



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Fernanda Borges

Revisão sistemática de tecnologias de tratamento do concentrado oriundo dos processos de separação por membranas aplicados ao tratamento de lixiviado de resíduos sólidos urbanos

Rio de Janeiro

2021

Fernanda Borges

Revisão sistemática de tecnologias de tratamento do concentrado oriundo dos processos de separação por membranas aplicados ao tratamento de lixiviado de resíduos sólidos urbanos

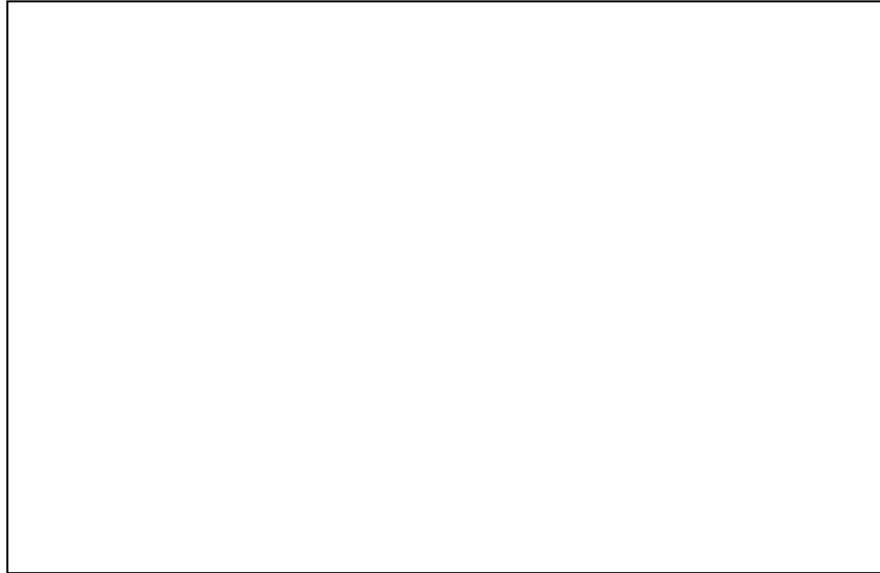
Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientador (a): Prof.^a Dra. Daniele Maia Bila

Rio de Janeiro

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B



Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta monografia.

Assinatura

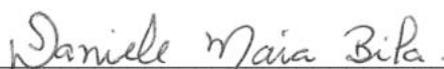
Data

Revisão sistemática de tecnologias de tratamento do concentrado oriundo dos processos de separação por membranas aplicados ao tratamento de lixiviado de resíduos sólidos urbanos

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Aprovada em 13 de outubro de 2021.

Banca Examinadora:



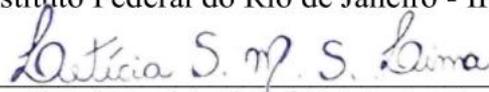
Prof.^a Dr.^a. Daniele Maia Bila (Orientadora)
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ



Prof.^a Dr.^a. Juacyara Carbonelli Campos
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ



Prof.^a Dr.^a. Simone Maria Ribas Vendramel
Instituto Federal do Rio de Janeiro - IFRJ



Prof.^a Dr.^a. Letícia Sobral Maia dos Santos Lima
Centro Universitário Carioca - UNICARIOCA

Rio de Janeiro

2021

RESUMO

FERREIRA, F. B. A. *Revisão sistemática de tecnologias de tratamento do concentrado oriundo dos processos de separação por membranas aplicados ao tratamento de lixiviado de resíduos sólidos urbanos*. 2021. 76f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2021.

Representando um volume residual cerca de 20% a 30% do lixiviado bruto, o concentrado de membrana (CM) é um resíduo inevitável do processo de separação por membranas (PSM) e apresenta características físico-químicas que tornam a sua tratabilidade um desafio ainda maior em comparação ao lixiviado, contendo uma maior concentração de matéria orgânica recalcitrante, maior salinidade e menor biodegradabilidade. Utilizando-se a revisão sistemática como metodologia de pesquisa, este trabalho teve como objetivo investigar os diferentes processos empregados no tratamento do concentrado oriundo dos PSM utilizados no tratamento de lixiviados de resíduos sólidos urbanos. Empregando, na plataforma de busca *Web of Science*, as palavras chave “landfill leachate concentrated” and “treatment” e o comando de busca “TS” foram encontrados inicialmente 314 artigos elegíveis e de acordo com os critérios de elegibilidade definidos, 44 foram lidos e categorizados por ano, país, revista de publicação e de acordo com a tecnologia de tratamento aplicada ao CM (coagulação química, ozonização, oxidação química a base de sulfato, Fenton, Foto Fenton, processos eletroquímicos e processos híbridos). Foram avaliadas as publicações no período de 2010 a março de 2021, tendo sido observado um crescente aumento das publicações no decorrer dos últimos 5 anos, sendo o ano de 2020 o de maior produção científica com 13 artigos. A maior parte dos artigos (67%) abordaram o tratamento do CM proveniente do processo de separação por nanofiltração. O processo Foto Fenton foi o processo que obteve a melhor média de redução de DQO (81%) enquanto o processo de ozonização apresentou a pior média de redução de DQO (66,47%).

Palavras-chave: concentrado de membrana, tratamento, revisão sistemática, aterro sanitário, redução DQO

ABSTRACT

FERREIRA, F. B. A. *Systematic review of concentrate treatment technologies from membrane separation processes applied to the treatment of urban solid waste leachate*. 2021. 76f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2021.

Representing a residual volume of about 20% to 30% of the raw leachate, membrane concentrate (CM) is an unavoidable residue of the membrane separation process (PSM) and has physicochemical characteristics that make its treatability an even greater challenge. Compared to leachate, it contains a higher concentration of recalcitrant organic matter, higher salinity, and lower biodegradability. Using the systematic review as a research methodology, this work aims to investigate the different processes used in the treatment of concentrate from PSM used in the treatment of leachate from urban solid waste. Using the Web of Science search platform, 314 eligible articles were initially found, of which 44 were read and categorized by year, country, journal of publication and according to the treatment technologies given to the CM (chemical coagulation, ozonization, chemical oxidation sulphate-based, Fenton, Photo Fenton, electrochemical processes, and hybrid processes. Publications from 2010 to 2021* (*until March) were evaluated, with a growing increase in publications over the last 5 years, with 2020 being the year with the highest scientific production with 13 articles. Most of the articles (67%) carried out the treatment of the CM from the separation process by nanofiltration. The photo fenton process was the process that obtained the best average of COD removal (81%) while the ozonation process had the worst average of COD removal (66.47%).

Key words: membrane concentrate, treatment, systematic review, landfill, COD removal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resumo das fases da decomposição dos RSU em aterros sanitários.....	19
Figura 2 - Representação esquemática da seletividade da membrana	24
Figura 3 - Tipos de revisões de literatura	26
Figura 4 - Possibilidades metodológicas da revisão sistemática	27
Figura 5 – Fases de uma Revisão Sistemática	29
Figura 6 -Fluxograma da seleção dos estudos da revisão sistemática.....	38
Figura 7 - Artigos selecionados na RS divididos por ano de publicação	42
Figura 9 - Artigos selecionados divididos por revista de publicação.....	44
Figura 10 - Tipos de processos de separação por membranas empregados	45
Figura 11 - – Número de artigos por tecnologia de tratamento do CM	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados obtidos pelo processo híbrido realizado por Tang et al. (2020).....	48
Tabela 2 – Faixa de redução e redução média de DQO por tecnologia de tratamento	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Métodos de construção da pergunta da revisão sistemática	30
Quadro 2 – Definição da pergunta da Revisão Sistemática	34
Quadro 3- Critérios de elegibilidade	35
Quadro 4 - Protocolo de Busca	37
Quadro 5 - Critérios de Elegibilidade	39
Quadro 6 - Referências divididas por tipo de processo de separação por membranas	46
Quadro 7 - Vantagens e desvantagens de cada processo de tratamento do CM.....	50

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
1. OBJETIVOS	14
1.1 Objetivo Geral.....	14
1.2 Objetivos Específicos	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	15
2.2 Aterro Sanitário: Forma de Disposição Final dos resíduos sólidos urbanos.	16
2.3 Subprodutos da Degradação dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários	17
2.3.1 Lixiviado de Aterro Sanitário	19
2.4 Tecnologias de tratamento de lixiviado.....	21
2.4.1 Processo de separação por membranas (PSM)	23
2.5 Processos de Tratamento do CM	25
2.6 Revisão Sistemática (RS).....	26
2.6.1 Definição da pergunta.....	30
2.6.2 Definição da estratégia de busca	31
2.6.3 Protocolo de Revisão (Critérios de Elegibilidade).....	31
2.6.4 Seleção dos estudos	32
2.6.5 Seleção dos dados dos estudos primários	32
2.6.6 Análise e interpretação dos resultados	32
2.6.7 Síntese dos Dados	32
3. METODOLOGIA.....	34
3.1 Delineamento do estudo	34
3.2 Estratégia de Busca e seleção dos artigos	34
3.3 Extração de Dados	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 Resultados da Revisão Sistemática.....	37
4.1.1 Estratégia de busca e seleção dos artigos	37
4.1.2 Critérios de Elegibilidade	39
4.1.3 Extração de Dados	41

4.2 Resultados da análise dos artigos	44
Tipo de processo de separação por membrana empregado.....	45
Tecnologias de Tratamento do CM	46
Percentual de redução médio de DQO por tecnologia de tratamento dos artigos selecionados	48
Vantagens e desvantagens dos processos de tratamento do CM de PSM.....	50
5. CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS	54
APÊNDICE A	69
APÊNDICE B	74
APÊNDICE B (cont.)	75

INTRODUÇÃO

Os resíduos sólidos têm a sua importância denotada desde o início da civilização seja pelos tratamentos dados aos excrementos, aos restos de produção agrícola ou, até mesmo, aos pós uso dos próprios objetos (VELLOSO, 2007).

O gerenciamento dos resíduos sólidos é uma complexa atividade que engloba diferentes áreas do conhecimento envolvendo procedimentos administrativos, financeiros, legais, de planejamento e de engenharia com o intuito de gerar um conjunto de ações que vai desde a coleta, transporte, transbordo, tratamento até a destinação final (ZANTA & FERREIRA, 2003; TCHOBANOGLIOUS & KEITH, 2002).

Atualmente, os aterros sanitários (AS) têm se tornado a principal forma ambientalmente correta de disposição final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) dos países em desenvolvimento. Os AS são considerados como obras de engenharia, sendo assim, devem ter sua execução corretamente planejada a fim de minimizar os impactos socioambientais. Tecnologias de sistemas de coleta de gás e de lixiviado, monitoramento de solo e até mesmo a escolha do terreno são exemplos de algumas ferramentas para a redução do impacto negativo que é gerado a partir da construção de um AS.

Sendo o lixiviado um subproduto inevitável deste tipo de disposição final, oriundo do processo natural de degradação dos RSU em AS, este efluente necessita de tratamento adequado para a sua disposição final (TCHOBANOGLIOUS et al. 2002).

Por se tratar de um líquido escuro, com elevada toxicidade, de odor desagradável, grande variação da sua composição além de altas concentrações de matéria orgânicas e inorgânicas, o lixiviado tem difícil tratabilidade sendo considerado um dos maiores desafios da atualidade na gestão do AS (SILVA, 2012).

Diferentes tecnologias de tratamento de lixiviado foram desenvolvidas ao longo dos anos. Inicialmente empregava-se ao lixiviado as mesmas técnicas de tratamento usadas em esgotos domésticos ou até mesmo a combinação do lixiviado ao esgoto (SANTOS, 2010). O principal objetivo dos tratamentos biológicos aplicados ao lixiviado é a remoção ou redução da concentração de compostos orgânicos ou inorgânicos, a fim de minimizar as altas cargas desses elementos (SINGH et al., 2012). Com o avanço das pesquisas, tecnologias envolvendo processos físico-

químicos foram implantados se tornando uma alternativa viável para a remoção destas substâncias persistentes e recalcitrantes (OZTURK et al., 2003).

Dentre as tendências atuais no tratamento de lixiviado destacam-se os processos oxidativos avançados (POA) e os processos de separação por membranas (PSM) que são eficientes na remoção das substâncias químicas recalcitrantes de efluentes (LAK et al. 2012; ZHANG et al. 2013; MOHAMMAD et al. 2015; WU et al. 2020; WANG et al. 2020).

Os PSM caracterizam-se pela utilização de membranas sintéticas baseando-se na permeabilidade seletiva para a separação em duas correntes de composição distintas (permeado e concentrado). Esta membrana funciona como uma barreira que restringe, sob a ação de uma força motriz, total ou parcialmente, o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes nestas fases.

O concentrado de membrana (CM) representa um volume residual de cerca de 20% a 30% do lixiviado original com características físico-químicas que tornam a sua tratabilidade um desafio ainda maior em comparação ao lixiviado, contendo uma maior concentração de matéria orgânica recalcitrante, maior salinidade e menor biodegradabilidade quando comparado ao efluente bruto (BRUGGEN, 2003; ZHANG, 2009).

Diante do exposto, este trabalho visa realizar por meio de uma revisão sistemática da literatura uma análise dos trabalhos científicos que abordem as diferentes tecnologias e processos empregados no tratamento do concentrado oriundo dos PSM utilizados no tratamento de lixiviados de resíduos sólidos urbanos.

A relevância do estudo se caracteriza na elaboração da síntese do conhecimento sobre o tratamento do concentrado PSM, possibilitando assim, uma diretriz que auxilie na tomada de decisão por parte dos responsáveis pela operação dos aterros ou pelos pesquisadores na escolha de qual tecnologia aplicar no tratamento do concentrado de lixiviado proveniente do processo de separação por membranas.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo Geral

Investigar, a partir de uma revisão sistemática, os diferentes processos empregados no tratamento do concentrado oriundo dos processos de separação por membranas utilizados no tratamento de lixiviados de resíduos sólidos urbanos.

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar os processos empregados no tratamento do concentrado dos PSM oriundo do tratamento de lixiviado;
- Sintetizar os resultados de estudos primários utilizando as estratégias da revisão sistemática como ferramenta;
- Analisar a evolução da produção científica sobre a temática no período compreendido entre 2010 e março de 2021;
- Comparar as eficiências de redução de DQO nos processos de tratamento do concentrado de PSM;
- Identificar as vantagens e desvantagens de cada processo de tratamento do concentrado de PSM.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

Desde os primórdios da civilização, a sociedade humana através da sua capacidade e vocação de transformação do meio natural, tem o resíduo como foco obrigatório de atenções. Inicialmente, os resíduos gerados eram fundamentalmente excrementos. Em seguida, com o início das atividades agrícolas e da produção de ferramentas de trabalho e de armas, surgiram os restos de produção e os próprios objetos, após sua utilização (NAGALLI, 2014).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) – NBR 10004 (2004) define resíduos sólidos como:

“... todos aqueles resíduos nos estados sólidos e semissólidos que resultam das atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas e de serviço de varrição. Incluem-se também os lodos das Estações de Tratamento de Água - ETA's e Estações de Tratamento de Efluentes - ETE's, os resíduos gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição e determinados líquidos, cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face de melhor tecnologia disponível.” (ABNT, 2004)

Os resíduos podem ser classificados quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. A classificação dos resíduos sólidos gerados em uma determinada atividade é o primeiro passo para estruturar um plano de gestão adequado. A partir da classificação serão definidas as etapas de coleta, armazenagem, transporte, manipulação e destinação final, de acordo com cada tipo de resíduo gerado (ABNT, 2004).

