



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Análise da viabilidade do processamento por pirólise de lodo de estação de tratamento de água

Autor: Milena Duarte Brandestini

Orientador: Prof.^a Dr.^a Luciane Ferreira Trierweiler

Coorientador: Lucas Manique Raymundo

Porto Alegre, novembro de 2020

ii Análise da viabilidade do processamento por pirólise de lodo de estação de tratamento de água

Autor: Milena Duarte Brandestini

Análise da viabilidade do processamento por pirólise de lodo de estação de tratamento de água

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química

Orientadora: Luciane Ferreira Trierweiler
Coorientador: Lucas Manique Raymundo

Porto Alegre

2020

ii Análise da viabilidade do processamento por pirólise de lodo de estação de tratamento de água

AGRADECIMENTOS

Agradeço à toda a minha grande família por todo apoio e estrutura proporcionados à minha educação.

Agradeço também minha orientadora Prof.^a Dr.^a Luciane e ao meu coorientador MSc. Lucas Manique Raymundo, que me auxiliaram durante essa jornada.

Aos meus pais, Ricardo e Rosana, e minha irmã Juliana, que sempre foram meu porto seguro e garantiram que eu pudesse ter acesso à todas as oportunidades que eu almejasse.

Mãe, meu compromisso contigo sempre foi com a luta e não com a vitória, mas hoje podemos comemorar juntas.

Aos meus avós maternos, Teresinha e Dejalmo, que me ensinaram sobre as riquezas do Rio Grande do Sul e também pela força e coragem características de todos os migrantes desse país.

A minha tia-avó, Beatriz, pelo apoio incondicional, pelas horas de conversa e encorajamento, e principalmente pela “manta” e pelo “abrigo”. Obrigada Tia Bê!

Também ao meu namorado, Hildon, por ser um porto seguro e um grande apoiador nos momentos de maior dificuldade.

iv Análise da viabilidade do processamento por pirólise de lodo de estação de tratamento de água

RESUMO

A água para consumo humano é um recurso essencial à manutenção da vida. No Rio Grande do Sul, a forma de abastecimento de água que abrange a maior parte da população (cerca de 80%) é o sistema de abastecimento de água com captação superficial e ciclo convencional de tratamento. Essa forma de tratamento pressupõe a geração de alguns resíduos, dentre os quais ressalta-se o lodo gerado na etapa de decantação, que muitas vezes é acumulado durante um período médio de seis meses e, em seguida, descartado, *in natura*, nos mesmos mananciais onde a água bruta é posteriormente captada para o tratamento e distribuição. Este trabalho propôs-se a revisar as alternativas tecnológicas disponíveis para a destinação do lodo gerado nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) através de buscas na literatura científica recente, realizando um comparativo entre as mesmas, ressaltando suas vantagens e desvantagens e destacando, dentre as tecnologias analisadas, a pirólise do lodo de ETA como uma alternativa emergente. Tal tecnologia tem potencial para permitir um reaproveitamento e valorização do resíduo gerado em grande quantidade em detrimento da simples transferência de fase, através da secagem, e destinação em aterro sanitário, proposta que é a alternativa mais utilizada. Como vantagens cita-se a possível substituição do adsorvente convencionalmente empregado nas ETAs, o carvão ativado, e a possível economia no consumo de insumos para o tratamento da água, equivalente a dezesseis milhões de reais ao ano, aproximadamente. Já é passada a hora de termos um olhar atento para o destino dos resíduos provenientes das estações de tratamento de água do Brasil e a aplicar, de maneira mais efetiva a Regra dos Cinco Erres, buscando a redução do consumo de insumos e a reciclagem do resíduo gerado. Devido ao elevado volume de geração desse resíduo, uma abordagem multifacetada é requerida, não há evidências de que exista uma solução única capaz de destinar todo o lodo gerado, mas diversas alternativas, trabalhando conjuntamente são a maneira mais eficiente de realizar a destinação da maneira mais correta, atendendo a toda a legislação vigente e pensando na preservação dos recursos naturais para as próximas gerações.

Palavras-chave: Lodo, Estação de Tratamento de Água, Pirólise, Carvão ativado

ABSTRACT

Water for human consumption is an essential resource for maintaining life. In Rio Grande do Sul, the form of water supply covering most of the population (about 80%) is the water supply system with surface collection and conventional treatment cycle. This form of treatment presupposes the generation of some residues, among which the sludge generated in the decantation stage. It is often accumulated over an average period of six months and then discarded, *in natura*, in the same springs where raw water is subsequently collected for treatment and distribution. This work aimed to review the technological alternatives available for the disposal of the sludge generated in the Water Treatment Plants (WTPs) through searches in the recent scientific literature, making a comparison between them, highlighting their advantages and disadvantages. Among the analyzed technologies, is also the pyrolysis of the WTP sludge as an emerging alternative. Such technology has potential to allow the reuse and recovery of the waste generated on such a large scale to the detriment of simple phase transfer, through the drying process, and disposal in a landfill, currently the most used alternative. The advantages include the possible replacement of the adsorbent conventionally used in WTPs, activated carbon, and the savings in the consumption of inputs for water treatment, equivalent to approximately sixteen million reais a year. The time has passed for us carefully look at the destination of the waste coming from water treatment plants in Brazil and apply the 5R concept more effectively, seeking to reduce input consumption and recycle waste generated. Due to the high volume of the generation of this waste, a multifaceted approach is required, there is no evidence that a single solution is capable of disposing of all the generated sludge, but several alternatives, working together, are the most efficient way to carry out the destination in the correct way, attending to all the current legislation and thinking about the preservation of natural resources for the next generations.

Keywords: *sludge, water treatment plant, pyrolysis, activated carbon.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Série histórica (1931 – a 2030) – Vazão de Água utilizada para o Abastecimento Humano Urbano. Fonte: ANA – Agência Nacional de Águas (BRASIL, 2018).....	2
Figura 2 – Número de sistemas de abastecimento de água administrados por órgãos, administrações e empresas no estado do Rio Grande do Sul – Fonte: SISAGUA (2020).....	4
Figura 3 – População abastecida pelos diferentes responsáveis pelos sistemas de abastecimento de água no estado do Rio Grande do Sul - Fonte: SISAGUA (2020).....	4
Figura 4 – Artigos publicados por ano contendo as palavras-chave: <i>drinking water, sludge, treatment</i> . Fonte: Web of Science	6
Figura 5 - Produção nacional de tijolos, placas, ladrilhos e outras peças cerâmicas refratárias para construção, de 2010 até 2015. Fonte: Ministério de Minas e Energia	10
Figura 6 - Produção de cimentos, argamassas, concretos (betões) refratários e composições semelhantes, de 2010 até 2015. Fonte: Ministério de Minas e Energia.....	11

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produtos utilizados na coagulação.....	3
Tabela 2 – Municípios, total e por existência de geração de lodo no processo de tratamento de água, por destino do lodo gerado, segunda as Grandes Regiões e as Unidades da Federação - 2008	5
Tabela 3 – Estimativa de geração de lodo das ETAs, por mesorregião do Estado do Rio Grande do Sul, 2014.....	17
Tabela 4 - Um resumo das vantagens e desvantagens das diversas rotas potenciais para o descarte do lodo gerado nas ETAs (continua)	19
Tabela 5 – Parâmetros da Isoterma de Lagmuir para adsorção de azul de metileno em lodo de ETA após ativação física (pirólise) ou química	24
Tabela 6 – Parâmetros obtidos para o ajuste de diferentes modelos de isotermas de adsorção do azul de metileno em carvão ativado comercial, segundo Mildemberg (2019) ..	24

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

ETA – Estação de Tratamento de Água

WTP – Water Treatment Plant

SISAGUA - Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano

SAA - Sistemas de Abastecimento de Água

ETE – Estação de Tratamento de Efluentes

PNSB - Pesquisa Nacional de Saneamento Básico

POA - Processos de Oxidação Avançados

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica	2
2.1	Caracterização do problema	2
2.2	Legislação em vigor	6
2.3	Alternativas tecnológicas para a destinação final	8
2.3.1	Desidratação e destinação em aterro	8
2.3.2	Disposição no Solo	8
2.3.3	Incorporação em materiais cerâmicos e tijolos	9
2.3.4	Incorporação em cimento e argamassas	10
2.3.5	Reciclo do lodo aplicado à remoção de Corantes	11
2.3.6	Reciclo do lodo aplicado à retirada de poluentes em ETEs	11
2.3.7	Adsorvente de metais (Cd)	12
2.3.8	Produção de hidróxido de alumínio	12
2.3.9	Condicionamento por processo de oxidação avançada (Fenton e Fenton-Semelhante)	12
2.3.10	Recuperação de coagulante por lixiviação ácida	13
2.4	Nova alternativa tecnológica proposta	13
2.5	Carvão Ativado	14
2.6	A isoterma de Adsorção de Langmuir	15
3	Materiais e Métodos	16
4	Resultados	17
4.1	Estimativa da produção de lodo no Rio Grande do Sul	17
4.2	Análise térmica do lodo de ETA	17
4.3	Análise Crítica das alternativas propostas para o Lodo de ETA	18
4.4	Comparações entre adsorventes: Nova proposta versus Tratamento Convencional em ETA.	23
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	27
6	REFERÊNCIAS	28

1 Introdução

A água é um recurso essencial à sobrevivência das diversas formas de vida, inclusive e em especial, é a água potável à vida humana, e, com o tempo, tem se tornado um produto cada vez mais escasso e de maior valor agregado. Historicamente as primeiras civilizações buscaram instalar-se próximo aos corpos hídricos, para que estes pudessem suprir suas necessidades, tanto em quantidade e qualidade suficiente e assim, com o passar do tempo, desenvolveram-se as sociedades modernas, colocando, a cada dia, mais e mais pressão ambiental sobre os recursos hídricos.

Na contramão do crescimento populacional e da demanda por água de potável, que aumentam de maneira acentuada, a qualidade da água bruta disponível nos mananciais decai a cada dia, sobrecarregando as estações de tratamento de água (ETAs), que são as responsáveis por adequar a qualidade da água bruta aos padrões de potabilidade estabelecidos na legislação vigente. O balanço de massa nessas estações garante que tudo aquilo que não é entregue como produto, na saída, acaba se tornando um resíduo e, na maioria das vezes, retornando ao corpo hídrico de origem.

