$ 0,166 / kWh
Receita com energia elétrica a partir do lodo pirolisado [f]	**R$ 44.829.148,29/ano**
Tempo Retorno Investimento usina de pirólise	**9,07 anos**

Fonte: Elaborada pela Autora

Observa-se que o custo com O&M [d2] de uma usina de pirólise é aproximadamente 32% maior em relação ao custo para disposição do lodo do processo de tratamento de esgotos em aterro [a+b].

Essa questão tem relativa importância, pois além dos custos envolvidos para disposição em aterro há uma tendência de os aterros interromperem o recebimento de lodos de esgoto devido à disposição desse material aumentar a produção de chorume, de GEE e representar riscos geotécnicos ao maciço (WETLANDS, 2019).

Outra questão que pode influenciar a análise dos resultados é a comparação entre o processo de pirólise e a disposição de lodo em aterro sanitário quanto à captação de gás metano e sua transformação em energia elétrica. De acordo com Tisi (2019), o investimento de capital necessário para implantação de um aterro sanitário com captação do gás metano é 30% inferior ao de uma usina *WtE*. Entretanto, dados do 5º Relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (*IPCC*) mostram que os aterros sanitários equipados para capturar metano conseguem capturar, no máximo 50%, desse GEE. Embora com valores 30% inferiores do que os necessários para implantar uma usina *WtE, a* capacidade de geração de energia de um aterro é muito menor, além da vida útil em torno de 20 a 30 anos e os impactos negativos no meio ambiente como a contaminação de mananciais por chorume e emissão de metano na atmosfera que não contabilizados.

No caso estudado, seria possível gerar uma receita com energia elétrica ao ano [f], fazendo com que, em até 9,07 anos, o custo investido na instalação de uma usina de pirólise [d1] fosse recuperado e criando receita extra ao longo dos demais anos de vida útil da planta (estimada entre 20 e 30 anos).

Mostra-se então que há um cenário de pré-viabilidade econômico-financeira ao se investir em uma planta *WtE* que, por meio de pirólise, transforme o lodo de esgotos em CDR e o utilize na cogeração em uma central termelétrica.

Em futuros estudos, a fim de se promover uma comparação mais adequada entre os custos envolvidos na disposição do lodo em aterro e os custos de uma planta *WtE* que utilize pirólise como método de transformação do lodo em CDR, podem ser levantados os custos para construção e operação de um aterro sanitário e seu potencial de produção de energia através da captação do gás metano. Além disso, seria interessante estudar ou propor modelos de negócio que envolvam mais atores no processo, dividindo os riscos, como, por exemplo, um modelo em que os operadores de ETE tivessem uma receita com o CDR vendido a indústrias como a de cimento para coprocessamento, junto com combustíveis fósseis ou em substituição a esses, e avaliar se tal receita seria suficiente para se justificar o investimento em uma usina de pirólise ou se haverá resistência à compra de lodo como combustível pelo

setor industrial devido ao baixo custo de combustíveis como o carvão, coque de petróleo etc. Como fatores sensibilizadores para atrair parceiros como a indústria de cimento, por exemplo, é importante que seja destacado que, sendo uma forma de energia limpa, agrega-se valor à recuperação energética do lodo de esgoto, diferente da geração de energia por meio da queima de combustíveis fósseis, além de se contribuir para a eliminação de um resíduo perigoso antes encaminhado à aterros sanitários, colaborando duplamente para que os atores envolvidos sejam vistos de maneira positiva pela sociedade.

4 CONCLUSÃO

Soluções que englobem o processo de pirólise do lodo de esgoto e em seguida seu aproveitamento energético como combustível, em central termelétrica, apresentam-se como uma possibilidade viável tecnicamente. Considerando os aspectos econômicos, são apresentadas as considerações a seguir.

Em poucos anos, estima-se que entre três e cinco, a maioria dos aterros dos estados do Rio de Janeiro e São Paulo esgotarão suas capacidades, o que implicará na elevação dos custos com transporte de resíduos por grandes distâncias devido à falta de espaço para construir novos aterros, agravada pela decisão do Supremo Tribunal Federal de proibição da construção de aterros sanitários em áreas de preservação ambiental (ABREN, 2020).

A transformação de lodos de esgoto em combustível, não somente o eleva a categoria de material com elevado potencial para geração de energia, como também elimina sua toxicidade e reduz os custos com seu manejo, reduz a quantidade de resíduos que seriam destinados a aterros ou descartados no meio ambiente, além de diminuir a produção de gases de efeito estufa. Durante a pirólise, por não haver combustão devido à ausência de oxigênio, as emissões são limpas, monitoradas e controladas, atendendo às exigências de padrões nacionais de emissões.