Segundo o Programa das Nações Unidas para o meio ambiente (UNEP) e a Associação Internacional de Resíduos Sólidos (ISWA), por meio do relatório global de gestão de resíduos o total de geração de resíduos sólidos global é cerca de 7 a 10 bilhões de toneladas por ano, sendo que os RSU respondem por cerca de 30% deste total (WILSON et al., 2015).

No Brasil, de acordo com o relatório da Associação Brasileira de Limpeza Urbana e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2020), entre 2010 e 2019, houve um aumento de aproximadamente 17% na geração de RSU e de 4% na cobertura de coleta. Isto é, 79 milhões t/ano de resíduos são gerados dos quais 72,7 milhões t/ano são coletados.

Do percentual de RSU coletados, 59,5%, ou seja, 43,3 milhões de toneladas tiveram como destinação final os aterros sanitários, 23% para aterros controlados e 17,5% para lixões. A principal componente da gravimetria nacional dos RSU é a fração orgânica, com 45,3%. Os resíduos recicláveis secos somam 35%, sendo compostos principalmente pelos plásticos (16,8%), papel e papelão (10,4%), além dos vidros (2,7%), metais (2,3%), e embalagens multicamadas (1,4%). Os rejeitos, por sua vez, correspondem a 14,1%. Quanto às demais frações, temos os resíduos têxteis, couros e borrachas, com 5,6%, e outros resíduos, também com 1,4%, os quais contemplam diversos materiais teoricamente objetos de logística reversa (ABRELPE, 2020).

2.2 Aterro Sanitário: Forma de Disposição Final dos resíduos sólidos urbanos

A NBR 8419 (ABNT, 1992) conceitua aterro como uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais. Método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

De acordo com os diferentes conceitos, o AS pode ser descrito em geral como um sistema de diferentes barreiras, cada uma delas com o objetivo de reduzir a carga de contaminantes no meio ambiente (COSSU, 2018).

A utilização do AS como método para a disposição final de resíduos apresenta vantagens econômicas, evita danos ambientais e outras inconveniências e permite a decomposição dos resíduos sob condições controladas. Em contrapartida, Costa et al. (2013) descrevem como desvantagens na utilização do AS a geração de odores característicos, a possibilidade de exposição e riscos aos trabalhadores, a necessidade de grandes áreas para o empreendimento e ainda a resistência por parte da comunidade do entorno, fenômeno internacionalmente conhecido como *Not in My Back Yard* (NINBY), ou seja, “não no meu quintal”.

Os aterros sanitários apresentam tecnologias de operação que visam a proteção da saúde humana e do meio ambiente através de sistemas de controle de gás, de coleta e tratamento de lixiviado, monitoramento do solo e utilização de critérios técnicos para a escolha de área de instalação.

Para Laner *et al.* (2012), a gestão do aterro é constituída por seis etapas até o momento da sua conclusão, sendo elas: construção do aterro, disposição dos resíduos, fim da disposição, cobertura final, cuidados pós fechamento, acompanhamento e fim dos cuidados. Ou seja, a gestão do aterro pode ser dividida em duas fases: uma ativa, que vem desde o planejamento até o fechamento das células; e uma passiva, que comumente é mais longa que a ativa e compreende desde a cobertura final, cuidados pós fechamento até a vigilância.

A NBR 13.896 (ABNT, 1997) recomenda que após o encerramento total do aterro há diversas atividades relacionadas principalmente ao monitoramento e manutenção do aterro deverão ser executadas, tais como: monitoramento das águas subterrâneas por um período de vinte anos, manutenção dos sistemas de drenagem e de detecção de vazamento dos lixiviados até o término de sua geração, manutenção do sistema de tratamento dos lixiviados até o término de sua geração ou até que esses líquidos atendam os padrões legais de emissão exigidos.

2.3 Subprodutos da Degradação dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários

Os AS funcionam como um reator bioquímico, onde os principais componentes de entrada e alimentação são os resíduos sólidos e a água de chuva, e como principais elementos de saída o biogás e o lixiviado gerados a partir da degradação destes resíduos, permanecendo armazenado dentro do AS a matéria orgânica parcialmente biodegradada e os materiais inorgânicos dispostos inicialmente (CASTILHOS & REICHERT, 2007).

A degradação dos compostos orgânicos e inorgânicos constituintes dos RSU é definida como um fenômeno de superposição de mecanismos biológicos e físico químicos, onde organismos decompositores (bactérias, arqueias metanogênicas, fungos e protozoários) atuam, catalisados pelo fator água, convertendo os resíduos sólidos em substâncias mais estáveis (FIORE, 2004; LOPEZ, 2005).

A atividade microbiana destes organismos é condicionada por diversos parâmetros ambientais. Dentre eles destacam-se a umidade (proveniente da pluviosidade) e a temperatura. (TCHOBANOGLOUS *et al.*, 1993). Outros parâmetros como gravimetria dos RSU, extensão e disposição no aterro, características físicas

(densidade, porosidade) e pH do meio, revelam-se elementos importantes para as cinéticas de degradação (RUSSO, 2005).

Como resultado da degradação dos compostos orgânicos e inorgânicos, a matéria disposta no AS na forma sólida é transformada em gases (CH_4 , CO_2 , NH_3 , entre outros) e lixiviados (KJELDSEN et al. 2002).

Pohland e Harper (1986) definem cinco fases distintas da decomposição dos RSU em AS e estão resumidas em:

✓ **Fase I - Ajuste inicial:** Disposição inicial dos resíduos e acúmulo de umidade preliminar. Presença de microrganismos aeróbios e facultativos, com atividade exotérmica, que geram um aumento da temperatura na massa sólida através do consumo do oxigênio e da produção de produção de (CO_2). Fase de curta duração (somente alguns dias) devido ao rápido consumo do oxigênio disponível.

✓ **Fase II - Fase de transição:** Nesta fase microrganismos anaeróbios passam a comandar o processo de degradação devido a redução da disponibilidade de oxigênio. A capacidade de campo (o limite máximo que um resíduo pode reter umidade) é alcançada dando-se o início da formação do gás e dos lixiviados. Aceptor de elétrons passa de oxigênio para nitratos e sulfatos. Formação inicial de metabólitos intermediários tais como: ácidos graxos voláteis (AGV).

✓ **Fase III - Fase de formação de ácidos:** Devido à hidrólise da matéria orgânica, os AGV tornam-se predominantes (cerca de 95% do carbono orgânico total COT), havendo a diminuição do pH (em torno de 5). Por ser composta principalmente de ácidos orgânicos solúveis, tais como AGV, aminoácidos e outros compostos de baixo peso molecular e gases, como H_2 e CO_2 esta fase apresenta como característica altos valores de concentração de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e da razão de biodegradabilidade DBO/DQO (entre 0,4 e 0,7), o que indica a presença de elevadas quantidades de matéria orgânica biodegradável, assim como aumento da mobilidade das espécies iônicas. Ocorre a liberação dos nutrientes nitrogênio (N) e fósforo (P) e o aparecimento do gás hidrogênio que afetará na natureza e no tipo de compostos que estão sendo formados.

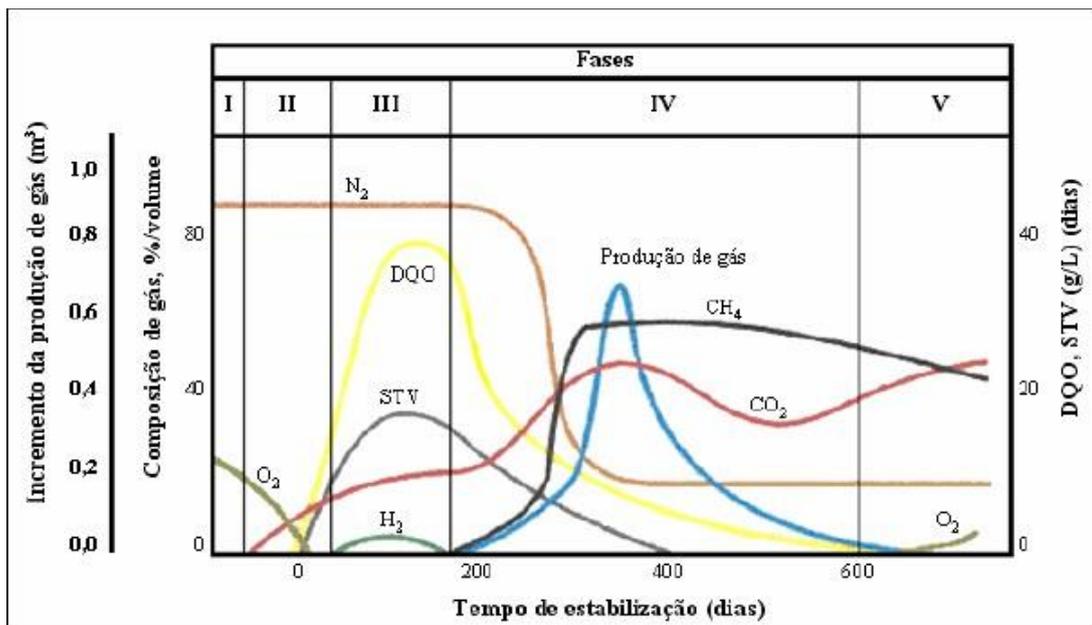
✓ **Fase IV -Fase inicialmente metanogênica:** É a mais ativa biologicamente, ocorre a elevação do pH (devido ao consumo de substâncias ácidas), os produtos intermediários que aparecem na fase ácida são convertidos em CH_4 e CO_2 . Devido ao consumo das substâncias mais facilmente biodegradáveis (por

exemplo, os ácidos carboxílicos), as concentrações de matéria orgânica (medidas em DQO e de DBO) e a razão DBO/DQO diminuem. Esta fase é caracterizada pelo baixo potencial de oxirredução devido as baixas concentrações de nitrato e sulfato.

✓ **Fase V - Fase de maturação final:** Também chamada de fase metanogênica de estabilização. Nesta fase, o gás produzido é constituído em sua maior parte de CH_4 e CO_2 . Há a diminuição dos compostos facilmente biodegradáveis fazendo com que a matéria orgânica do lixiviado torne-se predominantemente constituída por compostos recalcitrantes (TCHOBANOGLIOUS et al. 1993). A matéria orgânica resistente a biodegradação forma moléculas complexas de alta massa molar, tais como ácidos húmicos e fúlvicos, apresenta valores DBO/DQO próximos de 0,1.

A Figura 1 demonstra o resumo das fases da decomposição dos resíduos sólidos urbanos nos aterros sanitários.

Figura 1 – Resumo das fases da decomposição dos RSU em aterros sanitários



Fonte: adaptado de Pohland and Harper (1986)

2.3.1 Lixiviado de Aterro Sanitário

O lixiviado é definido como um líquido proveniente da umidade natural, da água de constituição da matéria orgânica dos resíduos, da degradação biológica dos materiais orgânicos e da água de infiltração na camada de cobertura, somado a materiais dissolvidos ou suspensos extraídos da massa de resíduos. É um líquido

escuro, de odor desagradável, contendo altas concentrações de matéria orgânicas e inorgânicas (LANGE et al. 2009).

Os fatores que interferem na composição físico química do lixiviado podem ser divididos em quatro grupos, segundo El Fadel et al. (2002):

- a) Características do RSU: composição granulométrica, umidade, idade do resíduo, pré-tratamento;
- b) Condições ambientais e variações climáticas: geologia, pluviometria, temperatura, clima;
- c) Características do aterro: aspectos construtivos, balanço hídrico, grau de compactação dos resíduos, propriedades do terreno, recirculação, idade e fase de decomposição do aterro, impermeabilização do aterro;
- d) Processos internos do aterro: grau de estabilização, hidrólises, adsorção, biodegradação, especiação, dissolução, diluição, redução, troca iônica, tempo de contato, partição, geração e transporte de gás.

Embora as práticas de gerenciamento de resíduos tenham avançado, a geração e o tratamento do lixiviado continuam sendo uma das questões mais importantes associadas à gestão de aterros sanitários. Percolando pelos resíduos sólidos, o lixiviado transporta uma variedade de produtos químicos contendo poluentes orgânicos e inorgânicos que devem ser tratados a fim de reduzir seu impacto sobre o solo e águas superficial e subterrânea (MAHMUD et al. 2012; BHATT, 2017).

Desse modo, a efetiva remoção destes poluentes faz-se necessária a fim de atender aos parâmetros de lançamento de efluentes em águas receptoras (BRASIL, 2005).

Kjeldsen et al. (2002) dividem os poluentes presentes nos lixiviados de AS de RSU em quatro grupos:

✓ Matéria orgânica dissolvida, quantificado como Demanda Química de Oxigênio (DQO) ou Carbono Orgânico Total (COT), ácidos graxos voláteis (que se acumulam durante a fase ácida do processo de estabilização de resíduos), e compostos mais refratários, tais como compostos fúlvicos e húmicos;

✓ Macrocomponentes inorgânicos: cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+), amônio (NH_4^+), ferro (Fe^{2+}), manganês (Mn^{2+}), cloreto (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}) e hidrogenocarbonato (HCO_3^-).

✓ Metais pesados: cádmio (Cd^{2+}), cromo (Cr^{3+}), cobre (Cu^{2+}), chumbo (Pb^{2+}), níquel (Ni^{2+}) e zinco (Zn^{2+}).

✓ Compostos orgânicos xenobióticos (XOCs) provenientes de uso doméstico ou industrial de produtos químicos, e presentes em concentrações relativamente baixas (geralmente menos de 1 mg/L de compostos individuais). Esses compostos incluem, entre outros, uma variedade de hidrocarbonetos aromáticos, fenóis, alifáticos clorados, pesticidas e plásticos.

Segundo Reinhart (1998), as concentrações referentes aos compostos orgânicos do lixiviado diminuem ao longo do tempo na seguinte ordem: ácidos graxos voláteis livres, aldeídos de baixa massa molar, aminoácidos, carboidrato, peptídeos, ácidos húmicos, componentes fenólicos e ácidos fúlvicos. Deste modo, sua biodegradabilidade diminuiria com o tempo, principalmente pela presença dos ácidos húmicos e fúlvicos, que são de difícil degradação (TCHOBANOGLOUS et al. 1993).

Conforme demonstrado na Figura 1 a biodegradabilidade do lixiviado produzido varia com a idade do aterro podendo ser verificada pela relação DBO_5/DQO e pelos valores de pH. A partir destes parâmetros, os lixiviados são classificados como novo (jovem), intermediário e estabilizado (velho, maduro). Inicialmente o valor da razão DBO_5/DQO é igual ou maior a 0,5, e valores entre 0,4 e 0,6 dão um indicativo que a matéria orgânica presente no lixiviado é altamente biodegradável característico de um lixiviado jovem. Em aterros “velhos” a razão se mostra na faixa de 0,05 a 0,2. A razão DBO_5/DQO diminui porque lixiviados de aterros “velhos” contêm quantidades de ácidos fúlvicos e húmicos, que não são facilmente biodegradáveis (TCHOBANOGLOUS et al. 1993).

2.4 Tecnologias de tratamento de lixiviado

Diferentes tecnologias de tratamento de lixiviado vêm sendo desenvolvidas ao longo dos anos podendo ser categorizadas em dois grupos principais: processos biológicos (lagoas de estabilização aeróbia e anaeróbia, filtros naturais e lodo ativado) e processos físico-químicos (adsorção, flotação, precipitação química, coagulação /

floculação, remoção de ar, troca iônica, processo separação por membranas (PSM) e tratamentos de oxidação avançados).