Dentre os resíduos gerados, destaca-se o lodo que tem origem na etapa de decantação das ETAs, um adensado que tem origem predominantemente na matéria orgânica em suspensão advinda da água bruta, que decanta com o auxílio de agentes coagulação, removendo grande parte das impurezas presentes.

Os decantadores das ETAs operam continuamente e são esvaziados para limpeza do lodo após um período médio de seis meses. Atualmente o principal destino, *in natura*, desse lodo acumulado é o próprio manancial onde a água bruta é captada, causando danos e impactos ambientais a esse recurso tão precioso e desse modo aumentando, cada vez mais, a complexidade do tratamento a ser utilizado, fechando um ciclo bastante preocupante.

Destinações alternativas como centrifugação e secagem do lodo para diminuição de volume do mesmo têm sido empregadas com relativo sucesso porém, após a secagem, como um resíduo sólido classe II - A, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010), o lodo seco deve ser disposto em aterro sanitário, logo, são alternativas de redução de impacto mas não de reutilização do resíduo.

Como uma alternativa tecnológica para valorização do lodo gerado estudou-se o processo de pirólise, que consiste na decomposição termoquímica do resíduo, gerando materiais que tem potencial de aproveitamento como por exemplo em adsorventes ou combustíveis. O objetivo desse trabalho é avaliar a viabilidade de uma nova alternativa tecnológica a partir de uma extensa revisão bibliográfica da literatura acerca da aplicação dos produtos da reação de pirólise do lodo de estação de tratamento de água como um novo adsorvente, em detrimento dos materiais atualmente empregados.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Caracterização do problema

A crescente demanda de água no âmbito nacional foi estudada pela Agência Nacional das Águas em um amplo estudo realizado e denominado Manual de usos consuntivos da água no Brasil (2019) e demonstra, na Figura 1, o aumento do consumo de água com o fim de abastecimento humano urbano.

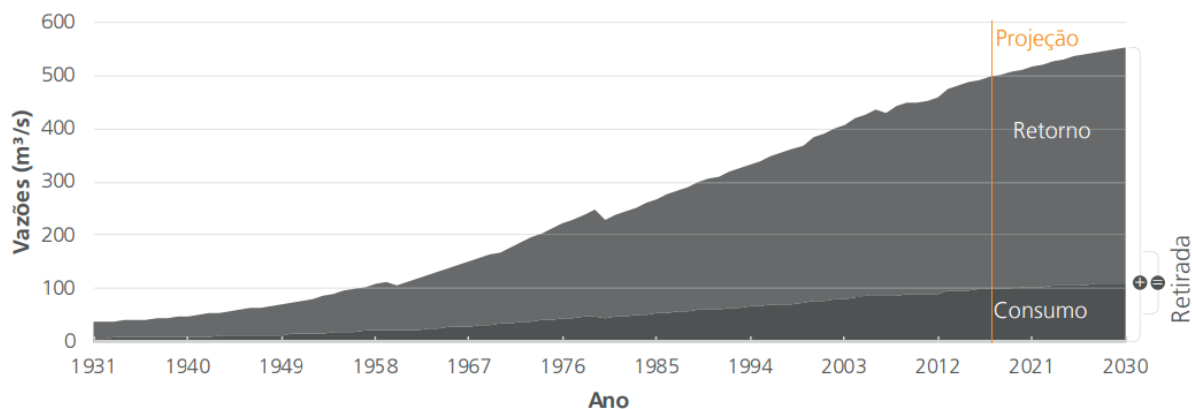


Figura 1 – Série histórica (1931 – a 2030) – Vazão de Água utilizada para o Abastecimento Humano Urbano.

Fonte: ANA – Agência Nacional de Águas (BRASIL, 2018)

A sequência de etapas de tratamento mais utilizada para compatibilização da água bruta ao padrão de potabilidade estabelecido na legislação é a do ciclo completo ou convencional (SAÚDE, 2006), que contempla as etapas de:

1. **Coagulação:** Refere-se ao fenômeno químico da desestabilização das cargas superficiais, geralmente negativas, das partículas coloidais e em suspensão presentes na água, a partir da adição de um coagulante. Os coagulantes mais utilizados no Brasil são os sais de alumínio e de ferro.
2. **Floculação:** Agitação relativamente suave da água, após o processo de coagulação, para que ocorram choques entre as partículas e essas se aglomerem em outras maiores (flocos), facilitando, assim, sua sedimentação.
3. **Sedimentação:** Processo de separação, por gravidade, dos sólidos sedimentáveis contidos em uma solução líquida. Os sólidos sedimentam no fundo do decantador, de onde acabam sendo removidos como lodo.
4. **Filtração rápida:** Processo de remoção de partículas suspensas e coloidais e de microrganismos presentes na água, que escoam pelo meio filtrante. O filtro pode ser composto de uma ou mais camadas de areia de diferentes granulometrias, carvão, ou, ainda, camadas alternadas de areia e carvão.
5. **Desinfecção:** O cloro é o desinfetante mais empregado, porém existem outros métodos químicos de desinfecção, como, por exemplo, ozônio, iodo, prata (coloidal ou iônica), sal de cozinha etc.

6. Correção de pH: Ajuste do pH para reduzir a acidez da água e evitar a corrosão das tubulações e redes de distribuição.

Cabe ressaltar a diferença entre os processos 1e 2, citados acima, comumente utilizados como sinônimos. A coagulação propriamente dita é a alteração físico-química de partículas coloidais presentes na água produzindo partículas que possam ser removidas em seguida por um processo físico de separação como filtração, flotação ou, mais usualmente, a sedimentação. A coagulação pode ser considerada como um processo constituído de duas subseqüentes: a primeira – a coagulação, propriamente dita – envolve a adição de coagulantes químicos com a finalidade de reduzir as forças que mantêm separadas as partículas em suspensão.

Tabela 1 - Produtos utilizados na coagulação

Coagulantes	Auxiliares da Coagulação	Alcalinizantes
Sulfato de Alumínio	Argila	Óxido de Cálcio
Sulfato Ferroso	Poliieletrólitos	Cal Hidratada
Cloreto Férrico	Sílica Ativada	Soda Caústica
Sulfato Férrico	Carbonato de Sódio	
Alumina de Sódio		

Fonte: Manual de Controle da Qualidade da Água para Técnicos que Trabalham em ETAS (FUNASA, 2014)

A segunda fase da coagulação – a floculação – promove colisões entre as partículas previamente desestabilizadas na coagulação, por efeito de transporte de fluido, formando partículas de maior tamanho, visíveis a olho nu: os flocos.

Dados do Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (SISAGUA) de 2020 corroboram essa afirmação, demonstrando que aproximadamente 80% (9.159.757 habitantes) da população do Rio Grande do Sul é abastecida por Sistemas de Abastecimento de Água (SAAs) com a seqüência de operações unitárias acima citadas.

De todas os SAAs operados no estado do Rio Grande do Sul, grande parte destes são operados pela sociedade de economia mista, a Companhia Riograndense de Saneamento, CORSAN, que é hoje responsável pelo abastecimento de água adequada ao padrão de potabilidade para a maior parcela da população do Estado, conforme pode ser visto nas Figuras 2 e 3. Desta forma, utilizar-se-á, ao longo deste trabalho, para fins de base de cálculo, os dados de vazões afluentes e efluentes, além dos dados de utilização de insumos desse órgão.

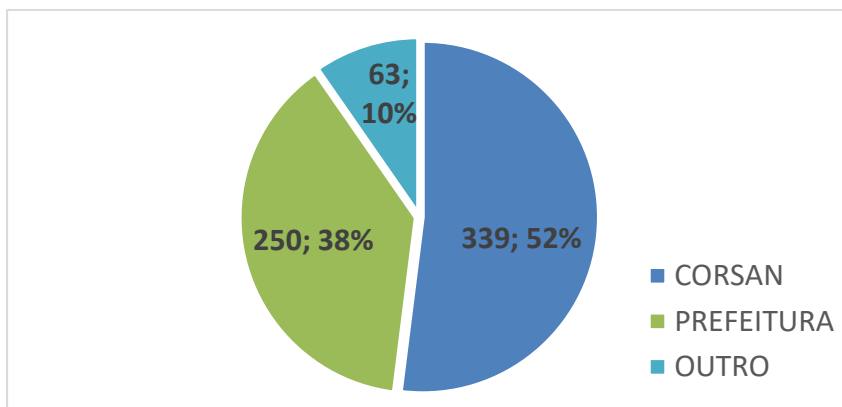


Figura 2 – Número de sistemas de abastecimento de água administrados por órgãos, administrações e empresas no estado do Rio Grande do Sul – Fonte: SISAGUA (2020).

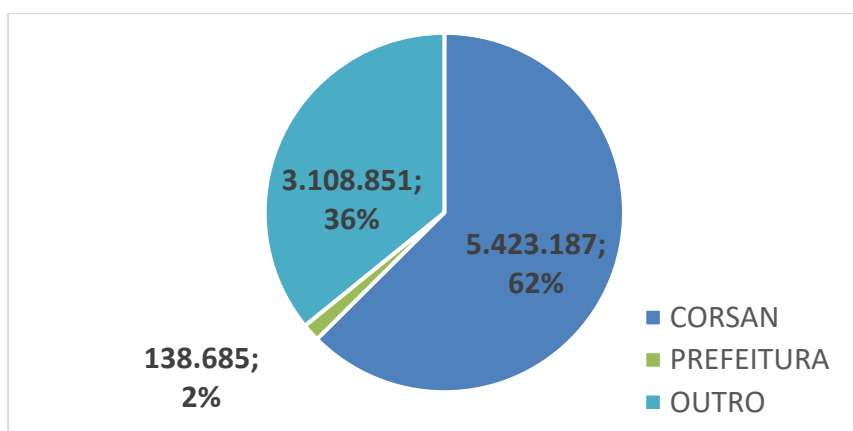


Figura 3 – População abastecida pelos diferentes responsáveis pelos sistemas de abastecimento de água no estado do Rio Grande do Sul - Fonte: SISAGUA (2020).