Uma das justificativas para estudar o potencial de viabilidade de implantação de uma usina de pirólise para tratamento de lodo de esgoto com geração de energia são as quantidades abundantes (e crescentes) de lodo produzido e seu potencial energético que o caracterizam como combustível adequado para emprego em sistemas *Waste-to-Energy.* A maioria desses sistemas no mundo, segundo a ABREN (2020), estão instalados nas regiões centrais das cidades, portanto, esse tipo de

geração de energia traz economia com os custos de transmissão e distribuição, permitindo injetar energia no centro de carga (centro do consumo de energia), onde se tem demanda por energia, calor e gás, além da possibilidade de se instalar usinas *WtE* nos próprios locais onde são gerados os resíduos, proporcionando economia nos custos com transporte.

Tal destinação e uso do lodo fomentam uma economia circular e não ferem a hierarquia da destinação dos resíduos determinada pela PNRS, uma vez que recupera energia de um resíduo que não pode ser reciclado e reutilizado sem passar por nenhum tipo de tratamento (por exemplo, para emprego na recuperação de solos, compostagem, na produção de tijolos entre outros).

Para o sucesso de sistemas *WtE* no país, deve ser levado em consideração o arcabouço jurídico em vigor que disponha regras para o tipo específico de técnica que se pretende empregar. Em adição, condições estruturantes podem ser implantadas a fim de tornar o setor atrativo para investidores públicos e privados, buscando-se fontes de financiamentos para implantação dos projetos ou incentivos para geração de energia de baixo carbono, mecanismos de financiamento adicional para cobrir custos operacionais, ou então subsídios e redução de impostos e taxas.

Geralmente os custos de investimentos de uma usina de pirólise podem dissuadir os responsáveis pelas ETEs a implantarem-na, caso não se analisem a possibilidade de receita com o lodo transformado em combustível, os custos com construção e operação de aterros sanitários e seu o impacto ambiental.

A fim de se elevar as chances de sucesso, uma vez que no Brasil há falta de experiência na implantação e operação de instalações de *WtE,* é oportuno o estabelecimento de cooperação acadêmica e científica entre os diversos atores públicos e privados, como forma de fomento à educação no setor, capacitando profissionais e contribuindo para o desenvolvimento de técnicas de recuperação energética de resíduos, que adaptadas às condições locais, apresentem menores custos de investimento em comparação com a importação de equipamentos e tecnologias de países industrializados, sujeita a cenários cambiais desfavoráveis e custos altos que desestimulam o interesse público e privado pelo setor.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS - ABREN. **Contribuição para Consulta Pública Nº 025/2019 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)**. Brasília, DF, 2019. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/consultas-publicas Acesso em: 22 jun. 2020.

ANDREOLI, C. V. *et al*. **Alternativa de uso de resíduos do saneamento**. Projeto PROSAB. ABES. Rio de Janeiro, 2006.

ANDREOLI, C. V. *et al*. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição Final**. Projeto PROSAB. ABES. Rio de Janeiro, 2001.

BIRDING. Usina de Pirólise. Disponível em: https://www.birding.com.br/usina-de-pirolise/ Acesso em: 22 jun. 2020.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2 ed. Brasília, 2005. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/biomassa/5_3.htm Acesso em: 21 jun. 2020.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento - SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS: **24º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2018**. Brasília: SNS/MDR, 2019a. 180 p.: il. Disponível em: http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2018/Diagnostico_AE2018.pdf Acesso em: 26 jun. 2020.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento - SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS: **Série Histórica – 2015, 2016, 2017**. Brasília: SNS/MDR, 2020. Disponível em: http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/ Acesso em: 26 jun. 2020.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)**. Nota técnica DEA 16/14. Rio de Janeiro: EPE/MME, 2014a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2016%20-%20%20Economicidade%20e%20Competitividade%20do%20Aproveitamento%20Energetico%20d%5B1%5D.pdf Acesso em: 14 jun. 2020.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Nota técnica DEA 18/14. Rio de Janeiro: EPE/MME, 2014b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2018%20-%20%20Invent%C3%A1rio%20Energ%C3%A9tico%20de%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos%20Urbanos%5B1%5D.pdf Acesso em: 21 set. 2020.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2 de agosto de 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm Acesso em: 13 mar. 2020.

BRASIL. Portaria Interministerial n º 274, de 30 de abril de 2019. Disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos referida no § 1º do art. 9º da Lei nº 12.305, de 2010 e no art. 37 do Decreto nº 7.404, de 2010. **Diário Oficial da União**, Ministério do Meio Ambiente - MMA, Brasília, DF, 2 de maio de 2019b. Disponível em: http://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-interministerial-n%C2%BA-274-de-30-de-abril-de-2019-86235505 Acesso em: 13 mar. 2020.