Usualmente, as unidades de tratamento de lixiviado são dimensionadas em células que guardam relação com a evolução do AS ao longo do tempo. A escolha de qual tratamento utilizar está associada não só qual tecnologia empregar, mas também qual o custo deste tratamento, a característica do lixiviado a ser tratado e o percentual de remoção pretendida para o cumprimento das exigências legais (MAHMUD et al. 2012).

Dentre as tecnologias utilizadas para o tratamento de lixiviado estão os processos biológicos, que devido à sua confiabilidade, simplicidade e elevada relação custo/benefício podem ser utilizados para o tratamento de lixiviados com alta relação DBO_5/DQO , ou seja, lixiviados jovens. Este tratamento tem como principal objetivo a remoção ou redução da concentração de compostos orgânicos ou inorgânicos, minimizando altas concentrações desses elementos (SINGH et al. 2012; KURNIAWAN et al. 2010).

Assim sendo, no tratamento biológico, por meio das reações de metabolismo, os microrganismos transformam quimicamente a matéria orgânica do lixiviado em produtos estáveis, obtendo energia para desempenhar funções importantes (catabolismo) e sintetizar novas células (anabolismo). Sendo necessário o ajuste de condições favoráveis (aclimatação) do desenvolvimento da comunidade microbiana responsável pela degradação biológica da matéria orgânica (METCALF & EDDY, 2003).

A principal via de remoção biológica do nitrogênio amoniacal é o processo de nitrificação onde em condições aeróbias, o nitrogênio amoniacal é oxidado a nitrato (nitrificação) por um grupo de bactérias específicas. Inicialmente, o nitrogênio amoniacal é oxidado a nitrito (NO_2^-) e, posteriormente, a nitrato (NO_3^-) (VAN HAANDEL E MARAIS, 1999).

O tratamento biológico pode ser classificado como aeróbios ou anaeróbios. No processo aeróbio os poluentes orgânicos são principalmente transformados em CO_2 e produtos biológicos (lodo). No tratamento anaeróbio, os compostos orgânicos solúveis contidos no lixiviado entram em contato com a biomassa, difundindo-se sobre as superfícies do biofilme ou sobre o lodo granular, sendo convertidos principalmente a gás carbônico e metano (BIDONE, 2017).

Embora apresentem um alto desempenho na remoção de nitrogênio amoniacal e matéria orgânica biodegradável, os tratamentos biológicos não são capazes de remover compostos orgânicos recalcitrantes característicos de um lixiviado estabilizado, tornando-o alvo dos tratamentos físico-químicos (TATSI et al., 2003; OZTURK et al., 2003).

Em vista disso, os processos físico-químicos podem ser utilizados sejam eles no pré-tratamento para remoção das elevadas concentrações de nitrogênio amoniacal, ou no pós-tratamento, para remoção de compostos recalcitrantes baseando-se na redução de sólidos em suspensão, de partículas coloidais, materiais flutuantes, cor e os compostos tóxicos por coagulação ou flotação (LONG et al. 2017; REN et al. 2019, TEJERA et al. 2020), adsorção (LONG et al. 2017; TANG et al. 2020) e arraste com ar (FERRAZ et al. 2013; DOS SANTOS et al. 2020).

Omar et al. (2015) afirmam que quando comparado ao tratamento biológico, o tratamento físico-químico costuma apresentar um custo mais elevado de implantação, de gasto de energia e de utilização de produtos químicos.

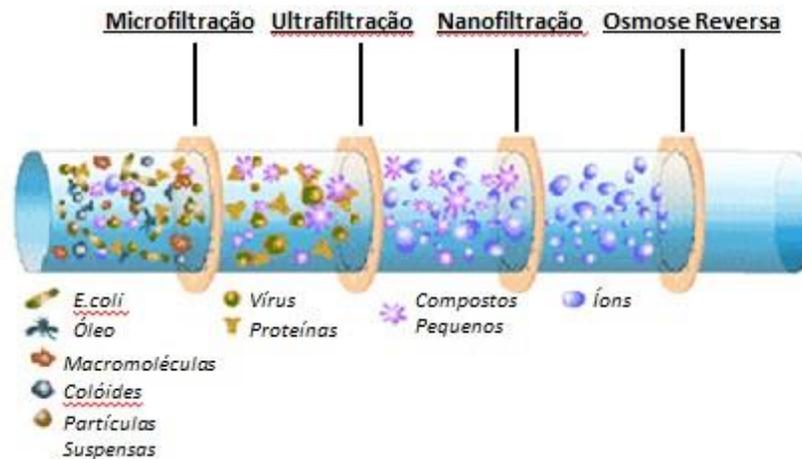
2.4.1 Processo de separação por membranas (PSM)

Cheryan et al. (1998) definem membrana como uma barreira seletiva, a qual permite a passagem de certos componentes e retém outros componentes de uma mistura. O líquido que atravessa a membrana é chamado permeado ou filtrado e o líquido contendo os constituintes retidos é conhecido como concentrado ou rejeito.

A seletividade das membranas, como representado na Figura 2, varia tendo em vista modificações do tamanho dos poros, alteração das propriedades físico-químicas, principalmente na superfície da mesma (SCHNEIDER et al., 2001).

Os principais PSM utilizados no tratamento de efluentes são: microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa. Processos com membranas são classificados de diversas formas, incluindo: tipo de material da membrana, natureza da força motriz, mecanismo de separação e tamanho nominal da separação alcançada (TCHOBANOGLIOUS et al., 2003).

Figura 2 - Representação esquemática da seletividade da membrana



Fonte: <https://www.snatural.com.br/membranas-ultrafiltracao-filtracao-agua/>

Atualmente, devido às legislações de lançamento de efluentes com padrões cada dia mais restritivos, gerou-se a busca por tratamentos mais eficientes baseados em PSM, destacando-se a nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI), como uma alternativa tecnológica ora para polimento do lixiviado tratado previamente por processos biológicos e/ou físico-químicos ora para substituir completamente os processos convencionais de tratamento (DE ALMEIDA et al. 2017; GIORDANO et al. 2002; MARIAN e NGHIEM, 2010; MARTTINEN et al. 2002; YAO, 2013).

Zhang et al. (2009) apontam como principal desvantagem do PSM a geração de um efluente residual com um volume em média de 20-30% do volume inicial, podendo chegar em alguns casos a 50% dependendo das condições de operação chamado de concentrado de membrana (CM). He et al. (2015) apontam como desvantagem que o PSM apresenta um alto custo de operação, curta vida útil das membranas e a produção de CM possuindo alta concentração de contaminantes que necessitarão de um posterior tratamento. Contudo Xu et al. (2016) afirmam que o PSM remove poluentes orgânicos do lixiviado e produz um efluente de qualidade estável.

As características deste CM são: cor muito escura, alta alcalinidade, poluentes orgânicos refratários tais como, compostos aromáticos, desreguladores endócrinos, halo-hidrocarbonetos e sais inorgânicos. Além disso, a alta concentração dos compostos salinos, juntamente com a presença dos poluentes refratários, interferem na biodegradabilidade deste concentrado de membrana (CM) de lixiviado de aterro deixando-os com uma tratabilidade muito difícil. (HE et al., 2015; KALLEL et al., 2017)

2.5 Processos de Tratamento do CM

A complexa composição do CM contendo substâncias húmicas, compostos aromáticos, hidrocarbonetos halogenados, metais pesados e sais inorgânicos, faz o descarte e a tratabilidade deste efluente ser um grande desafio na gestão de resíduos (HENDRYCH, 2019).

Atualmente, não existe uma técnica exclusiva para tratar o CM, utilizam-se de métodos convencionais de tratamento dentre eles: evaporação (Yue et al. 2007; Xie et al. 2010), recirculação (Sun et al. 2011; Morello et al. 2016, Talalaj et al. 2015), coagulação/floculação (Ying et al. 2012; Long et al. 2017), eletrodialise (Li et al. 2015) e processos de oxidação avançados (POA) (Wang et al. 2016; Yang et al. 2014; Xia et al. 2009).

O método de evaporação pode remover muitos tipos de poluentes orgânicos no CM, mas é limitado pela acumulação de concentrados secundários (XU et al. 2006). Esta é uma opção viável para aterros de pequeno porte em locais parcialmente secos e mais quentes podendo reduzir em até 90% o volume inicial (KEYIKOGLU, 2021).

Outrora na recirculação, o CM é reinserido no próprio aterro. Este é considerado o método mais barato para o tratamento, porém, quando realizado em aterros antigos gera a diminuição da degradabilidade do lixiviado devido à elevada concentração de poluentes orgânicos resistentes e aumento da salinidade (MORELLO et al., 2016). Fatores estes que contribuem para o aumento da condutividade elétrica e consequente diminuição da atividade biológica (TALALAJ et al., 2015). Segundo Džolev et al. (2016), a vantagem da recirculação é que a partir desta técnica pode ocorrer um aumento na produção de dióxido de carbono e metano dos resíduos degradados sob condições anaeróbicas metanogênicas.

Calabrò et al. (2010) verificaram que a recirculação do CM não afeta a qualidade do lixiviado produzido. Em contrapartida, outros autores concluíram que a recirculação do CM não pode ser considerada como uma prática sustentável uma vez que a longo prazo haverá um acúmulo de poluentes persistentes que afetam a operação da membrana além de causar alteração nas características do lixiviado, aumentando a DQO e a concentração de nitrogênio amoniacal (HENIGIN, 1993; ROBINSON, 2005; HE et al., 2015).

A coagulação/floculação tem se mostrado um método relativamente econômico para o tratamento de CM, porém pode atuar apenas como um método de

pré-tratamento para essas águas residuais, pois o processo não pode remover completamente toda a matéria orgânica do CM (YING et al. 2012; KAUSLEY et al. 2017).

Com isso, para a seleção coerente do processo de tratamento para o CM, faz-se necessário o conhecimento científico das características dos poluentes presentes. Porém, por se tratar de um tema relativamente novo, poucos estudos foram realizados para investigar as propriedades químicas, composição da matéria orgânica dissolvida e comunidade microbiana do CM.

2.6 Revisão Sistemática (RS)

Existem diferentes formas de se realizar uma revisão da literatura, a RS é uma metodologia de estudo alternativa à revisão bibliográfica tradicional (Figura 3), também conhecida como revisão narrativa. Whitemore e Knafl (2005) consideram que o desenvolvimento de diferentes formas de pesquisa tem contribuído para o uso de métodos mais sistemáticos, rigorosos e confiáveis.

Figura 3 - Tipos de revisões de literatura



Fonte: elaborado pela autora

De acordo com Kitchenham et al. (2009), revisão sistemática é um meio de avaliar e interpretar todas as pesquisas disponíveis relevantes para uma pesquisa particular, uma área temática ou fenômeno de interesse. Enquanto Brereton et al. (2007) afirmam que a RS permite ao pesquisador uma avaliação rigorosa e confiável das pesquisas realizadas dentro de um tema específico.

RS quando bem estruturadas, são capazes de auxiliar na atualização e construção de novas diretrizes para atuação profissional ou ida a campo em busca de soluções para artigos originais (MEDINA et al., 2010).

Stevens (2001) definiu RS como uma forma de sintetizar informações de múltiplos estudos primários a partir do emprego de uma metodologia previamente padronizada. A partir do trabalho de RS é possível refinar hipóteses, estimar tamanhos de amostra e ajudar a planejar agendas de trabalho futuro (MEDINA et al., 2010)

Sendo assim, a RS torna-se um instrumento capaz de mapear trabalhos publicados no tema de pesquisa específico para que o pesquisador seja capaz de elaborar uma síntese do conhecimento existente sobre o assunto (BIOLCHINI et al. 2007).

O estudo de Mulrow (1994) descreve alguns argumentos para o uso da RS tais como: quantidade de informação disponível sobre diversos assuntos; forma viável de pesquisa científica; sintetização dos resultados de vários em poucos estudos; uso de análises estatísticas das pesquisas sistemáticas para identificação de tendências, mapeamento de novas fontes de pesquisa; permite aumentar a precisão das estimativas dos riscos ou efeitos dos resultados dos estudos, entre outros.

Como demonstrado na Figura 4, a depender do objetivo e pergunta do estudo, a RS apresentará como possibilidades metodológicas pesquisas qualitativas, quantitativas ou ambas e o resultado será apresentado como forma de conclusão, análise ou síntese.

Figura 4 - Possibilidades metodológicas da revisão sistemática



Fonte: Adaptado De-La-Torre-Ugarte-Guanilo, Takahashi e Bertolozzi, 2011.

Os estudos de RS iniciaram-se no âmbito das Ciências Médicas onde observou-se que em situações em que objetivos e objetos de pesquisa eram

semelhantes e geravam-se resultados diferentes. (YOUNG, 2002). A decorrência da RS era a produção de sumários clínicos organizados por especialidades e subespecialidades de todos os ensaios clínicos existentes até um dado.

A sistematização de estudos nesta área apresenta uma metodologia apreciável e almejável, onde todas as etapas são rigorosamente descritas e apreciadas por entidades especializadas no assunto como por exemplo: *National Health Service United Kingdom* (NHS UK), *Centre for Reviews and Dissemination* (CRD), e do método definido por Cochrane (HIGGINS et al., 2011).

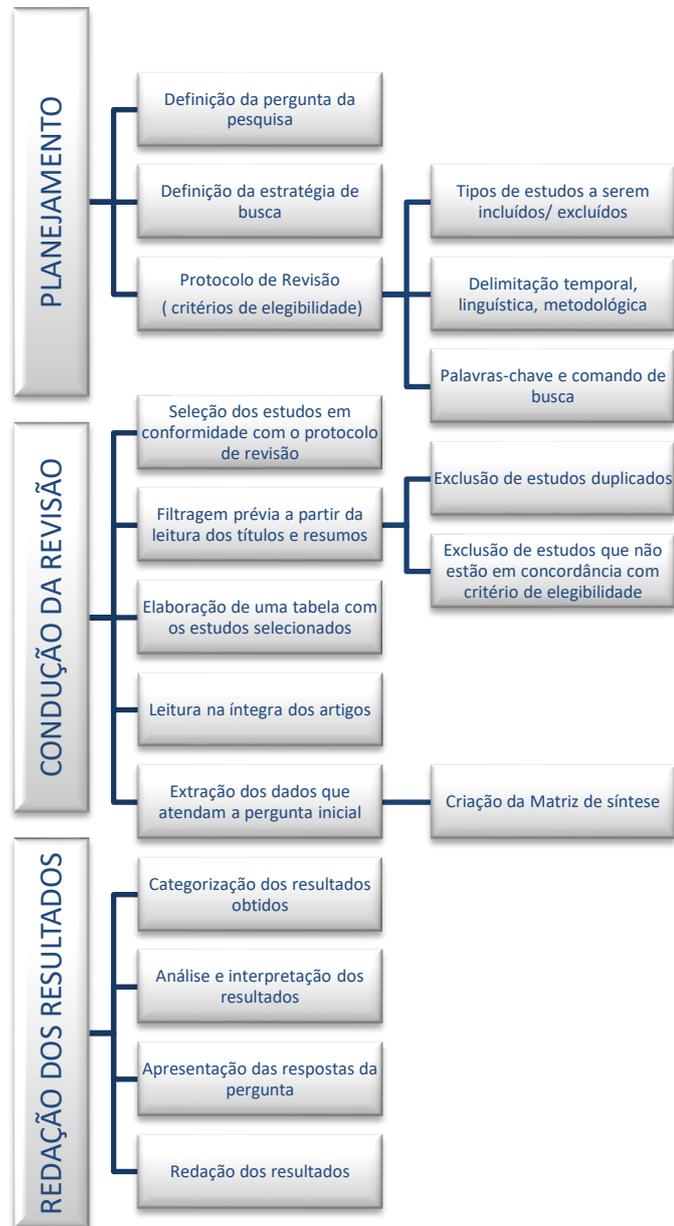
A Colaboração Cochrane é a principal organização internacional que concentra as RS no âmbito das ciências médicas criando uma estrutura unificada de indexação, com vocabulário controlado (*Medical Subject Headings*, “MeSH”), que subordina a diversidade terminológica dos diversos assuntos, tópicos e questões. Todo este sistema é atualizado continuamente em termos de conteúdo, abrangência, estrutura e mérito de qualquer fonte passível de ser útil para as atividades das Ciências Médicas (BRASIL, 2012).