Durante o processo de tratamento de água são gerados efluentes, tais como o resíduo de limpeza dos decantadores (conhecido como lodo dos decantadores) e o resíduo de lavagem dos filtros (ou água de lavagem dos filtros), sendo os dois resíduos formados em maior quantidade em uma ETA (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2013).

Lodo: Sedimento composto por uma mistura de substâncias que apresentam minerais, coloides e partículas advindas de matéria orgânica decomposta em suspensão no meio aquoso. Em uma estação de tratamento de água, por exemplo, **é um resíduo constituído de água e sólidos suspensos somados a produtos dos reagentes aplicados no tratamento da água.** Em uma estação de tratamento de esgoto, é uma mistura sólida e semissólida de substâncias orgânicas e inorgânicas com aspecto desagradável, mau cheiroso e elevada concentração de água (95%). O lodo constitui o principal subproduto do tratamento de efluentes. (IBGE, 2020)

As características físico-químicas do lodo gerado nos decantadores variam em função de diversas variáveis como: composição da água bruta captada, reagentes empregados no tratamento, período do ano e nível de água do corpo hídrico, porém, um dos principais contaminantes é associado com o tipo de agentes flocculantes usados na precipitação (TEIXEIRA *et al.*, 2011).

Em trabalhos como o de Dandolini (2014), que analisou o lodo gerado na estação de tratamento de água operada pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), após a realização dos ensaios recomendados pela NBR 10.004, concluiu que esse resíduo, na sua forma sólida, após o processo de secagem, deve ser como Classe II-A - Resíduo Não-Perigoso e Não-Inerte.

Para o cumprimento da legislação em vigor e elaboração dos planos de saneamento surge a necessidade de um levantamento amplo do atual panorama no saneamento básico no Brasil e o IBGE, reconhecendo a importância da oferta de serviços de saneamento básico para a melhoria das condições de vida da população brasileira, realizou em 2008, um novo levantamento da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSB (IBGE, 2010), com o objetivo de avaliar os serviços de abastecimento de água, esgotamento sanitário, manejo de águas pluviais e manejo de resíduos sólidos prestados à população pelas entidades que atuam no setor.

Dentre os tópicos de manejo de resíduos sólidos, dá-se especial importância à destinação dos lodos gerados no processo de tratamento de água. O levantamento dos dados encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Municípios, total e por existência de geração de lodo no processo de tratamento de água, por destino do lodo gerado, segunda as Grandes Regiões e as Unidades da Federação - 2008

Grandes Regiões e Unidades da Federação	Municípios									Não há geração de lodo
	Total	Com Geração de lodo no processo de tratamento de água								
		Total	Destino do lodo gerado							
			Rio	Mar	Terreno	Aterro Sanitário	Incinerção	Reaproveitamento	Outro	
Brasil	5.564	2.098	1.415	7	463	83	1	50	247	1.264

Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação e População e Indicadores Sociais, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, 2008.

Nota 1: O município pode dar mais de um destino ao lodo gerado no processo de tratamento de água.

Nota 2: Entende-se por reaproveitamento a aplicação do lodo na fabricação de tijolos, telhas e gesso, ou ainda na agricultura, como fertilizante e recompositor da camada superficial do solo

Nota 3: Existem municípios sem tratamento de água, logo, a soma dos municípios com e sem geração de lodo no processo de tratamento não resulta no total de municípios do país.

Observa-se que no ano da publicação, cerca de 38% (2.098) dos municípios brasileiros já possuíam instalações que permitem a adequação da qualidade da água aos parâmetros de potabilidade através de processos físico-químicos que propicia a formação de lodos, porém desses, 67% (1.415) destinam o lodo in natura diretamente nos corpos hídricos, impactando seriamente os recursos naturais. Essa tabela não foi atualizada na nova edição na Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, publicada no ano de 2020.

Através de um levantamento realizado na plataforma Web of Knowledge observa-se, na Figura 2, que a quantidade de publicações que contém as palavras-chave: “Drinking Water”, “Sludge” e “Treatment” aumentou drasticamente na última década, demonstrando que as

pesquisas no sentido de encontrar uma alternativa economicamente viável e mais sustentável para a destinação final desse resíduo são cada vez mais requisitadas.

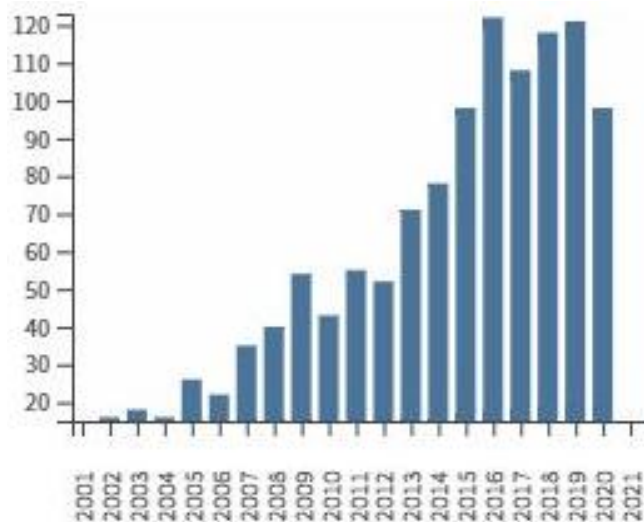


Figura 4 – Artigos publicados por ano contendo as palavras-chave: *drinking water, sludge, treatment*. Fonte: Web of Science

2.2 Legislação em vigor

Segundo o Art. 5º do Anexo XX da portaria de consolidação nº 05 (BRASIL, 2017), define-se água potável como: “água que atenda ao padrão de potabilidade estabelecido neste Anexo e que não ofereça riscos à saúde”, logo, para que a água bruta, captada dos mananciais possa ser adequada aos padrões de potabilidade exigidos pela legislação, se faz necessário o uso de processos de tratamento, físicos e químicos, que são realizados nas estações de tratamento de água.

As águas doces, salobras e salinas do Território Nacional são classificadas pela Resolução nº 357, que dispõe sobre: “a classificação dos corpos de água e dá as diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.” (CONAMA, 2005) e especifica treze possíveis classes de qualidade entre água doce, salobra e salgada.

Na seção I da resolução dispõe-se sobre a classificação das águas doces, que são:

I - Classe especial: Que podem ser destinadas ao abastecimento para consumo humano, com desinfecção;

II - Classe 1: Que podem ser destinadas ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado;

III - Classe 2: Que podem ser destinadas ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional;

IV - Classe 3: Que podem ser destinadas ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado;

V - Classe 4: Que não podem ser destinadas ao abastecimento para consumo humano.

Da classe especial para a classe 3, os parâmetros de qualidade da água vão ficando cada vez menos restritivos e, conseqüentemente, o tratamento necessário para adequá-la aos parâmetros estabelecidos na legislação vigente vai se tornando mais complexo, devido à concentração maior de poluentes, e conseqüentemente, os resíduos gerados na realização desses processos de adequação aos parâmetros também tornam-se mais complexos.

A classificação de resíduos em geral é dada pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), que define:

Resíduos sólidos: Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. **Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água**, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Desta forma, resíduos de lodos de decantadores de estações de tratamento de água estão sujeitos à classificação dos resíduos dadas pela NBR 10.004, dada abaixo:

- a) Resíduos classe I - Perigosos;
- b) Resíduos classe II – Não perigosos;
 - Resíduos classe II A – Não inertes.
 - Resíduos classe II B – Inerte

Os resíduos classe I tem por características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos podem ser classificados como resíduos classe II A – Não inertes, que podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água ou classe II B - Inertes, que não apresentam características potencialmente contaminantes, nos termos desta Norma

A Lei nº 11.445 (BRASIL, 2007), que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico estabelece no Art. 2º, item III que: “abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos realizados de formas adequadas à saúde pública e à proteção do meio ambiente.”. Estabelece também a necessidade da elaboração dos planos estaduais e municipais de saneamento pelos órgãos responsáveis.

O lançamento em corpos d'água dos resíduos gerados em ETAs, quando não aprovado por órgãos ambientais, pode ser considerado crime ambiental devido aos efeitos diretos causados ao ambiente aquático do corpo receptor, provocando danos à fauna aquática. Constitui-se crime ambiental, de acordo com o artigo 54 da Lei 9.605/98. (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2013).

2.3 Alternativas tecnológicas para a destinação final

Na busca por alternativas econômica e ambientalmente viáveis para a destinação desse resíduo, a comunidade acadêmica tem colocado grande esforço na criação e validação de diferentes métodos que empregam princípios como: a diminuição de volume, a transferência de fase e a incorporação em diferentes produtos como estratégia, abaixo seguirá uma análise sobre as principais vertentes de pesquisas que estão em desenvolvimento para a destinação desse resíduo

2.3.1 Desidratação e destinação em aterro

Dentre as alternativas mais comumente empregadas devido ao conhecimento já sedimentado sobre sua aplicação, viabilidade econômica comprovada e adequação à legislação em vigor encontra-se a desidratação, seguida da destinação em aterro sanitário.

Segundo o IBGE: desidratação (ou desaguamento) é o processo que objetiva remover a água e reduzir ainda mais o volume, produzindo lodo com comportamento mecânico próximo ao dos sólidos. A desidratação tem impacto importante nos custos de transporte e destino final, além de influenciar, de maneira decisiva, o manuseio do lodo, já que o comportamento mecânico desse varia com o teor de umidade.

Em regiões onde as condições climáticas se apresentam favoráveis e existe disponibilidade de área física, a utilização de leitos de secagem pode diminuir impactos ambientais, bem como o volume dos despejos da lavagem dos decantadores, possibilitando a reciclagem do sobrenadante na unidade de mistura rápida e minimizando as perdas. Entretanto, em locais com elevada precipitação e umidade relativa do ar, as taxas de evaporação serão muito menores, resultando em um tempo de secagem mais longo. (GUERRA, 2005).

A desidratação e destinação em aterros estão previstas nas legislações brasileiras, porém, diferentemente de outras alternativas tecnológicas disponíveis atualmente não promovem nenhum tipo de reciclagem ou reaproveitamento do resíduo gerado, apenas aumentando os volumes gerados a serem degradados nos aterros.