CAIBRE, D. I. **Análise da viabilidade econômica do processo de pirólise para tratamento de resíduos sólidos urbanos: Estudo de caso aplicado a uma cidade de médio porte.** 2013. Tese

(Mestrado em Engenharia de Infraestrutura e Meio Ambiente) - Faculdade de Engenharia e Arquitetura de Passo Fundo. Passo Fundo, 2013.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - CCEE. **Info Leilão Nº 026 – 29º Leilão de Energia Nova (A-4)**. 2019. Brasília, DF, 2019. Disponível em: http://www.ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE_649032 Acesso em: 22 jul. 2020.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO - SABESP. **Chamada Pública Para Consulta Técnica: Prestação de Serviços de Destinação Final Ambientalmente Adequada [...] Precedida da Exploração do Potencial Energético Através do Uso do Biogás e do Lodo Provenientes das Instalações da ETE Barueri – SP**. São Paulo, 2016. Disponível em: http://sabesp-info18.sabesp.com.br/licita/cpublica.nsf Acesso em: 21 jun. 2020.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO - SABESP. **Relatório sustentabilidade investidores Sabesp 2018**. São Paulo, 2019. Disponível em: http://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/relatorios_sustentabilidade/sabesp_rs_2018_portugues(1).pdf Acesso em: 21 jun. 2020.

CONAMA, Leis *et al*. Resolução nº. 316 – Dispõe sobre procedimentos e critérios para funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil,** Brasília, v. 29, 2002.

FERRAZ, V. C. **Termelétricas - uma visão geral: combustíveis, ciclos térmicos, eficiência**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/188714/Vanderleia%20TCC_Vers%c3%a3o%20Final_REPOSIT%c3%93RIO.pdf?sequence=1&isAllowed=y Acesso em: 23 jun. 2020.

FONTES, C. M. A. **Potencialidades da cinza de lodo de Estações de Tratamento de Esgotos como material suplementar para a produção de concretos com cimento Portland**. 2003. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: http://www.coc.ufrj.br/en/component/docman/?task=doc_download&gid=1856&Itemid= Acesso em: 25 jun. 2020.

INDDRA. Gerenciamento de Risco no Aproveitamento Energético de Resíduos: Estudo de Caso na Aplicação de Tecnologia de Pirólise Lenta para Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos. *In*: XI CBPE Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 2018, Cuiabá. **Anais Eletrônicos.** Disponível em: https://inddra.com/wp-content/uploads/2019/06/artigo-XI-CBPE-final.pdf Acesso em: 25 jun. 2020.

INDDRA: Pirólise. Disponível em: https://inddra.com/pirolise/ Acesso em: 22 jun. 2020.

LEGNER, C. Os resíduos sólidos como geração de energia. **Meio Filtrante**, 2014. Disponível em: http://meiofiltrante.com.br/internas.asp?id=17398&link=noticias Acesso em: 14 jun. 2020.

LISBOA, F. C. **Carbonização E Gaseificação de Resíduos da Macaúba, Tucumã e Cupuaçu para Geração de Eletricidade**. 2016. Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília - UnB, Brasília, Distrito Federal, 2016.

MIRALVEZ, J. **Rotas tecnológicas de aproveitamento e tratamento de resíduos sólidos: Incineração de resíduos sólidos com recuperação energética: URE, WtE, EfW**. Apostila do Curso de MBA em Saneamento Ambiental da Fundação Escola de Sociologia e Política de São Paulo - FESPSP, 2019.

MUTZ, D. *et al*. - **Opções em Waste-to-Energy na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos.** *Deutsche Gesellschaftfür Internationale Zusammenarbeit Eschborn* (GIZ), Alemanha, 2017. Disponível em: http://protegeer.gov.br/images/documents/393/WasteToEnergy%20Guidelines%20GIZ%202017%20-web%20PT.pdf Acesso em: 25 jun. 2020.

ODA, T. **Making Fuel Charcoal from Sewage Sludge for Thermal Power Generation Plant - First in Japan**. Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government. Tokyo, Japan, [2007?].

ROSA, A. P.; CHERNICHARO, C. A. L.; MELO, G. C. B. Contribuição para o aproveitamento energético do lodo de ETEs em processos térmicos. **Revista DAE**, São Paulo, janeiro a abril de 2015, p. 55-62, 2015.

RUBIM, C. Os desafios do Tratamento de Lodo. **Revista TAE**, São Paulo, ago. 2013. Disponível em: http://www.revistatae.com.br/6376-noticias Acesso em: 1 abr. 2020.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO - SMA. Resolução SMA nº 79, de 7 de novembro de 2009 - Diretrizes e condições para a operação e o licenciamento da atividade de tratamento térmico de resíduos sólidos em Usinas de Recuperação de Energia - URE. **Diário Oficial do Estado de São Paulo** de 07-11-09 Seção I p. 63-65.

SMIDERLE, J. J. **Estudo de Viabilidade para Destinação Final do Lodo da ETA Laranjal/RJ.** 2016. Projeto de Graduação (Curso de Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.

TISI, Y. S. A. B. **Waste-to-Energy: Recuperação energética como forma ambientalmente adequada de destinação dos resíduos sólidos.** 1. ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2019. 240p.

WETLANDS. Lodos de esgoto: tecnologias de tratamento e formas de destinação. 18 nov. 2019. Disponível em: https://www.wetlands.com.br/post/lodos-de-esgoto-tecnologias-de-tratamento-e-formas-de-destinacao Acesso em: 13 jun. 2020.