Mesmo sem dispor de um sistema tão elaborado quanto o existente nas ciências médicas ultimamente tem surgido, cada dia mais, no âmbito da engenharia, pesquisas que atendam aos requisitos de um trabalho de revisão sistemática.

Assim sendo, o delineamento de uma estratégia clara para identificação dos estudos relevantes torna-se um aspecto muito importante uma vez que, a busca deve ser a mais completa, objetiva e reprodutível, eliminando vieses na localização de trabalhos (escolha dos bancos de dados); na seleção dos trabalhos a serem considerados (definição da pergunta a ser respondida e palavras-chave); no conteúdo dos trabalhos selecionados (critérios de elegibilidade); na extração de informações (matriz de síntese) e na apreciação crítica dos trabalhos (redação dos resultados e resposta da pergunta).

A Figura 5 ilustra o processo geral de RS sintetizado em três fases principais: planejamento; condução da revisão e redação dos resultados.

Figura 5 – Fases de uma Revisão Sistemática



Fonte: elaborado pela autora

Por meio da RS, o pesquisador é capaz de adotar metodologias e processos para a identificação de estudos de que um certo tratamento, ou meio diagnóstico, é efetivo, sendo possível traçar estratégias para avaliação da qualidade destes estudos e mecanismos para a implementação em outros estudos.

O resultado de um trabalho de RS é a busca pela evidência por meio da minimização de vieses. Para Dalm et al. (2005), evidência é aquilo que é claro, a constatação de uma verdade que não suscita qualquer dúvida. Evidência científica representa uma prova de que um determinado conhecimento é verdadeiro ou falso.

Para que se tenha evidência científica é necessário que exista pesquisa prévia, conduzida dentro dos preceitos científicos e é nesta etapa que se encontra a RS.

A fase do planejamento é primordial para a conclusão de uma revisão sistemática bem-sucedida.

2.6.1 Definição da pergunta

A definição da pergunta deve ser clara e focada - não muito vaga, muito específica ou muito ampla. Perguntas bem estabelecidas conduzirão muitos aspectos no processo de revisão, incluindo a determinação dos critérios de elegibilidade, a busca de estudos, a coleta de dados dos estudos incluídos e a apresentação dos resultados (HIGGINS et al., 2020).

Existem diversos métodos que ajudam na definição da pergunta de uma revisão sistemática. O

Quadro 1 demonstra alguns desses acrônimos que definem o método de construção da pergunta da revisão.

Quadro 1 - Métodos de construção da pergunta da revisão sistemática

acrônimo	definição	tipo de estudo
P I C O	População ou problema intervenção ou tratamento comparação/controle desfecho(outcome)	Método utilizado em estudos quantitativos
S Pi D E R	Sample (amostra) Fenômeno de Interesse Design Evaluation (avaliação) Research type (tipo pesquisa)	Método utilizado em estudos qualitativos ou métodos mistos
S P I C E	Setting (onde?) Perspectiva (para quem?) Intervenção (o quê?) Comparação (com o quê?) Evaluation (com que resultado?)	Método utilizado em estudos qualitativos

Fonte: elaborado pela autora

Desenvolvido na década de 90 por médicos da *McMaster University* (Ontário, Canadá) o modelo PICO tem como objetivo desenvolver estratégias para uma busca bibliográfica baseada em evidências (MAGAREY, 2001).

Uma vez elaborada a pergunta da pesquisa é verificada (quando possível) a existência de outras revisões sistemáticas (publicadas ou em andamento) sobre a

mesma pergunta de pesquisa, ou seja, verifica-se se aquela RS é realmente necessária.

2.6.2 Definição da estratégia de busca

São muitas as formas de busca em uma RS dentre elas: pesquisa manual em revistas e anais de congresso, verificação da lista das referências dos artigos relevantes, contato direto com os pesquisadores da área de estudo. Porém, a busca de dados em bases eletrônicas tem se tornado uma ferramenta cada dia mais efetiva e útil para a produção de pesquisas de RS (PEREIRA & GALVÃO, 2014).

O pesquisador deve ter sensibilidade na definição da sua estratégia de busca, uma vez que, a escolha inadequada da base de dados pode gerar uma distorção no resultado da pesquisa já que uma proporção substancial de estudos relevantes pode não ser englobados (BRASIL, 2012).

As RS visam ser as mais extensas possíveis, de modo a garantir que o maior número possível de estudos relevantes seja incluído na revisão. Portanto, faz-se necessário encontrar um equilíbrio entre a busca pela abrangência e a manutenção da relevância ao desenvolver uma estratégia de busca (HIGGINS et al., 2020).

Como exemplo de base de dados eletrônicos tem-se: Google Acadêmico, Biblioteca Digital de Teses e Dissertações, Scielo, Portal da Capes, Web of Science.

2.6.3 Protocolo de Revisão (Critérios de Elegibilidade)

Diferentemente de uma revisão narrativa, na RS o pesquisador precisa especificar a *priori* os critérios para incluir e excluir os estudos na sua revisão devendo assim contemplar a questão de pesquisa estruturada, por exemplo, baseando-se nos elementos PICO.

É nesta etapa que se traça o delineamento do estudo, sendo definidos os critérios de elegibilidade e um protocolo de busca. No protocolo de revisão deve-se descrever o tipo de estudos que será incluído/excluído (artigo, teses, anais de congresso etc.), fator de impacto da revista (se aplicável), base de dados, delimitação do ano da publicação, língua da escrita, qualidade metodológica, definição das palavras chaves e protocolo de busca (comando dado no banco de dados para buscar as palavras chaves).

2.6.4 Seleção dos estudos

A partir desta etapa inicia-se a etapa de Condução da Revisão, onde serão selecionados os estudos que estejam em concordância com os critérios de elegibilidade, sendo excluídos os estudos em duplicatas ou em desacordo com os critérios definidos (GALVÃO, 2014).

Em seguida, os estudos selecionados passam pela leitura prévia do título e resumo para que haja o rastreio de relevância antes da leitura na íntegra. Por isso, um dos critérios de elegibilidade deve ser a obtenção do estudo completo dos artigos potencialmente relevantes.

A partir da conclusão da leitura, elabora-se uma tabela com os estudos pré-selecionados para a RS.

2.6.5 Seleção dos dados dos estudos primários

Nessa etapa, extrai-se os dados que atendam a pergunta inicial e devem ser reproduzidos de forma imparcial e fidedigna pelo condutor da revisão. A partir deste momento é possível fazer a categorização, de forma concisa, dos estudos selecionados por meio da sumarização e documentação de todos os dados de interesse através da criação de uma matriz de síntese sendo esta primordial para auxiliar os pesquisadores no foco de sua revisão.

Não há um modelo definido de matriz de síntese pois esta dependerá da criatividade pessoal, poder de síntese, organização, criatividade e interesse de estudo do pesquisador (KLOPPER et al. 2007).

Deve-se atentar apenas para que a matriz de síntese seja funcional e responda à pergunta alvo da RS.

2.6.6 Análise e interpretação dos resultados

Tão importante quanto a etapa anterior, nesta fase o condutor da revisão realizará a interpretação dos dados sendo possível o preenchimento das lacunas de conhecimento existentes e quais os caminhos que os pesquisadores podem abordar em suas futuras pesquisas científicas.

2.6.7 Síntese dos Dados

Como descrito anteriormente, a RS é um método replicável, sendo assim, deve ser elaborado pelo condutor da revisão um documento contemplando todas as

etapas percorridas possibilitando aos futuros pesquisadores a avaliação da pertinência de toda a condução bem como uma análise ampla dos dados apresentados.

3. METODOLOGIA

3.1 Delineamento do estudo

Para esta RS, discutem-se as seguintes problemáticas: (I) Qual é o estado da arte mundial referente aos trabalhos científicos que abordem os processos empregados no tratamento do CM proveniente de lixiviado de aterro sanitário? (II) Quais as tecnologias abordadas nestes trabalhos científicos? (III) Quais os resultados obtidos, até o momento, por esses estudos?

Foi realizada uma revisão sistemática de estudos das tecnologias de tratamento do concentrado de membranas provenientes do tratamento de lixiviados de aterros sanitários. A partir desta RS é possível analisar criticamente cada tecnologia e o percentual de remoção de poluentes obtidos com cada uma.

3.2 Estratégia de Busca e seleção dos artigos

A definição da pergunta e dos critérios de inclusão dos estudos desta RS foi feita a partir do método do anagrama PICO onde foram estabelecidos os aspectos de condução conforme demonstrado no Quadro 2:

Quadro 2 – Definição da pergunta da Revisão Sistemática

Pergunta a ser respondida pela RS: <i>Qual o percentual de redução de poluentes (DQO) obtido no tratamento dado ao concentrado oriundo do PSM?</i>	
Critério de inclusão	
P População ou Problema	Concentrado de membrana de lixiviado de aterro
I Intervenção/ tratamento	Tratamento do concentrado
C Comparação/controle	Diferentes tecnologias de tratamento
O Desfecho (<i>outcome</i>)	% redução de poluentes (DQO)

Fonte: elaborado pela autora

Foi utilizada a plataforma de buscas da Web of Science que apresenta como característica ser um conjunto de bases de dados também conhecidas como Science Citation Indexes (Science Citation Index, Social Science Citation Index, Arts and Humanities Citation Index), compiladas pelo ISI (Institute for Scientific Information). Além destas, estão também incluídas na Web of Science as bases de dados Current

Chemical Reactions e Index Chemicus. Esta base de referências bibliográficas não contém o texto integral dos documentos.

A seleção dos estudos foi feita a partir de um checklist desenvolvido pela autora onde foram definidos os critérios de elegibilidade aplicáveis, listados no Quadro 3.

Os critérios de elegibilidade foram definidos a fim de contemplar a pergunta da pesquisa gerando uma triagem dos artigos e o descarte das referências que não se enquadraram nos critérios de elegibilidade estabelecidos pela revisão.

Inicialmente, foi feita uma triagem prévia a partir da leitura do título e resumo disponíveis na plataforma de busca. Apenas os artigos elegíveis desta fase tiveram sua elegibilidade confirmada pela leitura mais detalhada do estudo, por meio da leitura do texto completo do artigo.

Quadro 3- Critérios de elegibilidade

Critérios de Elegibilidade	Sim	Não
O estudo está de acordo com o tema publicado?		
O efluente é de lixiviado de AS?		
É concentrado proveniente de PSM?		
Artigo foi obtido na íntegra?		
O artigo apresenta resultados (percentual de redução de DQO)?		

Fonte: elaborado pela autora

Desse modo, não foram selecionados estudos que não contemplasse resultado de redução de poluentes em termos de DQO ou estudos que estivessem em desacordo com o tema proposto.

Como critério de inclusão foi definido apenas artigos científicos publicados em revistas. Não foi estabelecido na plataforma de busca Web of Science limite temporal para este trabalho pois o intuito foi analisar de forma ampla o desenvolvimento das tecnologias no decorrer dos anos de publicação.

3.3 Extração de Dados

Com o auxílio do Microsoft Excel foi elaborada uma matriz de síntese que atendesse aos objetivos deste estudo e organizasse todos os artigos considerados elegíveis.

A partir da matriz de síntese foi possível gerar gráficos para análise de dados tais como: anos de publicação, distribuição por países, por periódicos, por categorias temáticas e extrair os dados relativos ao estudo em tela.

A síntese de dados do estudo gerou uma RS do tipo integrativa tendo como resultado o resumo e análise dos estudos científicos disponíveis na plataforma de pesquisa da Web of Science produzidos sobre o tratamento do CM oriundo de PSM de lixiviado de aterros sanitários.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente trabalho de investigação, a partir de uma revisão sistemática, dos diferentes processos empregados no tratamento do concentrado oriundo dos processos de separação por membranas utilizados no tratamento de lixiviados de resíduos sólidos urbanos, na base de dados Web of Science, foram encontradas um total de 314 referências bibliográficas compreendidas entre os anos de 2010 à março de 2021.

Para efeito de organização, os resultados deste trabalho serão apresentados em duas partes. A primeira parte caracteriza o resultado da pesquisa de revisão sistemática e na segunda parte será apresentada uma discussão sobre os processos empregados no tratamento do concentrado de PSM a partir da comparação entres as eficiências de redução dos poluentes nos processos, identificando as vantagens e desvantagens de cada processo.

4.1 Resultados da Revisão Sistemática

4.1.1 Estratégia de busca e seleção dos artigos

O número de estudos primários candidatos a esta RS foi definido pelo protocolo de busca onde foram utilizadas as palavras chaves “landfill leachate concentrate” and “treatment” e o comando de busca “TS”, sendo obtido um total de 314 artigos científicos. O Quadro 4 apresenta os resultados alcançados segundo o protocolo de busca definido.

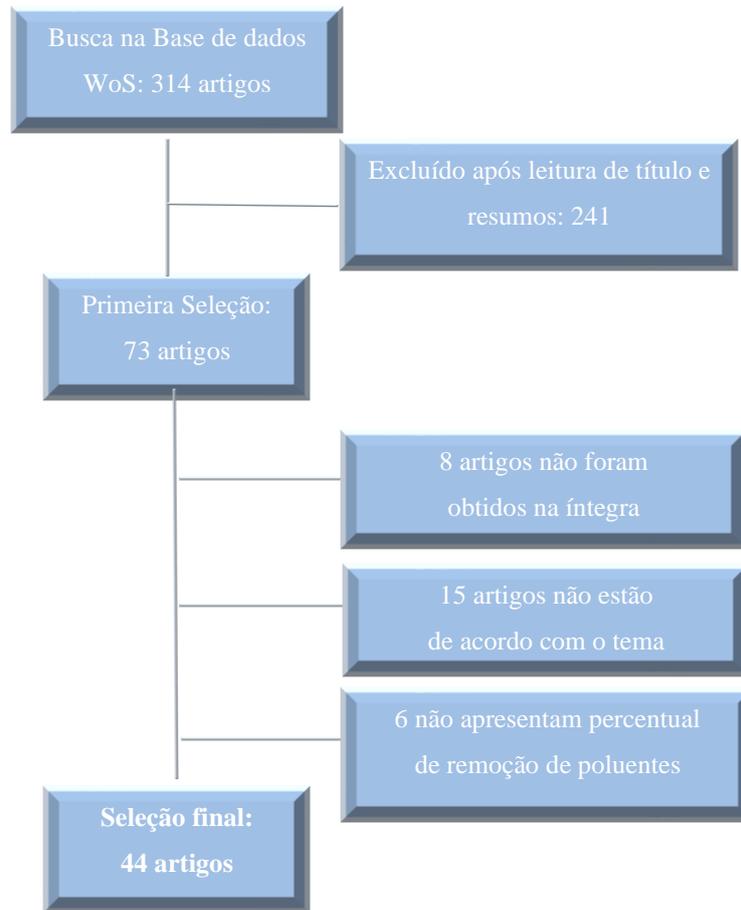
Quadro 4 - Protocolo de Busca

TÓPICO: (<i>landfill leachate concentrate</i>)	314
TS= (<i>landfill leachate concentrate AND treatment</i>)	232
TÓPICO: (<i>landfill leachate concentrate membrane</i>)	114

Fonte: elaborado pela autora

Após análise dos títulos e resumo dos 314 artigos científicos, foram selecionados 73 potenciais estudos que atendessem aos critérios de elegibilidade definidos. O fluxograma de seleção dos estudos pode ser resumido conforme Figura 6.