2.3.2 Disposição no Solo

O lodo gerado em ETA é, em geral, composto principalmente por areia, silte, argila e substâncias húmicas presentes nas águas dos rios (TEIXEIRA; DE MELO; DA SILVA, 2005), logo apresenta potencial de ser empregado como agente promotor da recuperação de áreas degradadas, teoricamente elevando os teores de alguns macronutrientes como Ca, Mg e K, além do valor de pH do solo (normalmente ácido para áreas degradadas).

O resíduo proveniente das estações pode conter também, em menor quantidade, alguns contaminantes provenientes da água bruta ou dos agentes coagulantes utilizados no tratamento convencional, logo, torna-se necessário um monitoramento das alterações provocadas pela aplicação desse resíduo no ambiente devido aos possíveis efeitos negativos ao solo e às plantas, como salinização, acúmulo de metais e a lixiviação de nitratos. (TEIXEIRA; DE MELO; DA SILVA, 2005)

O estudo realizado por Teixeira (2005) demonstra que apesar dos resultados promissores em termos da aplicação do lodo em solo degradado, ainda sim, faz-se necessária a aplicação

de outro resíduo orgânico, tal como composto de serragem ou esterco bovino, para controle da salinidade total, inserida pelo resíduo.

2.3.3 Incorporação em materiais cerâmicos e tijolos

O emprego de diversos resíduos incorporados a matérias-primas da construção civil é uma forma de evitar a utilização desnecessária de novos recursos naturais e de energia e o lodo proveniente da etapa de decantação das estações de tratamento de água possui características particularmente interessantes para essa aplicação.

Segundo Teixeira (2011), o lodo extraído da estação de tratamento de água situada na cidade de Presidente Prudente (Interior de São Paulo), durante o período de 2001 a 2004, apresentava a concentração ideal de argila, conferindo a plasticidade ideal a mistura utilizada na fabricação de telhas.

Por outro lado, devido as variações de composição naturalmente presentes nesse resíduo, quando a concentração de argila ou de areia ultrapassa determinados teores, pode causar problemas nos processos de secagem e cozimento das peças de cerâmica.

Em geral, os resultados obtidos empregando lodo na composição da mistura utilizada na confecção de materiais cerâmicos e tijolos consistentemente piorou suas propriedades mecânicas (TEIXEIRA *et al.*, 2011).

Chiang (2009) propôs que a adição de pequenos percentuais em massa (até 5%) poderiam substituir o corante usualmente utilizado para a obtenção da cor avermelhada dos materiais cerâmicos sem uma piora das propriedades mecânicas, porém, de acordo com o estudo realizado pelo Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2018), apresentado na Figura 3, incorporando 5% em massa de todo os tijolos produzidos nacionalmente no ano de 2015 não seria possível destinar todo o lodo produzido na cidade de Porto Alegre.



Figura 5 - Produção nacional de tijolos, placas, ladrilhos e outras peças cerâmicas refratárias para construção, de 2010 até 2015. Fonte: Ministério de Minas e Energia

2.3.4 Incorporação em cimento e argamassas

El-Didamony (2014) estudou a incorporação do lodo proveniente de estações de tratamento de água em pastas de cimento compostas em substituição à escória granulada. Foram testadas composições com 5, 10 e 15% de incorporação em massa e os resultados mostraram que houve um aumento do teor de água quimicamente combinado em todas elas, um aumento da força compressiva na composição de 5%, seguido da diminuição dessa propriedade com o aumento da incorporação do resíduo.

Cabe aqui o mesmo debate incitado na incorporação do lodo em tijolos cerâmicos, avaliando-se a produção nacional de cimentos argamassas e outras composições semelhantes, que segue ilustrada na Figura 4. Vemos que, somando-se todo o lodo produzido apenas no município de Porto Alegre, numa estimativa grosseira, já teríamos suprido aproximadamente 33% de toda a capacidade de incorporação nacional disponível.

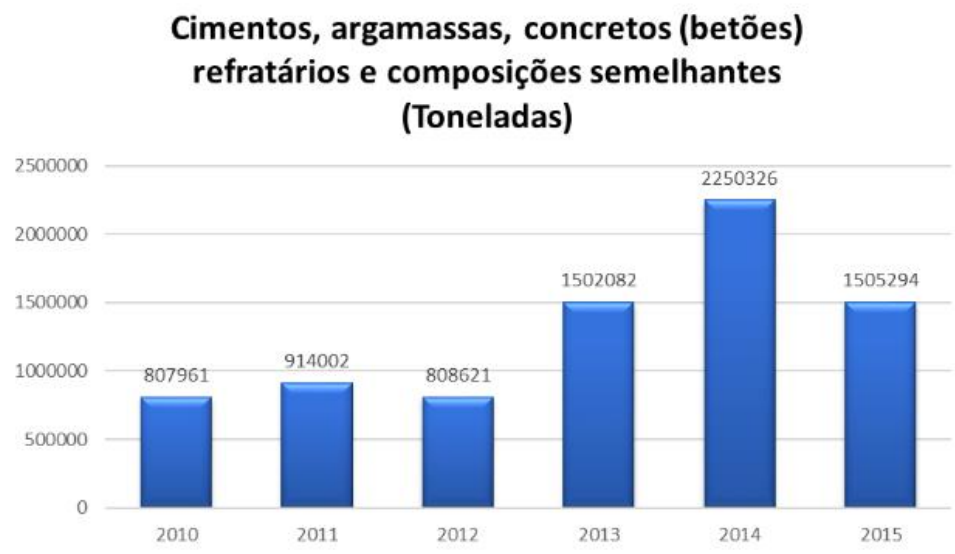


Figura 6 - Produção de cimentos, argamassas, concretos (betões) refratários e composições semelhantes, de 2010 até 2015. Fonte: Ministério de Minas e Energia

2.3.5 *Reciclo do lodo aplicado à remoção de Corantes*

Chu (2001) propôs, testou e otimizou a reciclagem do lodo gerado na etapa de decantação das ETAs na remoção de corantes em efluentes sintéticos de indústrias têxteis (misturas de corantes hidrofílicos e hidrofóbicos), principalmente no que se refere à remoção da cor.

O estudo aponta que reutilizar o lodo que contém compostos de alumínio, invés de tentar recuperá-lo, separando-o de restante do resíduo, se apresenta como uma melhor estratégia devido aos custos envolvidos nesse último processo

Utilizando toda a capacidade de remoção do reagente de alumínio empregado no tratamento, até sua saturação, permite eliminar parte do custo operacional mas, Chu (2001) também ressalta que a utilização desse resíduo ainda no processo de produção de água potável não é adequado, por conta das incertezas que envolvem esse processo e que podem ocasionar no não cumprimento dos padrões de potabilidade estabelecidos na legislação.

Concluiu-se que apesar de a utilização do resíduo na remoção dos corantes proporcionar uma redução no uso de reagente fresco ainda não é possível alcançar a remoção desejada apenas empregando lodo de ETA e que o tratamento proposto produziu uma remoção satisfatória (85% de remoção da cor) para corantes hidrofóbicos mas não ocasionou remoção de corantes hidrofílicos, demonstrando que para efluentes mais complexos, misturas, não é uma alternativa apropriada.

2.3.6 *Reciclo do lodo aplicado à retirada de poluentes em ETEs*

O atual emprego de agentes coagulantes em estações de tratamento de efluentes impacta fortemente nos custos totais da operação (NAIR; AHAMMED, 2015), como alternativa economicamente viável, diversos autores sugerem a adição de lodo proveniente das ETAs na etapa de coagulação das ETEs como uma forma de diminuir a quantidade de agente coagulante fresca inserida no sistema.

Devido ao lodo das ETAs ser composto majoritariamente dos agentes coagulantes empregados no tratamento da água (GUAN; CHEN; SHANG, 2005), seu aproveitamento máximo pode ser alcançado, sob condições ótimas, reutilizando-o no pré-tratamento de efluentes que possuem padrões de lançamento menos exigentes, como por exemplo, esgoto doméstico.

O autor testou as principais variáveis que podem impactar na performance da adição do resíduo como coagulante: a dosagem de lodo, a velocidade de mistura rápida e o tamanho do floco da formado, objetivando a melhoria da remoção de sólidos suspensos e de demanda química de oxigênio do esgoto bruto.

Verificou-se que as eficiências de remoção de sólidos suspensos e da demanda química de oxigênio foram melhoradas em 20% e 15%, respectivamente, devido à introdução de lodo, e sua principal contribuição foi na remoção de partículas com tamanho variando de 48 a 200 μm , as menores presentes no efluente.

Essa forma de reutilização do resíduo é particularmente atraente pois, muitas vezes, as estações de tratamento de água e esgoto são operadas pela mesma empresa, que possui um resíduo que precisa de destinação adequada e uma operação que necessita de muitos insumos, com elevado impacto econômico, porém, a utilização do resíduo não substitui totalmente a adição de insumos frescos e apresenta riscos à estabilidade do processo.

2.3.7 *Adsorvente de metais (Cd)*

De acordo com Siswoyo (2014) a adsorção é um dos métodos mais comuns e mais aplicados para o tratamento de água e esgoto em diversos países, sendo que o carvão ativado é o adsorvente mais utilizado, apesar de muito caro.

O autor propõe um processo bastante simplificado, que consiste em: lavagem com água destilada, secagem e moagem do lodo e aplicação direta desse pó na adsorção do íon Cádmio em água e conclui que, comparado a outros materiais, esse novo adsorvente apresenta bons resultados e pode ser considerado de baixo custo, apresentando uma área superficial de 50 $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$, em comparação ao carvão ativado comercial, que pode atingir até 800 $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$ (MILDEMBERG, 2019).

2.3.8 *Produção de hidróxido de alumínio*

Segundo Barakwan (2019), o alumínio residual presente no lodo gerado poderia ser recuperado através de um método combinado de acidificação e eletrólise, otimizando o pH e a corrente elétrica e empregando eletrodos de Prata/Carbono em um reator em batelada com recirculação, porém, o estudo alcançou uma recuperação máxima de 32% no ponto ótimo, apontando também a presença de pequenas quantidades de metais pesados.

A baixa recuperação apontada no estudo demonstra que somente a etapa de recuperação não seria suficiente para diminuir os níveis de alumínio residual presente no lodo.

2.3.9 *Condicionamento por processo de oxidação avançada (Fenton e Fenton-Semelhante)*

Recentemente, os processos de oxidação avançados (POAs) vem ganhando cada vez mais atenção global principalmente no condicionamento de lodo gerado nas estações de

tratamento de água. Isto é devido ao potencial reconhecido de tais processos e aos riscos percebidos de longo prazo de resíduos de polímero, empregado convencionalmente no tratamento deste resíduo, para o ambiente aquático circundante. Em particular, o destino do resíduo de polímero quando os bolos de lama desidratados (que contêm os resíduos do polímero usado) são depositados em aterro como uma opção de descarte final ainda não está claro.

Os resultados do estudo de Tony et al. (2009) demonstraram que os processos Fenton e Fenton-Semelhante influenciam positivamente as características de desidratação do lodo. Diversos íons foram testados, porém o Fe^{2+} ainda apresentou um melhor resultado na desidratação do lodo contendo hidróxido de alumínio, com eficiência de redução de 47% do tempo de sucção capilar (TSC) alcançada.

Embora a eficiência de condicionamento (em termos de redução de TSC) do reagente de Fenton seja menor do que a do condicionamento de polímero, o reagente de Fenton oferece uma vantagem potencial de eliminar o risco percebido de longo prazo de resíduo de polímero para o meio ambiente e uma desvantagem potencial de ainda ser um processo com insumos muito caros para aplicação em grande escala, como seria requerido para o tratamento do lodo gerado nas ETAs.

2.3.10 Recuperação de coagulante por lixiviação ácida

A recuperação dos agentes coagulantes empregados nas ETAs oferece muitos benefícios potenciais para o tratamento de água, reduzindo a demanda química e a produção de resíduos, especialmente o volume de lodo descartado na etapa de coagulação.

Trabalhos como o de Keeley (2014) demonstram que a remoção da demanda química de oxigênio e turbidez pelos coagulantes recuperados foi próxima à dos coagulantes comerciais, indicando que o coagulante pode ser recuperado e regenerado com sucesso pela acidificação do lodo do sistema hidráulico. No entanto, os níveis de demanda química de oxigênio residual e metais não cumpriram com os exigidos pela legislação específica sobre esses insumos, logo, fica claro que a recuperação dos mesmos não pode atender com segurança os requisitos desta função, em um nível prático de eficiência de recuperação, apesar de reduzir potencialmente os custos líquidos com produtos químicos. Seria mais apropriado reutilizar coagulantes do sistema hidráulico no tratamento de águas residuais, onde o conteúdo orgânico é menos regulamentado.

Embora este conceito não seja novo, a economia do processo e as questões de qualidade do produto recuperado limitaram sua implementação. Diversas formas de recuperação vêm sendo pesquisadas recentemente, tais como: membranas seletivas de íons, diálise de Donnan, eletrodiálise e ultrafiltração. Keeley (2012) determinou que, de acordo com os preços de commodities e tecnologia, nenhuma das tecnologias avaliadas é atualmente capaz de oferecer benefício de custo para a recuperação do coagulante.

2.4 Nova alternativa tecnológica proposta

Segundo Perry (1997), dentre principais processos alternativos de conversão química que foram investigadas para a recuperação e conversão de resíduos sólidos, a pirólise merece especial atenção. O processo consiste no aquecimento da substância em uma atmosfera livre

de oxigênio podendo então haver a divisão, através de rachaduras térmicas e reações de condensação, em frações gasosas, líquidas e sólidas. A pirólise é um processo proposto para o tratamento e agregação de valor aos resíduos. Se trata da degradação térmica da biomassa sem a presença de oxigênio na atmosfera reativa, onde a biomassa é desvolatilizada e convertida em carvão (biochar), produtos líquidos e gases combustíveis (DHYANI; BHASKAR, 2018).

As três frações características resultantes da pirólise são: (1) uma corrente de gás contendo principalmente hidrogênio, metano, monóxido e dióxido de carbono, hidrocarbonetos leves e também compostos minoritários presentes na matéria-prima; (2) uma fração que consiste em um óleo líquido à temperatura ambiente; e (3) um carvão constituído por carbono quase puro juntamente com qualquer material inerte que possa ter entrado no processo (DHYANI; BHASKAR, 2018; PERRY *et al.*, 1997).

Diferentemente do processo de combustão, que é altamente exotérmico, o processo pirolítico envolve tanto reações endotérmicas quanto exotérmicas. Entretanto, dependendo do tipo de produto desejado, as condições de pirólise podem ser ajustadas. Segundo Dhyani e Bhaskar (2018) altas temperaturas e curtos tempos de residência favorecem a formação de produtos condensáveis, enquanto altas temperaturas e maiores tempos de residência favorecem a formação de produtos gasosos não condensáveis, devido à ocorrência de reações secundárias. Produtos sólidos são geralmente preferidos em baixas temperaturas.

A pirólise pode ser classificada como flash, rápida, intermediária, lenta, torrefação e outros. Para cada modo de pirólise existe um ou mais tipos de reator característicos que atendem à faixa de parâmetros desejada (RAYMUNDO, 2020).

A pirólise tem sido testada em inúmeras plantas-piloto e em muitos sistemas de demonstração operaram, porém poucos atingiram uso comercial. Os principais obstáculos encontrados foram a falta de mercado e os altos custos operacionais.

A maioria das operações de pirólise de carvão destinam-se à produção de coque metalúrgico (FILHO, 2014), sendo que uma grande fração do valor de aquecimento original do carvão permanece no carvão, que deve ser lucrativamente comercializado para viabilizar economicamente o processo de pirólise.

2.5 Carvão Ativado

O chamado tratamento convencional da água (composto por coagulação, floculação, decantação e filtração), mesmo complementado por oxidação, não é capaz de remover satisfatoriamente substâncias como: antimônio, bário, cromo (+6), cianeto, fluoreto, chumbo, mercúrio (inorgânico), níquel, nitrato, nitrito, selênio (+6), tálio, compostos orgânicos sintéticos, pesticidas e herbicidas, rádio, urânio, cloreto, sulfato e zinco (RIGODANZO *et al.*, 2019)

Carvão ativado granular é usado tradicionalmente como um adsorvente de contaminantes orgânicos hidrofóbicos presentes em baixas concentrações na água, tais como pesticidas e compostos causadores de gosto e odor. (WESTPHALEN; CORÇÃO; BENETTI, 2016)

Está sendo estudada, juntamente com os bolsistas de iniciação científica do LACIPII a separação do bio-óleo com destilação convencional, onde o produto de fundo poderia ser aplicado como um coque de origem renovável. Além disso, estão sendo desenvolvidas técnicas de ativação do biochar para produção de carvão ativado e catalisadores.

2.6 A isoterma de Adsorção de Langmuir

O modelo de adsorção de Langmuir prevê uma representação e uma expressão matemática simples do mecanismo de adsorção. Esta descreve sistemas adsorbato-adsorvente nos quais o grau de cobertura do adsorbato é limitado a uma monocamada molecular. A isoterma foi formulada com base no equilíbrio dinâmico entre a fase adsorvida e a fase fluida. Esta isoterma é a mais popular dentre as isotermas não lineares (MILDEMBERG, 2019).

Algumas considerações foram utilizadas para a determinação deste modelo:

- As moléculas são adsorvidas em sítios definidos na superfície do adsorvente e não podem migrar ao longo da superfície, permanecendo neles até a dessorção;
- Cada sítio acomoda somente uma molécula (monocamada);
- A área de cada sítio é uma quantidade fixa determinada somente pela geometria da superfície;
- A energia de adsorção é a mesma em todos os sítios, independentemente da cobertura (consequência das interações não laterais entre as moléculas de adsorbato);
- A adsorção é reversível.

O modelo de adsorção de Langmuir pode ser descrito pela Equação (1); após a linearização chega-se à Equação (2).

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (1)$$

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K_L q_m C_e} \quad (2)$$

Sendo:

- q_m e q_e – quantidades adsorvidas por grama de adsorvente máxima e no equilíbrio, respectivamente (mg.g^{-1});
- K_L – constante de adsorção de Langmuir (L.mg^{-1});
- C_e – concentração da solução no equilíbrio (mg.L^{-1}).

3 Materiais e Métodos

Foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema nas revistas acadêmicas científicas disponíveis na plataforma *Scopus*, buscando através das palavras-chave: *Sludge*, *Drinking Water* e *Pyrolysis*.

Posteriormente, foi feito um levantamento do volume da geração de lodo no Estado do Rio Grande do Sul, mais especificamente da Companhia Riograndense de Saneamento, CORSAN, a fim de que fosse possível estimar a quantidade de material disponível para a implementação de uma nova tecnologia no tratamento de um dos principais resíduos gerados nas ETAs, o lodo dos decantadores, em substituição à destinação em aterro sanitário.

Foram reunidas e comparadas as principais aplicações tecnológicas de destinação e reaproveitamento do resíduo gerado, analisando a viabilidade do emprego de uma aplicação tecnológica emergente, denominada Pirólise, em detrimento de outras tecnologias estudadas.

A pirólise promove a transformação das características físico-químicas dos resíduos e, no caso estudado, teria a vantagem de possivelmente produzir um material com características adsorventes ao qual poderíamos comparar ao desempenho do carvão ativado, tradicionalmente empregado.

Essa comparação se deu de forma teórica, baseando-se em valores encontrados na literatura do parâmetro q_m , da isoterma de Langmuir e, através dele, buscando estimar as quantidades necessárias do novo material adsorvente proposto que supostamente poderiam substituir ou complementar o papel realizado pelo carvão ativado comercial.

Foram realizadas algumas considerações para que essa comparação pudesse ser feita, tais como: linearidade dos dados com a variação da temperatura e, a consideração de que a razão entre os parâmetros q_m , buscados na literatura, sejam uma possível razão de proporcionalidade entre o desempenho dos dois materiais comparados.

Em seu estudo, o autor Nageeb Rashed et al. (2016), descreve apenas o valor obtido para o parâmetro de q_e (miligrama de adsorbato por grama de adsorvente empregado no equilíbrio), logo, fez-se necessária a utilização da isoterma de Langmuir e os dados obtidos em seu ensaio de adsorção para que fosse possível realizar uma comparação direta com o parâmetro de adsorção máxima, q_m , obtido por Mildemberg (2019).