Figura 6 -Fluxograma da seleção dos estudos da revisão sistemática



Fonte: elaborado pela autora

Neste trabalho observou-se que cerca de 23% dos estudos primários candidatos a esta RS foram elegíveis para as próximas etapas. De acordo com Donato et al., (2019) a RS gera muitas referências potencialmente selecionáveis que precisam ser prudentemente avaliadas para inclusão de acordo com os critérios de elegibilidade predefinidos onde, apenas uma pequena proporção, será efetivamente incluída na revisão.

Dentre os artigos selecionados na primeira triagem, 8 (oito) não puderam ser obtidos na íntegra sendo possível apenas a leitura do título e resumo que ficam disponíveis na plataforma de busca. Desse modo, estes estudos foram excluídos pois não cumpriram um dos critérios de elegibilidade definido no Quadro 3.

Dos 6 (seis) artigos excluídos desta RS por não apresentarem percentual de redução de DQO: 2 (dois) realizaram a estabilização/solidificação (Hendrych et al., 2019 e Kallel et al., 2017), 1 (um) efetuou a recuperação das substâncias húmicas para a utilização como fertilizante (Ye et al., 2019), 1 (um) realizou a recirculação do

concentrado no aterro sanitário (Morello et al., 2016) enquanto que os 2(dois) demais artigos, Chu et al., (2020) e Kateb et al., (2019) determinaram o percentual de redução em termos de carbono orgânico dissolvido.

4.1.2 Critérios de Elegibilidade

A partir dos 73 potenciais estudos selecionados, verificou-se se estes atendiam aos critérios de elegibilidade definidos inicialmente sendo gerado como resultado o Quadro 5.

Quadro 5 - Critérios de Elegibilidade

Referências	O estudo está de acordo com o tema publicado?	O efluente é de lixiviado de AS?	É concentrado proveniente de PSM?	Artigo foi obtido na íntegra?	Artigo percentual de redução de DQO?	Artigo incluso no estudo
Ren et al. (2021)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Yazici et al. (2021)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
He et al. (2020)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Varank et al. (2020a)	-	-	-	NÃO		NÃO
Yazici et al. (2020)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Tejera et al. (2020)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Varank et al. (2020b)	-	-	-	NÃO		NÃO
Tang et al. (2020)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Wang et al. (2020)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Wang et al. (2020b)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Zhang et al. (2020)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Wu et al. (2020)	-	-	-	NÃO		NÃO
Varank et al. (2020)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Nowak et al. (2020)	-	-	-	NÃO		NÃO
Chang et al. (2020)	NÃO	SIM	SIM	SIM	-	NÃO
Soomro et al. (2020)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Ren et al. (2020)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Zhao et al. (2020)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Chu et al. (2020)	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO
Varank et al. (2020)	NÃO	SIM	SIM	SIM	-	NÃO
Xue et al. (2020)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Teng et al. (2020)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Wang et al. (2019)	NÃO	SIM	NÃO	SIM	-	NÃO
Guvenc et al. (2019a)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Kateb et al. (2019)	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO
Ren et al. (2019)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Chen et al. (2019)	NÃO	SIM	NÃO	SIM	-	NÃO
Fernandes et al. (2019)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Genc et al. (2019)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Hendrych et al. (2019)	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO
Ye et al. (2019)	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO
Guvenc et al. (2019b)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM

Quadro 5 - Critérios de Elegibilidade (cont.)						
Referências	O estudo está de acordo com o tema publicado?	O efluente é de lixiviado de AS?	É concentrado proveniente de PSM?	Artigo foi obtido na íntegra?	Artigo percentual de redução de DQO?	Artigo incluso no estudo
Kulhavy et al. (2019)	-	-	-	NÃO	-	NÃO
Shi et al. (2019)	-	-	-	NÃO	-	NÃO
Chen et al. (2019)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Koc-Jurczyk et al. (2019)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Zhang et al. (2019)	NÃO	-	-	SIM	-	NÃO
Chen et al. (2018)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Cui et al. (2018)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Zhang et al. (2018)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Qiao et al. (2018)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Hu et al. (2018)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Calabro et al. (2018)	NÃO	-	-	-	-	NÃO
He et al. (2018)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Yang et al. (2018)	NÃO	-	-	-	-	NÃO
Hong et al. (2017)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Wang et al. (2017)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Ji et al. (2017)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Seibert et al. (2017)	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM	NÃO
Shah et al. (2017)	-	-	-	NÃO	-	NÃO
Xu et al. (2017)	NÃO	-	-	-	-	NÃO
Hou et al. (2017)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Xu et al. (2017b)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Kallel et al. (2017)	SIM	-	-	-	NÃO	NÃO
Long et al. (2017)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Morello et al. (2016)	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO
Labiadh et al. (2016)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Wang et al. (2016a)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Wang et al. (2016b)	-	-	-	NÃO	-	NÃO
Zhou et al. (2016)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Wang et al. (2016c)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Li et al. (2016)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Talalaj et al. (2015)	NÃO	-	-	SIM	-	NÃO
Huang et al. (2015)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
He et al. (2015)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Talalaj et al. (2014)	NÃO	-	-	SIM	-	NÃO
Zhang et al. (2013)	NÃO	-	-	SIM	-	NÃO
Li et al. (2013)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Wang et al. (2012)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Hunce et al. (2012)	NÃO	-	-	SIM	-	NÃO
Top et al. (2011)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Calabro et al. (2010)	NÃO	-	-	SIM	-	NÃO
Cammarota et al. (2009)	NÃO	SIM	SIM	SIM	-	NÃO

Pela análise do Quadro 5 verificou-se que a maior parte dos artigos (15) foram excluídos por estarem em desacordo com a temática dos quais dois: Wang et al., (2019), Chen et al., (2019) e Seibert et al., (2017) foram excluídos por não abordarem concentrado proveniente de PSM.

Dentre os 6 artigos excluídos por não apresentarem percentual de redução dos poluentes, Chu et al., (2020) e Kateb et al., (2019) apresentaram os resultados de redução em percentual de carbono orgânico dissolvido (COD) diferindo dos demais selecionados em que o parâmetro para comparação foi a DQO (demanda química de oxigênio).

Apesar de recirculação (Talalaj et al., 2014; Calabro et al., 2018) e solidificação/estabilização (Hendrych et al., 2019; Kallel et al. (2017); Hunce et al. (2012)) também serem consideradas tecnologias de tratamento para este trabalho de revisão sistemática os estudos foram excluídos por não exibirem percentual de redução dos poluentes.

4.1.3 Extração de Dados

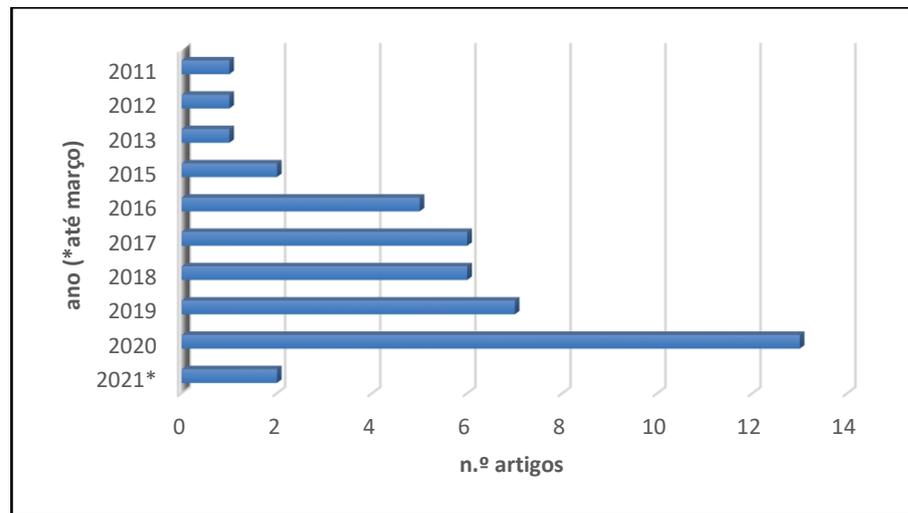
A última etapa dentro da condução da revisão foi a extração de dados e a criação de uma matriz de síntese que atendesse aos objetivos da RS e organize todos os 44 artigos elegíveis.

A partir da matriz de síntese apresentada no Apêndice A foi possível categorizar os artigos selecionados a partir do seu ano de publicação (Figura 7), por países de publicação (Figura 8) e por revistas de publicação (Figura 9).

A partir da análise da Figura 7 observa-se o crescente aumento das publicações no decorrer dos últimos 10 anos o que pode ser um demonstrativo de aumento de interesse pelo assunto e busca de novas soluções para a problemática, tendo sido o ano de 2020 o de maior produção científica com 13 artigos. Após todas as triagens realizadas foram avaliadas as publicações no período de 2011 até março 2021.

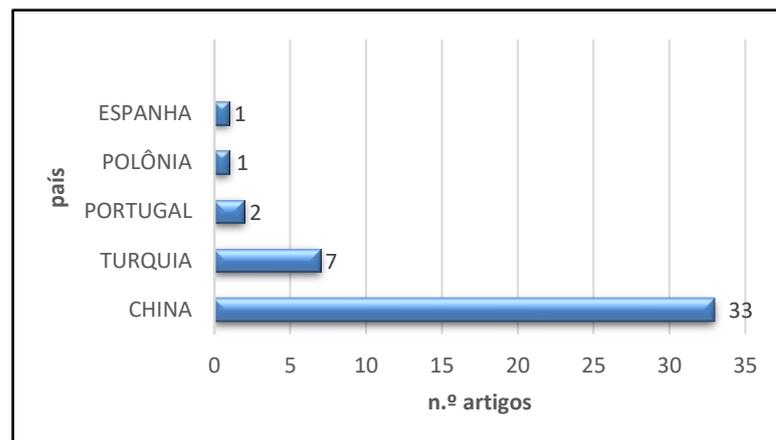
Conforme descrito na metodologia, não foi imposto para esta RS, nenhum limite temporal, ou seja, a partir da busca realizada o primeiro artigo publicado que atendeu a todos os critérios de elegibilidade impostos foi um estudo em que Top et al. (2011) onde os autores realizaram a caracterização e tratamento do concentrado de nanofiltração de uma estação de tratamento de lixiviado a partir de um procedimento de eletrocoagulação.

Figura 7 - Artigos selecionados na RS divididos por ano de publicação



Foram encontradas publicações de apenas 5 países diferentes (Figura 8). Este fato pode ratificar a afirmação anterior de que o tratamento do concentrado de membranas provenientes do PSM para tratamento de lixiviado de aterros sanitários é um assunto relativamente recente. Ressalta-se aqui a ausência de artigos brasileiros nesta RS indicando uma lacuna científica a ser preenchida.

Figura 8 - Artigos selecionados na RS divididos por país de publicação



A aplicação das técnicas de tratamento do concentrado de membrana está diretamente ligada ao sistema de disposição final dos resíduos de cada país, ou seja, na utilização de AS como forma ambientalmente correta de disposição final dos resíduos sólidos urbanos, tendo sido observada uma predominância (90%) de estudos oriundos dos países em desenvolvimento.

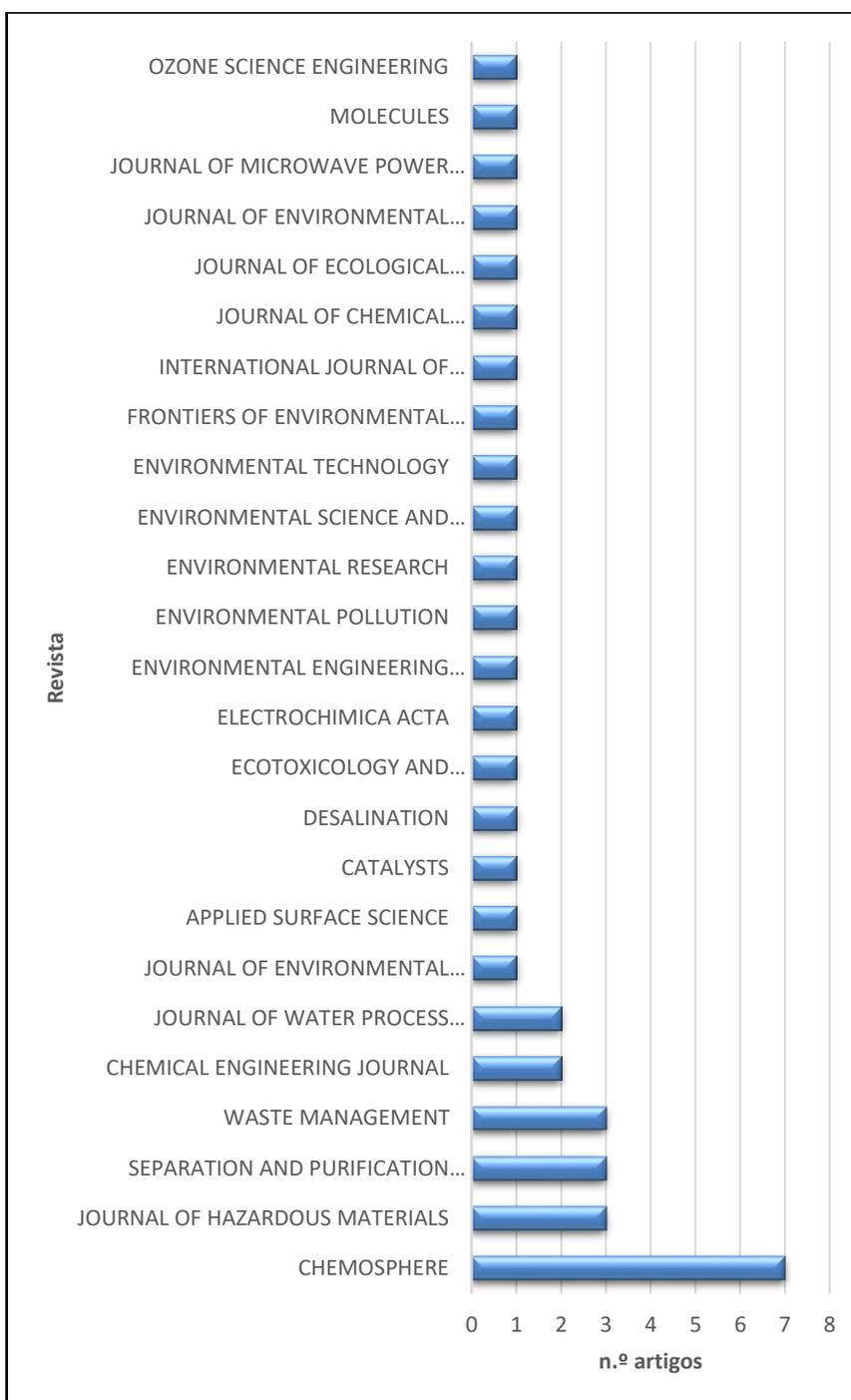
Cada vez mais o governo chinês incentiva a implantação da incineração como alternativa aos aterros sanitários devido às vantagens de uso econômico do espaço e por ser um tratamento seguro e alta eficiência. Segundo Ren et al. (2021), com uma massa de resíduos com alto teor de umidade, resultado do incorreto acondicionamento, os aterros sanitários chineses apresentam uma elevada produção de lixiviado tornando-se uma problemática deste tipo de disposição final.