Uma vez equiparados os dados extraídos da literatura, tanto em temperatura de realização do ensaio quanto no cálculo do parâmetro de adsorção máxima a partir do de adsorção no equilíbrio, foi possível calcular a razão entre os q_m obtidos, e, posteriormente, considerando as perdas de massa envolvidas no processo de pirólise, calcular as quantidades e valores teoricamente necessários para realizar a troca de um adsorvente por outro.

Os valores empregados na aquisição de carvão ativado nas ETAs foram extraídos do portal de licitações da CORSAN e utilizados em uma análise econômica hipotética dos valores que estariam disponíveis caso a substituição do insumo fresco pelo lodo pirolisado fosse possível, além da capacidade de volume a ser destinada com o potencial emprego dessa nova tecnologia.

4 Resultados

4.1 Estimativa da produção de lodo no Rio Grande do Sul

Katayama et al. (2015) testou a validade de fórmulas empíricas e do balanço de massa como ferramentas para o cálculo da real quantidade de lodo produzida em 6 ETAs localizadas no interior do estado de São Paulo. Verificou-se que correlações do volume de lodo produzido com a turbidez e a quantidade de sólidos suspensos na água bruta não proporcionam um bom ajuste dos dados experimentais.

Desta forma, para fins de base de cálculo, foram avaliados os volumes de lodo gerado pelas estações de tratamento de água gerenciadas pela CORSAN, disponíveis no Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul 2015 - 2034 (SEMA, 2014), que somam um total de 41.150 toneladas por ano, em base seca, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Estimativa de geração de lodo das ETAs, por mesorregião do Estado do Rio Grande do Sul, 2014

Mesorregião	Municípios com ETA	População 2014 (hab.)	Lodo de ETA t/ano (TS 2%)	Lodo de ETA t/ano (base seca)
Centro Ocidental Rio-grandense	14	398.582	46.034	921
Centro Oriental Rio-grandense	19	429.130	105.768	2.115
Metropolitana de Porto Alegre	52	3.962.955	1.205.111	24.102
Nordeste Rio-grandense	20	783.638	175.629	3.513
Noroeste Rio-grandense	56	969.363	242.805	4.856
Sudeste Rio-grandense	20	745.111	175.309	3.506
Sudoeste Rio-grandense	12	434.237	106.820	2.136
Rio Grande do Sul	193	7.723.015	2.057.477	41.150

Fonte: (PLANO ESTADUAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PERS) - SEMA - SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA, 2014)

4.2 Análise térmica do lodo de ETA

Segundo Soleha (2016), a perda de massa total observada para o lodo de estação de tratamento de água contendo alumínio foi de 12,5% para o material bruto e 9,1% para o material previamente tratado termicamente a 300°C.

As primeiras perdas de massa de matéria-prima ocorreram a 61 e 82,9°C, respectivamente, devido à eliminação de água entre as partículas. Na amostra bruta, uma outra perda de massa foi observada novamente a 257°C, provavelmente causada pela remoção de água dos hidróxidos e combustão de compostos orgânicos.

Outros dois eventos de perda de massa foram relatados a 484 e 516°C, respectivamente. Esses eventos são as principais áreas de reação e representam a eliminação da água estrutural da caulinita.

Ocorre também uma perda de peso constante na faixa de temperatura de 180-580 °C que ocorre possivelmente devido à dessorção do composto orgânico, reações de combustão e à decomposição do carbonato.

Nenhuma perda de massa observada para 800°C lodo tratado termicamente, exceto que uma pequena quantidade de água é removida a 99,9°C, o que indica que aquecimento em 800°C é suficiente para obter um lodo estável.

4.3 Análise Crítica das alternativas propostas para o Lodo de ETA

Através do estudo realizado sobre as diferentes formas de destinação do lodo gerado na etapa de coagulação do processo de tratamento de água para consumo humano, propõe-se a comparação das vantagens e desvantagens de cada um deles através da Tabela 4.

Tabela 4 - Um resumo das vantagens e desvantagens das diversas rotas potenciais para o descarte do lodo gerado nas ETAs (continua)

MERCADO POTENCIAL PARA USO FINAL	VANTAGENS	DESVANTAGENS	REFERÊNCIA
DESIDRATAÇÃO E DESTINAÇÃO EM ATERRO	<ul style="list-style-type: none"> • Conhecimento já sedimentado sobre sua aplicação; • Viabilidade econômica comprovada; • Adequação à legislação em vigor. 	<ul style="list-style-type: none"> • A instalação dessa tecnologia depende de condições climáticas favoráveis; • Necessita de área física disponível para os leitos de secagem; • Não propõe nenhuma forma de reuso ou reciclagem do resíduo gerado. 	(GUERRA, 2005)
DISPOSIÇÃO NO SOLO	<ul style="list-style-type: none"> • Promove a recuperação de áreas degradadas, com a inserção de macronutrientes e ajuste o pH; • Apresenta potencial para destinação de uma parcela elevada do lodo gerado; • Propõe uma forma de reaproveitamento do resíduo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessário um monitoramento dos contaminantes presentes no resíduo empregado; • Apresenta melhor resultado de for empregado conjuntamente com outro tipo de resíduo; • Os agentes coagulantes empregados podem ser uma fonte de contaminação ambiental. 	(TEIXEIRA; DE MELO; DA SILVA, 2005)
INCORPORAÇÃO EM MATERIAIS CERÂMICOS E TIJOLOS	<ul style="list-style-type: none"> • Evita a utilização desnecessária de novos recursos naturais e de energia; • Apresenta potencial para destinação de uma parcela elevada do lodo gerado; • O lodo pode ser utilizado como pigmento para tijolos; • Propõe uma forma de reaproveitamento do resíduo. 	<ul style="list-style-type: none"> • O lodo apresenta composições variáveis ao longo do ano, gerando produtos fora de especificação; • Existe um limite máximo de percentual máximo que pode ser incorporado sem afetar drasticamente as propriedades mecânicas do produto; 	(TEIXEIRA ET AL., 2011)

Tabela 4 - Um resumo das vantagens e desvantagens das diversas rotas potenciais para o descarte do lodo gerado nas ETAs (continuação)

MERCADO POTENCIAL PARA USO FINAL	VANTAGENS	DESVANTAGENS	REFERÊNCIAS
INCORPORAÇÃO EM CIMENTO E ARGAMASSAS	<ul style="list-style-type: none"> Houve uma melhora nas propriedades de cimentos e argamassas quando o lodo foi adicionado na composição em até 5% em massa; Apresenta potencial para destinação de uma parcela elevada do lodo gerado; Propõe uma forma de reaproveitamento do resíduo. 	<ul style="list-style-type: none"> Em incorporações com percentuais superiores, houve uma piora das propriedades; <p>Comparando o volume de lodo produzido e a capacidade de incorporação ainda há muita defasagem.</p>	(EL-DIDAMONY; KHALIL; HEIKAL, 2014)
RECICLO DO LODO APLICADO À REMOÇÃO DE CORANTES	<ul style="list-style-type: none"> Promove a redução de custos com reagentes frescos; Permite o aproveitamento máximo da capacidade de agente coagulante do reagente utilizado; Promoveu uma boa remoção (85%) de corantes hidrofóbicos; Propõe uma forma de reaproveitamento do resíduo. 	<ul style="list-style-type: none"> Embora reduza a demanda de reagente fresco, não dispensa a inserção do mesmo; Existe a possibilidade de dessorção de contaminantes previamente adsorvidos no lodo; Não promoveu remoção de corantes hidrofílicos, ou seja, não é adequado para misturas de diferentes corantes também. 	(CHU, 2001)
APLICAÇÃO DA RETIRADA DE POLUENTES EM ETES	<ul style="list-style-type: none"> Possibilita o aproveitamento dentro de um só empreendimento; Promove a economia de coagulante fresco; Propõe uma forma de reaproveitamento do resíduo. 	<ul style="list-style-type: none"> Não substitui completamente o coagulante fresco; Apresenta riscos à estabilidade do processo, uma vez que sua composição não é estável. 	(NAIR; AHAMMED, 2015)

Tabela 4 - Um resumo das vantagens e desvantagens das diversas rotas potenciais para o descarte do lodo gerado nas ETAs (continuação)

MERCADO POTENCIAL PARA USO FINAL	VANTAGENS	DESVANTAGENS	REFERÊNCIAS
ADSORVENTE DE METAIS (CD)	<ul style="list-style-type: none"> • Promove a substituição de um reagente de elevado valor comercial (carvão ativado); • Atua na remoção de metais, que são contaminantes de remoção complexa; • Apresentou bons resultados de remoção, sendo considerado uma alternativa viável; <p>Propõe uma forma de reaproveitamento do resíduo.</p>	<p>Foi testada a remoção do íon Cádmio em solução aquosa, porém o processo de dessorção de contaminantes presentes no lodo pode acontecer, fazendo com que esse método não seja adequado para o tratamento de águas, por exemplo.</p>	<p>(SISWOYO; MIHARA; TANAKA, 2014)</p>
PRODUÇÃO DE HIDRÓXIDO DE ALUMÍNIO	<ul style="list-style-type: none"> • Apresenta potencial solução de reciclagem do resíduo, onde parte dele retorna ao início do processo, como insumo para a formulação de agente coagulantes fresco; • Propõe uma forma de reaproveitamento do resíduo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os percentuais de recuperação foram baixos; • Foi identificada a contaminação do material recuperado por metais pesados; • A baixa recuperação alcançada não permite dizer que o processo proposto é economicamente viável. 	<p>(BARAKWAN ET AL., 2019)</p>
CONDICIONAMENTO POR PROCESSO DE OXIDAÇÃO AVANÇADA (FENTON E FOTO-SEMELHANTE)	<ul style="list-style-type: none"> • Potencialmente teria a capacidade de mineralizar completamente o resíduo, restando majoritariamente CO₂ e água; 	<ul style="list-style-type: none"> • O processo Fenton e Fenton-Semelhante promove a inserção de um íon possivelmente mais tóxico do que o resíduo que se deseja tratar, no caso, o Fe²⁺; • Os custos associados aos reagentes requeridos para o processo Fenton e Fenton-Semelhante ainda são elevados para aplicação em larga escala. 	<p>(TONY; ZHAO; TAYEB, 2009)</p>

Tabela 4 - Um resumo das vantagens e desvantagens das diversas rotas potenciais para o descarte do lodo gerado nas ETAs

(conclusão)

MERCADO POTENCIAL PARA USO FINAL	VANTAGENS	DESVANTAGENS	REFERÊNCIAS
RECUPERAÇÃO DE COAGULANTE POR LIXIVIAÇÃO ÁCIDA	<ul style="list-style-type: none"> • Reduz a demanda química de reagentes frescos; • Promove a redução da geração de resíduos; • Propõe uma forma de reaproveitamento do resíduo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ainda é um processo caro para aplicação em larga escala; • O coagulante recuperado ainda apresenta traços de contaminantes provenientes dos resíduos; • Os reagentes recuperados possuem restrição de uso, sendo empregados apenas para fins menos nobres. 	(KEELEY ET AL., 2014)
PIRÓLISE	<ul style="list-style-type: none"> • O reaproveitamento do resíduo tem potencial aplicação dentro do próprio processo; • Redução do consumo de adsorvente fresco; • Diminuição do volume de resíduo gerado; • Propõe uma forma de reaproveitamento do resíduo. 	<ul style="list-style-type: none"> • O processo ainda é caro para aplicação em larga escala; • O conhecimento sobre a aplicação do processo ainda não está bem sedimentado; • Possibilidade de introdução de instabilidades no processo; • Padrões de qualidade para a aplicação de insumo proveniente de recuperação de resíduos ainda são bastante restritas, principalmente no que se refere a produtos para consumo humano. 	(DHYANI; BHASKAR, 2018)

4.4 Comparações entre adsorventes: Nova proposta versus Tratamento Convencional em ETA.

Devido aos altos custos associados tanto ao consumo de carvão ativado, como adsorvente, quanto à destinação correta do lodo gerado, e também associado aos possíveis impactos ambientais gerados pelo descarte *in natura* de um resíduo potencialmente contaminante, é particularmente interessante que seja estudada uma alternativa que consiga promover tanto a redução de impactos quanto ser atrativo do ponto de vista econômico. Tal objetivo pode ser atingido através do processo de pirólise do lodo de ETA, de forma que possa ser utilizado como um novo adsorvente.

Neste trabalho, propõe-se um comparativo entre as características da adsorção de azul de metileno em carvão ativado (MILDEMBERG, 2019) e da adsorção de azul de metileno no novo adsorvente proposto (NAGEEB RASHED; EL-DAIM EL TAHER; FADLALLA, 2016).

Rashed et al. (2016) realizou experimentos com lodo coletado de 2 diferentes estações de tratamento de água e com 3 diferentes formas de ativação do biochar gerado na pirólise, com vistas a obter a maior remoção possível no ensaio de adsorção com azul de metileno. Para tanto, amostras de lodo foram obtidas dos tanques de sedimentação da ETA Gabal Takok na cidade de Aswan (que realiza apenas um tratamento simples da água e não utiliza nenhum reagente de alumínio como auxiliar de coagulação). Amostras referentes à essa ETA foram denominadas com MS e, por sua vez, as amostras denominadas de AS foram coletadas nas ETA Fatera na cidade de Kom Ombo, governadoria de Aswan, Egito.

Embora ao longo do presente trabalho não tenham sido realizados experimentos para a confirmação e reprodução dos resultados obtidos por Rashed et al. (2016), é importante citar a metodologia utilizada pelo autor, para uma melhor compreensão dos resultados por ele obtidos e das comparações realizadas.

As amostras de lodo foram inicialmente secas e trituradas e dois métodos (ativação física e química), separadamente e de forma combinada, foram testados no estudo para preparar os adsorventes.

O método de ativação física de AS e MS, onde ocorreu a pirólise lenta do material em temperaturas variando entre 400 a 900°C, sendo os produtos obtidos denominados AS ou MS juntamente com a temperatura da pirólise, por exemplo: AS400 e MS500.

O método combinado de ativação química e física de AS e MS foi realizado empregando ácido acético à diferentes concentrações, combinada à pirólise à 500°C, sendo os produtos nomeados como AS1 ou MS1 juntamente com a concentração do ácido empregada, por exemplo: AS1 (0,1 M AA) e MS1 (3M AA).

Já o método da ativação química de AS e MS foi realizado empregando ácido acético (AS2 e MS2) ou ácido nítrico (AS3 e MS3) à diferentes concentrações, sendo que os produtos obtidos foram nomeados como AS2 e MS2 juntamente com a concentração de ácido empregada, por exemplo: AS2 (0,1 M AA), MS2 (3M AA) e AS3 (0,25 M AN).

Os parâmetros de ajuste das isotermas de adsorção de azul de metileno nos adsorventes que apresentaram os melhores desempenhos em cada um dos métodos descritos estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros da Isoterma de Langmuir para adsorção de azul de metileno em lodo de ETA após ativação física (pirólise) ou química .

Modelo de Isoterma de Langmuir			
Adsorvente	q_e (mg.g ⁻¹)	b	R ²
AS1	70,4	0,024	0,997
AS2	65,79	0,027	0,999
AS3	45,87	0,057	0,996
AS700	68,97	0,025	0,999
MS1	64,1	0,029	0,996
MS2	64,52	0,028	0,997
MS3	64,52	0,028	0,997
MS700	65,79	0,027	0,998

Fonte: Adaptado de Nageeb Rashed et al. (2016)

Mildemberg (2019) objetivou desenvolver uma metodologia experimental para a obtenção de carvão ativado a partir do bagaço de malte por tratamento térmico e químico, com a finalidade de utilizá-lo na remoção de corantes de efluentes industriais, mais especificamente o corante azul de metileno, e por esse motivo, foi realizado um comparativo do adsorvente desenvolvido e o carvão ativado comercial, logo, os dados levantados nesse trabalho, para o carvão ativado comercial, são um importante ponto de partida a fim de realizar uma comparação entre o novo adsorvente proposto e a solução comercial atualmente empregada no tratamento de água para o consumo humano.

Os parâmetros de ajuste das isotermas de adsorção do azul de metileno em carvão ativado comercial estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros obtidos para o ajuste de diferentes modelos de isotermas de adsorção do azul de metileno em carvão ativado comercial, segundo Mildemberg (2019)

Temperatura (°C)		20	30
Langmuir	q_m (mg.g ⁻¹)	280,4	288,7
	K_L (L.mg ⁻¹)	1,0	1,1
	R ²	0,94	0,94
	SSR	1,06E-5	1,10E-5

Fonte: Adaptado de Mildemberg (2019)

Para que seja possível realizar uma comparação numérica entre o adsorvente comercialmente empregado, o carvão ativado, e o novo adsorvente proposto, foram consideradas as seguintes aproximações:

- O experimento de adsorção de Nageeb Rashed (2016) ocorre à 25°C e o experimento de Mildemberg (2019), ocorre a 20 e 30°C, mas foi considerado que seus pontos podem ser interpolados linearmente para a temperatura de 25°C;
- A razão entre os parâmetros “ q_m ” (quantidades adsorvidas por grama de adsorvente máxima) da Isoterma de Langmuir para os diferentes adsorventes é uma possível razão de proporcionalidade para a quantidade de adsorvente empregado no processo de tratamento de água para consumo humano.

Nageeb Rashed et al. (2016), obteve como valor do parâmetro de q_e , para o novo adsorvente proposto que passou apenas pelo método de ativação física (pirólise à 700°C), o valor de 68,97 mg.g⁻¹ (miligrama de adsorbato por grama de adsorvente empregado no equilíbrio), para que o valor obtido possa ser comparado com o de Mildemberg (2019), faz-se necessário o cálculo do parâmetro de adsorção máxima, q_m .

O percentual de remoção de azul de metileno atingido pelo lodo que contém hidróxido de alumínio (AS) citado em Nageeb Rashed et al. (2016), para a ativação apenas pelo método físico de pirólise à 700 °C (AS700), é de 75,7%. A partir desse valor e da concentração inicial de azul de metileno empregada (100 mg.L⁻¹), torna-se possível o cálculo do valor da concentração de azul de metileno no equilíbrio (C_e) através da Equação 3.

$$\%R = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (3)$$

Logo, a concentração atingida no equilíbrio foi de 24,3 mg.L⁻¹, com esse valor e o resultado obtido para o parâmetro q_e do adsorvente AS700, que foi de 68,97 mg.g⁻¹ torna-se possível calcular o parâmetro q_m , obtido pelo rearranjo da Isoterma de Langmuir (Equação 1), que pode ser observado na Equação 4.

$$q_m = \frac{(K_L C_e + 1) \times q_e}{K_L C_e} \quad (4)$$

O valor de 182,50 mg.g⁻¹ foi obtido para o parâmetro q_m para o par azul de metileno e adsorvente AS700 a 25°C.

Por outro lado, Mildemberg (2019), realizou experimentos a 20, 30 e 40°C, fazendo um ajuste linear desses dados e supondo que a interpolação linear entre esses valores seja válida, obtém-se um valor de 287,82 mg.g⁻¹ para o parâmetro q_m à temperatura de 25°C.

Calculando-se a razão entre o parâmetro q_m obtido para os diferentes adsorventes é possível ter-se uma estimativa da quantidade do novo adsorvente que poderia ser utilizada em substituição ao adsorvente convencional (carvão ativado). Para essa razão foi obtido um valor de 1,58, logo, infere-se que seriam necessários aproximadamente 1,58 vezes mais do novo adsorvente proposto para substituir o montante utilizado de carvão ativado atingindo as mesmas especificações desejadas no tratamento da água para consumo humano.

A partir desses resultados, buscou-se no portal de licitações e credenciamentos (TCE - RS, [s. d.]) o valor econômico atualmente empregado na aquisição do insumo carvão ativado pela CORSAN e na data de 27/09/2019 foram adquiridos 1.200 toneladas de carvão ativado em pó umectado para utilização nas estações de tratamento de água, no valor de R\$ 8.880.000,00 e posteriormente, em 11/03/2020 mais 1.050 toneladas dispendendo dessa vez um total de R\$ 7.602.000,00.

Sendo essas as duas únicas aquisições descritas no portal online, é possível assumir um valor médio, no qual a companhia gasta, semestralmente, aproximadamente 1.125 toneladas de carvão ativado, equivalente, em média, R\$ 8.240.000,00, na compra deste insumo especificamente.