Com relação às universidades e instituições de pesquisa, nota-se que as universidades Southwest Jiaotong University (China) e Yildiz Technical University (Turquia) foram as instituições que mais publicaram sobre o tema sendo, cada uma, responsável por 6 publicações.

O autor com o maior número de publicações foi o Weiming Chen da Universidade Southwest Jiaotong com 5 publicações (REN et al. 2021; REN et al. 2020; CHEN et al. 2019; CHEN et al. 2018 e ZHANG et al. 2018). Até o presente momento, suas obras geraram um total de 157 citações, sendo de CHEN et al. (2018) o estudo no qual se investiga a degradação dos compostos orgânicos refratários do concentrado de membrana a partir de um sistema combinado de microondas (MW) - Fe^0/H_2O_2 , artigo científico com maior número de citações (67 citações) até março de 2021.

A Figura 9 analisa o resultado da RS dividido por revista de publicação. Foram encontradas publicações em 25 diferentes revistas científicas. A revista internacional Chemosphere (fator de impacto (2019) igual a 5.778) foi a que publicou o maior número de estudos (7 estudos). Enquanto a revista Chemical Engineering Journal, com 2 estudos publicados, é a revista que apresenta o maior fator de impacto (10.652).

Figura 8 - Artigos seleccionados divididos por revista de publicação



4.2 Resultados da análise dos artigos

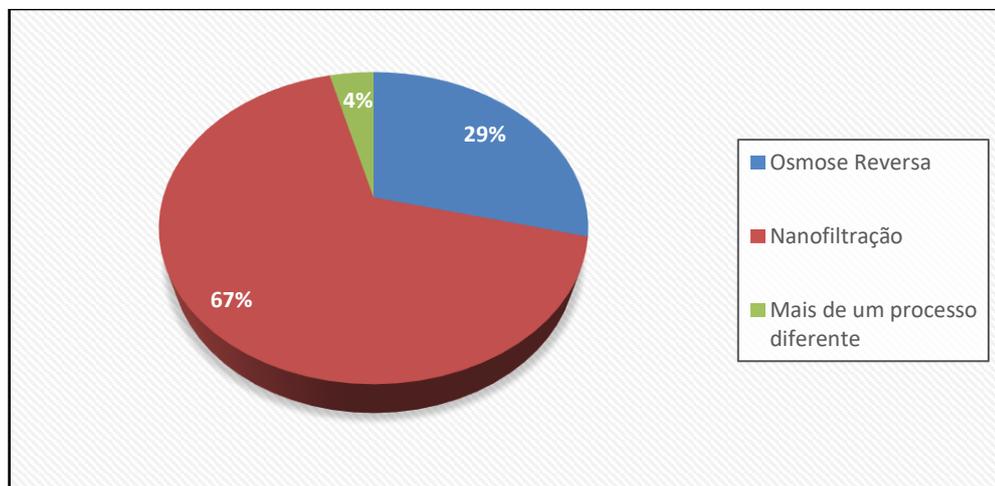
Foram analisadas as seguintes variáveis: tipo de membrana, tecnologias de tratamento do CM e percentual de redução da DQO. Os resultados estão apresentados nos próximos tópicos.

Tipo de processo de separação por membrana empregado

A partir da análise da Figura 9 verifica-se que a maior parte dos artigos (67%) realizou o tratamento do concentrado de membrana proveniente do processo de separação por membrana de nanofiltração, enquanto 29% utilizaram o tratamento do concentrado de membrana proveniente de osmose inversa.

A partir dos dados dos artigos estudados não foi possível determinar se o PSM foi o único tratamento dado ao lixiviado bruto ou se foi combinado com algum outro processo biológico e/ou físico químico.

Figura 9 - Tipos de processos de separação por membranas empregados



Por apresentarem maior seletividade e a capacidade de gerarem um permeado que atenda aos altos padrões de descarga de efluentes sem a necessidade de adição de produtos químicos, os processos envolvendo membranas de nanofiltração e osmose inversa são muito utilizados para o tratamento de lixiviado de aterro, conforme demonstra o Quadro 6.

A seleção da membrana a ser utilizada depende de fatores como permeabilidade hidráulica, fluxo do permeado, características físico-químicas do efluente além de envolver os custos e parâmetros operacionais.

Quadro 6 - Referências divididas por tipo de processo de separação por membranas

Concentrado proveniente de PSM	Referências
Osmose Inversa (13)	Ren et al. 2021; Tejera et al. 2020; Tang et al. 2020; Ren et al. 2020; Fernandes et al. 2019; Chen et al. 2019; Koc-Jurczyk et al. 2019; Zhang et al. 2018; Ji et al. 2017; Labiadh et al. 2016; Wang et al. 2016a; Zhou et al. 2016; Li et al. 2013
Nanofiltração (31)	Yazici et al. 2021; He et al. 2020; Yazici et al. 2020; Wang et al. 2020; Wang et al. 2020b; Zhang et al. 2020; Varank et al. 2020; Zhao et al. 2020; Xue et al. 2020; Teng et al. 2020; Guvenc et al. 2019a; Ren et al. 2019; Genc et al. 2019; Guvenc et al. 2019b; Cui et al. 2018; Zhang et al. 2018; Qiao et al. 2018; Hu et al. 2018; He et al. 2018; Hong et al. 2017; Wang et al. 2017; Hou et al. 2017; Xu et al. 2017b; Long et al. 2017; Wang et al. 2016a; Wang et al. 2016c; Li et al. 2016; Huang et al. 2015; He et al. 2015; Wang et al. 2012; Top et al. 2011
Mais de um processo diferente (2)	Smooro et al. 2020 ^(a) ; Chen et al. 2018 ^(b)

(a) processos de Ultrafiltração/Nanofiltração/Osmose inversa em série; (b) processos de Nanofiltração e Osmose

Os resultados apresentados no Quadro 6 demonstram uma maior utilização dos processos envolvendo a membrana porosa de nanofiltração. De acordo com Masse et al. (2007), a NF, em alguns casos, substitui a osmose inversa, por ser um processo de separação por membranas que se encontra numa zona intermediária entre a ultrafiltração e osmose inversa, conseguindo reter os íons multivalentes e deixando passar parcialmente os íons monovalentes (Na^+ e Cl^-). A capacidade seletiva da membrana de NF depende das relações entre o tamanho das espécies e as dimensões dos poros da membrana e a força motriz é o gradiente de pressão através da membrana sendo o transporte das espécies químicas basicamente convectivo.

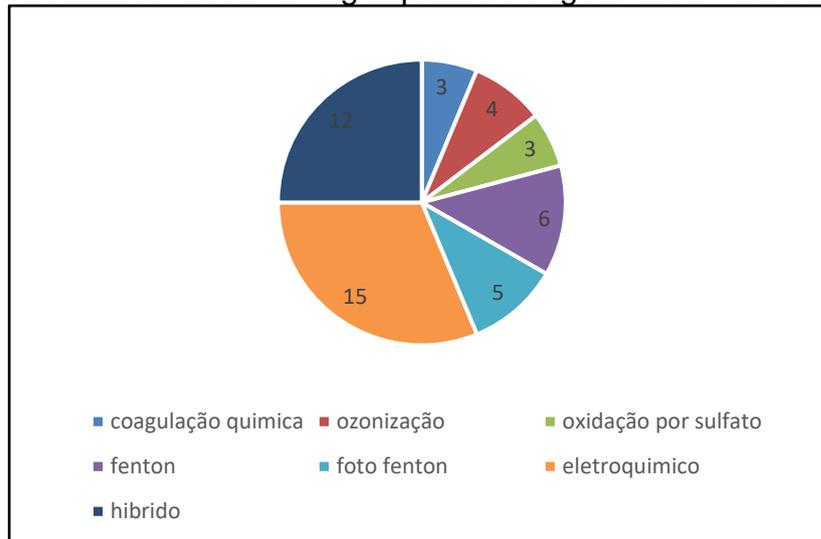
Por outro lado, nos processos que utilizam membranas densas, como a OR, o transporte das espécies ocorre por mecanismo difusivo e a força motriz é a pressão através da membrana caracterizando-se por ser um processo mais lento que a NF. Neste processo, o soluto é transportado devido aos movimentos das moléculas fazendo com que, do ponto de vista macroscópico, o soluto passe das zonas mais elevadas de concentração para zonas de baixa concentração (HABERT et al., 2006).

Tecnologias de Tratamento do CM

A Figura 11 apresenta a categorização dos artigos de acordo com a tecnologia de tratamento aplicada ao CM. Dentre as diferentes tecnologias de tratamento do CM os resultados foram categorizados em sete grupos distintos para comparação de

resultados sendo eles: coagulação química, processos baseados em ozonização, processos baseados em oxidação química a base de sulfato, processos baseados em Fenton, processos baseados em Foto Fenton, processos eletroquímicos e processos híbridos.

Figura 10 - – Número de artigos por tecnologia de tratamento do CM



Pela análise da

Figura 10 observa-se a predominância dos processos eletroquímicos. Este fato pode estar relacionado ao fato de o CM ser um efluente com alta salinidade proporcionando uma adequada condutividade elétrica. Ainda que Brillas et al. (2015) tenham apontado como vantagens desta tecnologia de tratamento o uso de equipamentos simples, de fácil operação e alta eficiência energética. Chopra et al., (2011) destacam como desvantagens a necessidade de substituição dos eletrodos sacrificiais devido à sua oxidação e desgaste, a perda de eficiência do processo devido à formação de uma película de óxido impermeável que se forma à superfície do catodo além dos custos elevados associados à utilização de corrente elétrica

Dentre os processos eletroquímicos encontram-se a oxidação eletroquímica (REN et al., 2021; YAZICI et al., 2020; ZANG et al., 2020; XUE et al., 2020; CUI et al., 2018; ZHOU et al., 2016), a eletrocoagulação (GUVENC et al., 2019a; FERNANDES et al., 2019; TOP et al., 2011) e os processos de eletro Fenton (WANG et al., 2020b; VARANK et al., 2020; GUVENC et al., 2019a; FERNANDES et al., 2019; HU et al., 2018 e WANG et al., 2012).

Em busca de otimização das tecnologias existentes, diversos autores buscam como alternativa a utilização de mais de um processo de tecnologia. Os processos denominados híbridos neste trabalho são aqueles em que foram empregados a combinação entre os métodos físicos, químicos e/ou biológicos. Tang et al. (2020) realizaram uma pesquisa visando estabelecer um processo combinado que fosse eficiente e econômico para a remoção de matéria orgânica recalcitrante presente no concentrado de membrana de osmose inversa. Tendo como DQO inicial um valor de 4018 ± 50 mg/L. Conforme demonstra a Tabela 1 –, foram realizados três experimentos com a combinação do tratamento físico-químico de carvão ativado (CA) e floculação com hidróxido de cálcio com a ozonização havendo uma melhoria de redução da DQO de 87,62% para 95,85%.

Tabela 1 – Resultados obtidos pelo processo híbrido realizado por Tang et al. (2020)

Processos	DQO inicial (mg/L)	DQO final (mg/L)	redução DQO (%)
s/ pré-tratamento + CA/O ₃	4018	498	87,62
Pré-tratamento Ca(OH) ₂ + CA/O ₃	4018	245	92,88
Pré-tratamento Ca(OH) ₂ /O ₃ + CA/O ₃	4018	163	95,84

Percentual de redução médio de DQO por tecnologia de tratamento dos artigos selecionados

A Tabela 2 apresenta as faixas de percentual de redução de DQO referente a cada tecnologia de tratamento além da redução média. Pela análise da Tabela 6 observa-se que a utilização do processo de foto fenton para o tratamento do CM de lixiviado de aterro foi o processo que obteve a melhor média de redução de DQO (81%) juntamente com o processo híbrido (80,95%)

Tabela 2 – Faixa de redução e redução média de DQO por tecnologia de tratamento

Tecnologia de tratamento	faixa de redução de DQO	redução média de DQO dos trabalhos
Ozonização	43,2%-87,63%	66,47%
Oxidação por sulfato	53,3%-93,5%	69,06%
Eletroquímico	45%-99%	71,79%
Fenton	6,6%-90%	74,00%
Coagulação química	60%-90%	75,04%
Híbrido	58,7%-95,85%	80,95%
Foto Fenton	45%-94,8%	81,00%

Diferentemente do processo Fenton onde ocorre a reação do peróxido de hidrogênio com os íons ferrosos para a formação do radical hidroxila, o processo de foto fenton baseia-se na otimização do processo Fenton, onde a radiação UV é utilizada para converter o H_2O_2 em radicais livres de hidroxila além da regeneração de Fe^{2+} através de foto-redução de Fe^{3+} promovendo a total mineralização dos contaminantes.

Segundo Tejera et al. (2020), o processo de foto Fenton degrada efetivamente a maioria dos poluentes orgânicos do CM e aumenta significativamente a razão DBO_5/DQO .

Entretanto, a hibridização de processos de tratamento demonstrou ser uma tecnologia tão eficaz quanto o processo de Foto fenton.

Ainda pela análise da Tabela 2, a ozonização demonstrou ser o processo com a pior média de redução de DQO, corroborando com a afirmação de Wang et al. (2016a) em que aponta como uma desvantagem a necessidade de combinação com outro processo devido às taxas de oxidação insatisfatórias.

Dentre os artigos analisados, Zhang et al. (2020) realizaram um estudo a partir de um lixiviado de aterro coletado na cidade de Changsha (província de Hunan, China). O lixiviado foi submetido ao tratamento bioquímico de dois estágios (Anóxico/Óxico), seguido por membranas de ultrafiltração e nanofiltração. Os autores realizaram uma oxidação eletrocatalítica para a degradação da matéria orgânica dissolvida do CM da NF tendo sido o estudo que obteve o maior percentual de redução da DQO ($99,0\% \pm 3,2\%$). O objetivo do estudo foi compreender as mudanças

estruturais da matéria orgânica dissolvida do CM de NF durante a oxidação eletrocatalítica utilizando espectroscopia UV-Visível combinada com análise de espectroscopia de correlação bidimensional. A análise espectral UV-visível demonstrou que a ligação dupla do carbono aromático foi efetivamente quebrada pela oxidação eletrocatalítica, resultando na diminuição da aromaticidade e massa molar dos compostos orgânicos presentes no CM.

O apêndice B apresenta as DQO do concentrado oriundo do processo de separação por membrana podendo ser observada uma ampla variação de valores na ordem entre 724 mg/L (Hong et al. 2017) a 26771mg/L (Koc-Jurczyk et al. 2019), não sendo possível apresentar uma análise mais profunda pois os artigos não deixam claro se o lixiviado foi submetido a algum outro tratamento anterior ao PSM.