1.125 toneladas semestralmente são o equivalente a 2.250 toneladas anualmente e R\$ 16.482.000,00. Considerando a produção anual de lodo descrita no PERS do estado do Rio Grande do Sul, a produção de lodo é de 41.150 toneladas anualmente e, levando em consideração a perda de massa de 12,5% de massa na ativação física (pirólise) descrita por Soleha (2016), seria possível produzir aproximadamente 36.006 toneladas do novo adsorvente proposto.

A necessidade teórica do novo adsorvente proposto é teoricamente 1,58 vezes maior que a atual demanda de carvão ativado, logo, aproximadamente 3.548 toneladas por ano, considerando dados de produção e consumo somente da Companhia Sul Riograndense de Saneamento, CORSAN.

Caso a tecnologia proposta seja empregada, ela será responsável por destinar aproximadamente 10 % de todo o lodo gerado pela CORSAN.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Apesar de a alternativa tecnológica proposta ser teoricamente possível, ainda necessita de embasamento experimental para que seja possível afirmar que é uma alternativa viável para a destinação do lodo gerado nas ETAs.

A revisão bibliográfica realizada possibilitou concluir que o processo de pirólise propõe uma forma de reaproveitamento do lodo gerado, o que é positivo e um diferencial em relação a outras soluções estudadas, possivelmente promovendo a economia de insumo fresco, mas possui também desvantagens, como o alto custo associado à instalação de uma nova tecnologia.

O processo descrito possui aparente viabilidade econômica, em vista do grande investimento realizado nas demais alternativas investigadas e na solução tradicionalmente empregada (descarte do lodo *in natura* nos mananciais e compra frequente de carvão ativado para o tratamento de micro contaminantes), além de proporcionar uma destinação mais adequada à um resíduo gerado em elevado volume e concentração, que hoje é uma fonte de poluição ambiental que impacta diretamente toda a cadeia de produção de água para consumo humano.

Em termos gerais, não seria possível que todo o lodo gerado tivesse uma única destinação, o volume gerado é elevado demais para que possa ser totalmente utilizado na pirólise e transformação em um possível novo adsorvente, mas a destinação de aproximadamente 10% do volume gerado seria um avanço importante no sentido de dar um fim correto ao resíduo gerado.

Sob o ponto de vista da necessidade de soluções complexas para desafios complexos, conclui-se que todas as alternativas tecnológicas propostas devem trabalhar concomitantemente a fim de destinar todo o volume produzido de maneira ambientalmente correta e atendendo não somente à legislação vigente, mas também um pensamento de longo prazo, preservando recursos naturais escassos e tão valiosos para as gerações futuras.

6 REFERÊNCIAS

ABNT, 2004. NBR 10004: resíduos sólidos: classificação. **Brazilian Association of Technical Standards**, [S. l.], 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1215/15476715-1540160>

ACHON, Cali Laguna; BARROSO, Marcelo Melo; CORDEIRO, Joao Sergio. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: Desafio do saneamento brasileiro. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 115–122, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000200003>. Acesso em: 16 set. 2020.

BARAKWAN, Rizkiy Amaliyah *et al.* Recovery of alum from Surabaya water treatment sludge using electrolysis with carbon-silver electrodes. **Journal of Ecological Engineering**, [S. l.], v. 20, n. 7, p. 126–133, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.12911/22998993/109861>

BRASIL. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. [S. l.: s. n.]. E-book. Disponível em: <https://doi.org/978-85-240-4135-8>

BRASIL. Lei nº 11.455. [S. l.], p. 20, 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm

BRASIL. Lei Nº 12.305 - Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, [S. l.], p. 1–21, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017 - Anexo XX. **DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO**, [S. l.], 2017. Disponível em: <https://doi.org/1677-7042>

BRASIL. **MANUAL de USOS CONSUNTIVOS da ÁGUA no BRASIL**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/36144/472854/Produto+6.pdf>. Acesso em: 15 set. 2020.

CHIANG, Kung Yuh *et al.* Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks. **Journal of Hazardous Materials**, [S. l.], v. 171, n. 1–3, p. 76–82, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.144>

CHU, W. Dye removal from textile dye wastewater using recycled alum sludge. **Water Research**, [S. l.], v. 35, n. 13, p. 3147–3152, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00015-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00015-X)

CONAMA. Resolução n 357, 18 de março de 2005. **Diário Oficial**, [S. l.], 2005.

DANDOLINI, Ivana. Reciclagem do lodo de estação de tratamento de água - produção de coagulante por lixiviação ácida. [S. l.], p. 1–74, 2014.

DHYANI, Vaibhav; BHASKAR, Thallada. A comprehensive review on the pyrolysis of

lignocellulosic biomass. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 129, p. 695–716, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.035>. Acesso em: 26 out. 2020.

EL-DIDAMONY, H.; KHALIL, Kh. A.; HEIKAL, Mohamed. Physico-chemical and surface characteristics of some granulated slag-fired drinking water sludge composite cement pastes. **HBRC Journal**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 73–81, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2013.09.004>

FILHO, Artur Tôres. **Aplicação do processo de pirólise para valoração, cogeração de energia e tratamento de resíduos**. Belo Horizonte: [s. n.], 2014.

FUNASA. **MANUAL DE CONTROLE DA QUALIDADE DA ÁGUA PARA TÉCNICOS QUE TRABALHAM EM ETAS FUNASA FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE**. 1ª edição ed. Brasília: [s. n.], 2014. *E-book*. Disponível em: http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/manualcont_quali_agua_tecnicos_trab_emetas.pdf. Acesso em: 24 nov. 2020.

GUAN, Xiao Hong; CHEN, Guang Hao; SHANG, Chii. Re-use of water treatment works sludge to enhance particulate pollutant removal from sewage. **Water Research**, [S. l.], v. 39, n. 15, p. 3433–3440, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.07.033>

GUERRA, Ricardo. Caracterização e biodegradação de lodo de estações de tratamento de água para descarte em aterro sanitário. **Aleph**, [S. l.], 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - 2018**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2020. *E-book*. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101734.pdf>. Acesso em: 15 set. 2020.

KATAYAMA, Victor Takazi *et al.* Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: Uma análise crítica. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S. l.], v. 20, n. 4, p. 559–569, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020040105046>. Acesso em: 14 out. 2020.

KEELEY, J.; JARVIS, P.; JUDD, S. J. An economic assessment of coagulant recovery from water treatment residuals. **Desalination**, [S. l.], v. 287, p. 132–137, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.09.013>

KEELEY, James *et al.* Reuse of recovered coagulants in water treatment: An investigation on the effect coagulant purity has on treatment performance. **Separation and Purification Technology**, [S. l.], v. 131, p. 69–78, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.04.033>

MILDEMBERG, Adrielly Nasario, 1990-. **ADRIELLY NASARIO MILDEMBERG**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/58998>. Acesso em: 3 out. 2020.

NAGEEB RASHED, M.; EL-DAIM EL TAHER, M. A.; FADLALLA, Somaya M. M. Adsorption of methylene blue using modified adsorbents from drinking water treatment sludge. **Water Science and Technology**, [S. l.], v. 74, n. 8, p. 1885–1898, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wst.2016.377>

NAIR, Abhilash T.; AHAMMED, M. Mansoor. The reuse of water treatment sludge as a coagulant for post-treatment of UASB reactor treating urban wastewater. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 96, p. 272–281, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.037>

PERRY, R. H. P. *et al.* **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. [S. l.]: McGraw-Hill, 1997. (International student edition). *E-book*. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=n8B7QgAACAAJ>

Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS) - Sema - Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. . [S. l.], 2014. Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/plano-estadual-de-residuos-solidos>. Acesso em: 14 out. 2020.

RAYMUNDO, Lucas Manique. **DESENVOLVIMENTO DO PROCESSAMENTO POR PIRÓLISE RÁPIDA DE CASCA DE ARROZ E RESÍDUOS LIGNO-CELULÓSICOS**. 2020. - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, [S. l.], 2020.

RIGODANZO, Gustavo Henrique *et al.* **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil**. Brasília: [S. n.], 2019. *E-book*. Disponível em: www.ana.gov.br. Acesso em: 15 set. 2020.

SAÚDE, Ministério da. **Boas Práticas No Abastecimento De Água** : [S. l.: s. n.]. *E-book*.

SISWOYO, Eko; MIHARA, Yoshihiro; TANAKA, Shunitz. Determination of key components and adsorption capacity of a low cost adsorbent based on sludge of drinking water treatment plant to adsorb cadmium ion in water. **Applied Clay Science**, [S. l.], v. 97–98, p. 146–152, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.05.024>

SOLEHA, Mohamat Yusuff *et al.* Characterization of raw and thermally treated alum sludge. *In*: 2016, **Key Engineering Materials**. : Trans Tech Publications Ltd, 2016. p. 138–142. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.701.138>

TCE - RS. **LicitaCon Cidadão**. [S. l.], [S. d.]. Disponível em: http://www1.tce.rs.gov.br/aplicprod/f?p=50500:11:::NO:11,RIR:F50500_CD_ORGAO:8700&cs=1lk2af-GSrs2eyOPe9CyhE7XKD64. Acesso em: 21 out. 2020.

TEIXEIRA, S. R. *et al.* The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. **Applied Clay Science**, [S. l.], v. 53, n. 4, p. 561–565, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.05.004>

TEIXEIRA, Sandra Tereza; DE MELO, Wanderley José; DA SILVA, Érica Tome. Application of water treatment sludge in degraded soil. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, [S. l.], v. 40, n. 1, p. 91–94, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2005000100013>. Acesso em: 13 set. 2020.

TONY, Maha A.; ZHAO, Y. Q.; TAYEB, Aghareed M. Exploitation of Fenton and Fenton-like reagents as alternative conditioners for alum sludge conditioning. **Journal of Environmental Sciences**, [S. l.], v. 21, n. 1, p. 101–105, 2009. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60018-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60018-8)

WESTPHALEN, Ana Paula Campos; CORÇÃO, Gertrudes; BENETTI, Antônio Domingues. Utilização de carvão ativado biológico para o tratamento de água para consumo humano. [S. l.], 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016143108>. Acesso em: 16 set. 2020.