Tejera et al. (2020) ao estudar a implementação de alternativas de tratamento para o CM de osmose inversa tendo como intuito de reduzir os custos dos tratamentos de POA propôs que fosse realizado um pré tratamento no CM coagulação/floculação foi proposto para reduzir DQO, cor e absorção de UV em 254 nm [4,34,35]

Vantagens e desvantagens dos processos de tratamento do CM de PSM

Quadro 7 resume as principais vantagens e desvantagens dos processos de tratamento do CM citados pelos autores selecionados nesta RS.

Quadro 7 - Vantagens e desvantagens de cada processo de tratamento do CM

Tecnologia de tratamento	Vantagens	Desvantagens
Coagulação química	Técnica simples e econômica, promissora para a remoção de matéria orgânicos dissolvidos e melhora a biodegradabilidade do CM (LONG et al. 2017).	Processo requer escolha adequada do coagulante a ser usado pois o tipo e a concentração afetam a eficiência de redução de carbono orgânico dissolvido. Geralmente, é utilizado como pré-tratamento ou tratamento para polimento final (TEJERA et al. 2020).
Ozonização	Alto potencial de oxidação do ozônio para degradar moléculas orgânicas complexas em moléculas de baixo peso molecular. (WANG et al. 2017). Possibilidade de utilização de	Pode ser influenciado negativamente pela presença de íons carbonato, que podem atuar como captador de radicais OH* (TANG et al. 2020). Processo com longa duração, alto custo e taxas de

	catalisadores para a otimização da oxidação aumentando a eficiência do tratamento. (HE et al. 2018).	oxidação insatisfatórias com a necessidade de combinação com outro processo (WANG et al. 2016a).
Oxidação por sulfato	Persulfato é uma substância sólida à temperatura ambiente de fácil armazenagem e transporte, estável, solúvel em água e baixo custo (LAU et al. 2007).	Em casos de poluentes múltiplos o sulfato reage mais lentamente que a hidroxila. O sulfato pode interagir com a água causando diminuição do pH (GENC et al. 2019).
Fenton	Pode ser utilizado para aumentar a biodegradabilidade do CM (HE et al. 2015). Eficaz na destruição das estruturas aromáticas resultando na diminuição nos pesos moleculares. (TENG et al. 2020).	Faixa estreita de pH de trabalho, produção de grande quantidade de lodo férrico, dificuldade de reciclagem do catalisador (Fe^{2+}) (XU et al. 2017b).
Foto Fenton	Utilização de luz visível pode atuar como um desinfetante, inativando microrganismos nas águas residuais. (MIERZWA et al. 2018 apud WANG 2016c) O processo foto fenton é uma ferramenta viável para a remoção de PAEs (ésteres de ftalato) gerando a remoção da estrogenicidade e genotoxicidade (HOU et al. 2017).	A presença de altas concentrações de substâncias orgânicas não biodegradáveis e sais orgânicos podem afetar o processo de tratamento de foto fenton (ZHAO et al. 2020).
Eletroquímico	Requer equipamento simples, operação simples, adequação para automação, alta eficiência energética, baixa produção de lodo e nenhuma exigência química (TOP et al. 2011). Oxidação eletroquímica é um processo adequado para o tratamento de águas residuais que têm alta salinidade e condutividade, como é o caso do CM (WANG et al. 2012).	Geralmente requer um pré ou pós-tratamento. Sofre influência de diferentes variáveis: tempo de eletrólise, densidade de corrente, tipo de eletrodo, DQO (TOP et al. 2011).
híbrido	São eficientes no tratamento do CM com relação DBO_5/DQO muito baixo (CHEN et al. 2019). Chen et al. (2018) combinaram ozonização com o processo de coagulação aumentando a remoção dos orgânicos que apresentaram resistência à coagulação.	Quanto mais processos envolvidos, maior é o número de variáveis a serem controladas tornando o processo mais complexo e oneroso.

5. CONCLUSÃO

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

A Revisão Sistemática pode ser utilizada como um instrumento capaz de mapear trabalhos publicados no tema de pesquisa específico para auxiliar ao pesquisador na elaboração de uma síntese do conhecimento existente sobre o assunto.

A partir da apresentação dos resultados obtidos nesta RS referente aos processos empregados no tratamento do concentrado de membrana oriundo do tratamento de lixiviado de aterros sanitários os artigos encontrados foram categorizados, para efeitos didáticos em sete grupos distintos: coagulação química, ozonização, oxidação química a base de sulfato, Fenton, Foto Fenton, processos eletroquímicos e processos híbridos.

Dentre os processos mais utilizados encontram-se os processos eletroquímicos (15 artigos científicos) e os processos híbridos (12 artigos científicos) correspondendo a aproximadamente 57% dos estudos elegíveis.

Verificou-se que a maior parte dos artigos (67%) realizou o tratamento do concentrado de membrana proveniente do lixiviado tratado pelo processo de separação por nanofiltração, enquanto 29% utilizaram o tratamento do concentrado de membrana proveniente de osmose inversa.

Ao analisar as faixas de redução e as reduções médias de DQO por tecnologia de tratamento pôde-se constatar que os processos de foto fenton e híbrido foram os que obtiveram maiores reduções médias de DQO com 81% e 80,95%, respectivamente. Enquanto que as faixas de redução destes processos variaram entre 45%-94,8% e 58,7%-95,85% nessa devida ordem.

Em termos numéricos absolutos o processo de coagulação química foi o processo que obteve maior redução da DQO presente no CM tendo conseguido uma eficiência de 90% de redução de uma DQO inicial de 21220mg/L.

Cerca de 93% dos artigos da seleção apresentam dados de redução de DQO, porém apenas 38% e 29% apresentam percentual de redução de COT e Nitrogênio amoniacal, respectivamente, por esse motivo estes parâmetros não foram discutidos neste trabalho.

Com relação à escala de trabalho, 32 dos 44 artigos mencionaram a realização dos experimentos em escala de bancada enquanto os demais não fizeram menção à escala realizada.

Ao fazer uma análise comparativa entre as vantagens e desvantagens os autores dos processos envolvendo coagulação química, ozonização e Fenton apontam como vantagem a melhora da biodegradabilidade do concentrado de membrana. Do ponto de vista das desvantagens apontadas, a necessidade de um pré ou pós-tratamento foi apontada para os processos envolvendo a coagulação química, ozonização e para os processos eletroquímicos.

Uma lacuna identificada a partir deste trabalho foi que, em geral, os processos oxidativos não conseguem remover a salinidade do CM sendo necessário a hibridização do processo geralmente com processos físico-químicos. Porém, a salinidade além de ser um fator de interferência na eficiência do coagulante não é removida no tratamento físico químico, tornando-se um grande desafio para o tratamento do concentrado oriundo dos processos de separação por membranas aplicados ao tratamento do lixiviado de resíduos sólidos urbanos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2019/2020. São Paulo: ABRELPE, 2020. BRAGA JUNIOR, S. S.; PINHEIRO, L. R.

BHATT, A. H. et al. Estimating landfill leachate BOD and COD based on rainfall ambient temperature, and waste composition: Exploration of a MARS statistical approach. *Environmental Technology & Innovation* v. 8, p. 1–16, 2017.

BIDONE, R. F. Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por um sistema composto por filtros anaeróbios seguidos de banhados construídos: estudo de caso: Central de Resíduos do Recreio, em Minas do Leão/RS [livro eletrônico] - 2. ed. - São Paulo: Blucher, 2017.

BIOLCHINI, J.C.A., et al. Scientific research ontology to support systematic review in software engineering. *Advanced Engineering Informatics*, v.21, n.2, p.133-151, 2007

BRASIL, Ministério da Saúde. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos. Departamento de Ciência e Tecnologia. Diretrizes metodológicas: elaboração de revisão sistemática e metanálise de ensaios clínicos randomizados/ Ministério da Saúde, Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos, Departamento de Ciência e Tecnologia. – Brasília.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 15 de junho de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

BRERETON, P. et al. Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. *Journal of Systems and Software*, v. 80, n. 4, p. 571–583, 2007.

BRILLAS, E. et al. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review, *Appl. Catal. B Environ.* 166–167 (2015) 603–643, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.11.016>.

BRUGGEN B.V.D. et al. Reuse, treatment and discharge of the concentrate of pressure-driven membrane processes, *Environ. Sci. Technol.* 37 (2003) 3733–3738.

CALABRÒ, P. S. et al. Effect of the recirculation of a reverse osmosis concentrate on leachate generation: A case study in an Italian landfill. 2018.

CALABRÒ, P. S. et al. The landfill reinjection of concentrated leachate: Findings from a monitoring study at an Italian site. v. 181, p. 962–968, 2010.

CASTILHOS JR, A. B.; REICHERT, G. A. Projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários. CASTILHOS JR, A. B. (Coordenador). Florianópolis: UFSC, 2007.

CEMPRE/IPT. Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado / Coordenação geral André Vilhena. – 4. ed. – São Paulo (SP), 2020.

CHEN, W. et al. Degradation of refractory organic contaminants in membrane concentrates from landfill leachate by a combined coagulation-ozonation process. *Chemosphere*, v. 217, p. 411–422, 2019.

CHEN, W. et al. Enhanced degradation of refractory organics in concentrated landfill leachate by Fe-0/H₂O₂ coupled with microwave irradiation. *Chemical engineering journal*, v. 354, p. 680–691, 2018.

CHERYAN, M. Ultrafiltration and microfiltration handbook. Lancaster: Technomic, 1998. 526p.

CHOPRA, A.K. et al. Overview of Electrolytic treatment: An alternative technology for purification of wastewater. *Sch. Res. Libr.* 3, 191–206, 2011.

CHU, D. Y.; YE, Z. L.; CHEN, S. H. Interactions among low-molecular-weight organics, heavy metals, and Fe(III) during coagulation of landfill leachate nanofiltration concentrate. *Waste Management*, v. 104, p. 51–59, 2020.

COOKE, A. et al. Beyond pico the spider tool for qualitative evidence synthesis. *Qualitative Health Research*, vol. 22, no. 10, pp. 1435-1443, 2012.

COSSU, R. *Solid Waste Landfilling - Multibarrier Principles in Landfilling*, Elsevier, 2018.

COSTA, B. S. et al. *Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos: direitos e deveres*. Rio de Janeiro: Lúmen Juris, 2013.

CUI, Y. H. et al. Electrochemical/peroxydisulfate/Fe³⁺ treatment of landfill leachate nanofiltration concentrate after ultrafiltration. *Chemical engineering journal*, v. 353, p. 208–217, 2018.

DALM, C. et al. Prática baseada em evidências, aplicada ao raciocínio diagnóstico. *Rev Latino-am Enfermagem*, maio-junho;13(3):415-22, 2005.

DE ALMEIDA, R. et al. Treatment of landfill leachate by a combined process of coagulation-flocculation and nanofiltration. In: *Sixteenth International Waste Management and Landfill Symposium*, S. Margherita di Paula, Cagliari, Italy, 2017.

DE-LA-TORRE-UGARTE-GUANILO, M. C.; TAKAHASHI, R. F.; BERTOLOZZI, M. R. Systematic review: general notions. *Revista da Escola de Enfermagem da USP*, [S. l.], v. 45, n. 5, p. 1260-1266, 2011. DOI: 10.1590/S0080-62342011000500033

DONATO, H.; DONATO, M. Stages for Undertaking a Systematic Review. v. 32, n. 3, p. 227–235, 2019.

DOS SANTOS, H.A.P. et al. Ammonia recovery from air stripping process applied to landfill leachate treatment. *Environ Sci Pollut Res* 27, 45108–45120 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10397-9>.

EL FADEL, M. et al. Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content. *Waste management*, v.22, p.269-282, 2002.

FERNANDES, A. et al. Performance of Electrochemical Processes in the Treatment of Reverse Osmosis Concentrates of Sanitary Landfill Leachate. *MOLECULES*, v. 24, n. 16, 2019.

FERNANDO, R. Performance of photo-Fenton process mediated by Fe (III) - carboxylate complexes applied to degradation of landfill leachate. *Biochemical Pharmacology*, 2017.

FERRAZ, F. M. et al. Ammonia removal from landfill leachate by air stripping and absorption, *Environmental Technology*, 34:15, 2317-2326, 2013. DOI: 10.1080/09593330.2013.767283

FIORE, F.A. Avaliação de um sistema integrado de tratamento de resíduos sólidos urbanos e de chorume, com ênfase na fase metanogênica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Brasil. 2004.

GALVÃO T.F., Pereira M.G. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. *Epidemiol Serv Saude*. 2014 jan-mar;23(1):183-4.

GENC, N. et al. Simultaneous optimization of treatment efficiency and operating cost in leachate concentrate degradation by thermal-activated persulfate catalysed with Ag (I): comparison of microwave and conventional heating. *Journal of microwave power and electromagnetic energy*, v. 53, n. 3, p. 155–170, jul. 2019.

GIORDANO, G., et al. Tratamento do Chorume do Aterro Metropolitano de Gramacho, Rio de Janeiro, Brasil. In: XXVIII Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental. Cancun, México. 2002.

GUVENC, S. Y. et al. Optimization of COD removal from leachate nanofiltration concentrate using H₂O₂/Fe⁺²/heat - Activated persulfate oxidation processes. *Process safety and environmental protection*, v. 126, n. B, p. 7–17, jun. 2019a.

GUVENC, S. Y. et al. Performance of electrocoagulation and electro-Fenton processes for treatment of nanofiltration concentrate of biologically stabilized landfill leachate. *Journal of water process engineering*, v. 31, 2019b.

HABERT, A. C. et al. *Processos de separação por membranas*. Rio de Janeiro: Editora E-papers, 2006.

HE, R. et al. Effect of Fenton oxidation on biodegradability, biotoxicity and dissolved organic matter distribution of concentrated landfill leachate derived from a membrane process, *Waste Management*, Volume 38, 2015, Pages 232-239.

HE, L. et al. Synergistic heat/UV activated persulfate for the treatment of nanofiltration concentrated leachate, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 208, 2020.

HENDRYCH, J. et al. Stabilisation/solidification of landfill leachate concentrate and its residue obtained by partial evaporation. *WASTE MANAGEMENT*, v. 95, p. 560–568, jul. 2019.

HENIGIN, P. L. A. Effects of the return of membrane-filtration concentrates on the new formation of leachate. In: *Proceedings Sardinia*. 1993. p. 933-934.

HIGGINS, J.P.T. et al. *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions* version 6.1 (updated September 2020). Cochrane, 2020. Available from www.training.cochrane.org/handbook.

HONG M. et al. Advanced treatment of landfill leachate membrane concentrates: performance comparison, biosafety and toxic residue analysis. *Water Sci Technol*. 2018 Dec;76(11-12):2949-2958. doi: 10.2166/wst.2017.469.

HU, Y. et al. Effect of the structure of stacked electro-Fenton reactor on treating nanofiltration concentrate of landfill leachate. *Chemosphere*, v. 202, p. 191–197, jul. 2017.

HU Y. et al. Effect of the structure of stacked electro-Fenton reactor on treating nanofiltration concentrate of landfill leachate. *Chemosphere*. 2018 Jul;202:191-197. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.03.103. Epub 2018 Mar 16.

HUANG, J. et al. Treatment of nanofiltration concentrates of mature landfill leachate by a coupled process of coagulation and internal micro-electrolysis adding hydrogen peroxide. v. 3330, n. October, 2015.

HUNCE, S. Y. et al. Solidification/stabilization of landfill leachate concentrate using different aggregate materials. *Waste Management*, v. 32, n. 7, p. 1394–1400, 2012.

JI, F. et al. Treatment of reverse osmosis (RO) concentrate from an old landfill site by Fe⁰/PS/O₃ process. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 92. 10.1002/jctb.5277. (2017).

KALLEL A. et al. Co-management of landfill leachate concentrate with brick waste by solidification/stabilization treatment. *Arab. J. Geosci.* 10 (2017).

KATEB, M. EL et al. Electrochemical advanced oxidation processes using novel electrode materials for mineralization and biodegradability enhancement of nanofiltration concentrate of landfill leachates. *Water research*, v. 162, 2020.

KELLEHER, B. P. et al. Advances in poultry litter disposal technology – a review”, *Bioresource Technology*, v. 83, pp. 27-36, 2002.

KEYIKOGLU R., et al. A review on treatment of membrane concentrates generated from landfill leachate treatment processes, *Separation and Purification Technology*, Volume 259, 2021.

KITCHENHAM, B. et al. Systematic literature reviews in software engineering - A systematic literature review. *Information and Software Technology*, v. 51, n. 1, p. 7–15, 2009.

KLOPPER, R. et al. The matrix method of literature review. *Alternation*, Cape Town, v. 14, n. 1, p. 262-276, 2007.

KOC-JURCZYK, J.; JURCZYK, L. Influence of pH in AOP on Humic Compounds Removal from Municipal Landfill Leachate Concentrate after Reverse Osmosis. *JOURNAL OF ECOLOGICAL ENGINEERING*, v. 20, n. 2, p. 161–168, 2019.

KULHAVY, M. et al. Electrodialysis as part of the integrated membrane process for landfill leachate treatment. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, v. 150, p. 49–57, 2019.

KURNIAWAN, T.A. et al. Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, B129, p. 80-100, 2006.

LABIADH, L. et al. Electrochemical treatment of concentrate from reverse osmosis of sanitary landfill leachate. *Journal of environmental management*. 181. 515-521. (2016). 10.1016/j.jenvman.2016.06.069.

LANGE, L.C. et al. Geração e Características do Lixiviado. Estudos de Caracterização e Tratabilidade de Lixiviados de Aterros Sanitários para as Condições Brasileiras. Rio de Janeiro: ABES, 2009. 362 p.

LAK M.G. et al. Application of quadratic regression model for Fenton treatment of municipal landfill leachate. *Waste Management*. 2012. 32:1895-1902.

LANER, D. et al. A review of approaches for the long-term management of municipal solid waste landfills. *Waste Management*. v. 32, p. 498–512, 2012.

LI, J. et al. Chemosphere Removal of refractory organics in nano filtration concentrates of municipal solid waste leachate treatment plants by combined Fenton oxidative-coagulation with photo e Fenton processes. *Chemosphere*, v. 146, p. 442–449, 2016.

LI, Z. et al. Electrochimica Acta Effective degradation of refractory organic pollutants in landfill leachate by electro-peroxone treatment. *Electrochimica Acta*, v. 102, p. 174–182, 2013.

LONG, Y. et al. Chemosphere Effective removal of contaminants in landfill leachate membrane concentrates by coagulation. *Chemosphere*, v. 167, p. 512–519, 2017.

LOPEZ, J. Estudo da potencialidade de processos oxidativos avançados, isolados e integrados com processos biológicos tradicionais, para tratamento de chorume de aterro sanitário. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Paraná, Brasil. 2005.

MAGAREY, J. M. Elements of a systematic review. *Int J Nurs Pract* December;7(6):376-82, 2001.

MAHMUD, K. et al. Different treatment strategies for highly polluted landfill leachate in developing countries. *Waste Management*. v. 32, p. 2096- 2105, 2012.

MARTTINEN, S. K. et al. Occurrence and removal of organic pollutants in sewages and landfill leachates. *The Science of the Total Environment*, v. 301, p. 1-12, 2002.

MASSE, L. et al. The use of membranes for the treatment of manure: critical literature review. *Biosystems Engineering*, v.98, p. 371-380. 2007.

MEDINA, E. U.; PAILAQUILÉN, R. M. B. A revisão sistemática e a sua relação com a prática baseada na evidência em saúde. *Revista Latino-Americana de Enfermagem*, Ribeirão Preto, v. 18, n. 4, p. 1- 8, jul./ago. 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rlae/v18n4/pt_23.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2020.

METCALF & EDDY – *Wastewater Engineering: Treatment and reuse*. 4a ed. Boston: Mc Graw Hill, 2003, 1819 p.

MIERZWA, J. C., et al. UV-Hydrogen Peroxide Processes. *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment*, 13–48. (2018). doi:10.1016/b978-0-12-810499-6.00002-4.

MOHAMMAD, A.W. et al. Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects. *Desalination*. 2015. 35: 226-254.

MOHER, D. et al. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses : The PRISMA Statement. v. 6, n. 7, 2009.

MORELLO, L. et al. Recirculation of reverse osmosis concentrate in lab-scale anaerobic and aerobic landfill simulation reactors. *Waste Management*, 2016.

MULROW, C.D. Rationale for systematic reviews. *BMJ*. 1994 Sep 3;309(6954):597-9. doi: 10.1136/bmj.309.6954.597. PMID: 8086953; PMCID: PMC2541393.

NAGALLI, A. *Gerenciamento de Resíduos Sólidos na Construção Civil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

OMAR, H. et al. Treatment of landfill waste, leachate and landfill gas: A review. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, v. 9, n. 1, p. 15–32, 2015.

OZTURK, I. et al. Advanced physico-chemical treatment experiences on young municipal landfill leachates. *Waste Management*. V. 23 p. 441-446, 2003.

PEREIRA, M. G.; GALVAO, T. F., Etapas de busca e seleção de artigos em revisões sistemáticas da literatura. *Epidemiol. Serv. Saúde*, Brasília, v. 23, n. 2, p. 369-371, jun. 2014.

POHLAND, F.G.; HARPER, S. R. *Critical review and summary of leachate and gas production from landfills*. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, U.S.A, 1986.

QIAO, M.; ZHAO, X.; WEI, X. Characterization and treatment of landfill leachate membrane concentrate by Fe²⁺/NaClO combined with advanced oxidation processes. SCIENTIFIC REPORTS, v. 8, 2018.

REN, X. et al. Science of the Total Environment Effective removal by coagulation of contaminants in concentrated leachate from municipal solid waste incineration power plants. Science of the Total Environment, v. 685, p. 392–400, 2019.

REN, X. et al. Effective treatment of spacer tube reverse osmosis membrane concentrated leachate from an incineration power plant using coagulation coupled with electrochemical treatment processes, Chemosphere, v. 244, 2020.

REN, X. et al. Treatment of membrane concentrated leachate by two-stage electrochemical process enhanced by ultraviolet radiation: Performance and mechanism. Separation and Purification Technology, n. October, p. 118032, 2021.

RUSSO, M. A. T. Avaliação dos processos de transformação de resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário. 2005. 320f. Tese (Doutoramento em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia. Universidade do Minho. Portugal. 2005.

SANTOS, A. S. P. Aspectos Técnicos e Econômicos do Tratamento Combinado de Lixiviado de Aterro Sanitário com Esgoto Doméstico em Lagoas de Estabilização/Ana Silvia Pereira Santos - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

SCHNEIDER, R. P. et al. Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2001. 234 p

SILVA, A. S. Avaliação da toxicidade dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande-PB. 2012. 129 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB.

SOOMRO, G. S. et al. Efficient removal of refractory organics in landfill leachate concentrates by electrocoagulation in tandem with simultaneous electro-oxidation and in-situ peroxone. *Environmental Research*, v. 183, 2020.

STEVENS, K.R. Systematic reviews: the heart of evidence based practice. *AACN Clin Issues* 2001 November;12(4):529-38.

TALALAJ, I. A. Mineral and organic compounds in leachate from landfill with concentrate recirculation. p. 2622–2633, 2015.

TALALAJ, I. A.; BIEDKA, P. Impact of concentrated leachate recirculation on effectiveness of leachate treatment by reverse osmosis. *Ecological Engineering*, v. 85, p. 185–192, 2015.

TANG, X. et al. Degradation Treatment of Concentrated Landfill Leachate by Catalytic Ozonation in a Microbubble Reactor Degradation Treatment of Concentrated Landfill Leachate by Catalytic Ozonation in a Microbubble Reactor. *Ozone: Science & Engineering*, v. 00, n. 00, p. 1–14, 2020.

TCHOBANOGLIOUS, G. & KREITH, F. (2002) *Handbook of solid waste management* 2. ed. New York: McGraw Hill. 833 p.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. *Wastewater engineering: treatment and reuse*. 4. ed. Boston: McGraw-Hill, 2003. 1819 p.

TCHOBANOGLIOUS, G; THEISEN, H; VIGIL, S. *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*. New York, NY: Irwin McGraw-Hill, 1993.

TEJERA, J. et al. Assessing an Integral Treatment for Landfill Leachate Reverse Osmosis Concentrate. *Catalysts*. 2020.

TENG, C. et al. Elucidating the structural variation of membrane concentrated landfill leachate during Fenton oxidation process using spectroscopic analyses. ENVIRONMENTAL POLLUTION, v. 256, jan. 2020.

TOP, S. et al. Characterization and electrocaogulative treatment of nano filtration concentrate of a full-scale landfill leachate treatment plant. v. 268, p. 158–162, 2011.

VAN HAANDEL, A. C. e MARAIS, G. O Comportamento do Sistema de Lodo Ativado: Teoria e Aplicações para Projetos e Operações. 1999.

VARANK et al. Central composite design for the advanced treatment of biologically treated leachate nanofiltration concentrate using zero-valent copper and iron activated persulfate. Desalination and water treatment. 208. 434-447. 10.5004/dwt.2020.26557, 2020a.

VARANK et al. Electro-activated peroxymonosulfate and peroxydisulfate oxidation of leachate nanofiltration concentrate: multiple-response optimization. International Journal of Environmental Science and Technology, v. 17, n. 5, p. 2707–2720, 2020c.

VELLOSO, M. P. Os restos na história: percepções sobre resíduos. Grupo de Direitos Humanos e Saúde, Escola Nacional de Saúde Pública, Fundação Oswaldo Cruz (2007). Rio de Janeiro RJ.

WANG Y.J. et al. Electro-Fenton treatment of concentrates generated in nanofiltration of biologically pretreated landfill leachate, Journal of Hazardous Materials 229 (2012).

WANG, H., et al. Removal of humic substances from reverse osmosis (RO) and nanofiltration (NF) concentrated leachate using continuously ozone generation-reaction treatment equipment, Waste Manag 56 (2016a) 271-279.

WANG, G. et al. Genotoxicity assessment of membrane concentrates of landfill leachate treated with Fenton reagent and UV-Fenton reagent using human hepatoma cell line. Journal of Hazardous Materials, v. 307, n. 601, p. 154–162, 2016c.

WANG, H. et al. The degradation processes of refractory substances in nanofiltration concentrated leachate using micro-ozonation. *Waste Management*, 2017.

WANG, Y. et al. Journal of Water Process Engineering Treatment of landfill leachate membrane filtration concentrate by synergistic effect of electrocatalysis and electro-Fenton. *Journal of Water Process Engineering*, v. 37, n. January, p. 101458, 2020.

WANG, Y. et al. Treatment of high-ammonia-nitrogen landfill leachate nanofiltration concentrate using an Fe-loaded Ni-foam-based electro-Fenton cathode. *Biochemical Pharmacology*, n. July, p. 104243, 2020b.

WILSON, D. et al. *Global Waste Management Outlook (2015)*. United Nations Environment Programme (UNEP) and International Solid Waste Association (ISWA).

WU, C. et al. A Review of the Characteristics of Fenton and Ozonation Systems in Landfill Leachate Treatment. (2020). *Science of The Total Environment*, 143131. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.143131

XIA, G. et al. The competition between cathodic oxygen and ozone reduction and its role in dictating the reaction mechanisms of an electro-peroxone process. *Water Res.* 2017 Jul 1;118:26-38. doi: 10.1016/j.watres.2017.04.005. Epub 2017 Apr 4. PMID: 28412550.

XU, Y. et al. Recovery of humic substances from leachate nanofiltration concentrate by a two-stage process of tight ultrafiltration membrane. *Journal of Cleaner Production*, 2017a.

XU, J. et al. Optimization of Fenton treatment process for degradation of refractory organics in pre-coagulated leachate membrane concentrates. *Journal of Hazardous Materials*. 323. (2017b). 10.1016/j.jhazmat.2016.10.031.

XUE, W. J. et al. Treatment of landfill leachate nanofiltration concentrate after ultrafiltration by electrochemically assisted heat activation of peroxydisulfate. *Separation and Purification Technology*, v. 231, 2020.

YANG, B.-Q. et al. Co-bioevaporation treatment of concentrated landfill leachate with addition of food waste. *BIOCHEMICAL ENGINEERING JOURNAL*, v. 130, p. 76–82, 2018.

YANG, Y. et al. Comparison of Halide Impacts on the Efficiency of Contaminant Degradation by Sulfate and Hydroxyl Radical-Based Advanced Oxidation Processes (AOPs), *Environmental Science & Technology* 48 (2014) 2344.

YAO, P. Perspectives on technology for landfill leachate treatment. *Arabian Journal of Chemistry*, p. 2-3, 2013.

YAZICI, G. et al., Degradation of refractory organics in concentrated leachate by the Fenton process: Central composite design for process optimization. *Front. Environ. Sci. Eng.* 15, 2. 2021.

YAZICI, G. et al. Electro - activated peroxymonosulfate and peroxydisulfate oxidation of leachate nanofiltration concentrate: multiple - response optimization. *International Journal of Environmental Science and Technology*, n. 0123456789, 2020.

YE, W. et al. Sustainable management of landfill leachate concentrate through recovering humic substance as liquid fertilizer by loose nanofiltration. *WATER RESEARCH*, v. 157, p. 555–563, jun. 2019.

YING, D. et al. Treatment of mature landfill leachate by internal micro-electrolysis integrated with coagulation: a comparative study on a novel sequencing batch reactor based on zero valent iron, *Journal of Hazardous Materials* 229-230 (2012) 426-433.

YOUNG S. Evidence-based management: a literature review. *J Nurs Manage* 2002 10(3):145-51.

YUE, D. et al. Experimentos em escala de laboratório aplicados ao projeto de um sistema de evaporação de combustão submersa de dois estágios, 27 (2007) 704–710.

ZANTA, V.M. e FERREIRA, C.F.A., Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos. Projeto PROSAB- Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003.

ZHANG L. et al. Characterization and removal of dissolved organic matter (DOM) from landfill leachate rejected by nanofiltration, *Waste Manage.* 29 (2009) 1035–1040.

ZHANG, G. et al. Aerobic SMBR/reverse osmosis system enhanced by Fenton oxidation for advanced treatment of old municipal landfill leachate. *Bioresource Technology.* 2013. 142:261-268.

ZHANG, A. et al. Removal of refractory organic pollutants in reverse-osmosis concentrated leachate by Microwave-Fenton process. *ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH*, v. 25, n. 29, SI, p. 28907–28916, 2018.

ZHANG, L. et al. Environmental and economic assessment of leachate concentrate treatment Check for technologies using analytic hierarchy process. *RESOURCES CONSERVATION AND RECYCLING*, v. 141, p. 474–480, 2019.

ZHANG, Z. et al. Chemosphere Degradation characteristics of dissolved organic matter in nanofiltration concentrated land fi ll leachate during electrocatalytic oxidation. *Chemosphere*, v. 255, p. 127055, 2020.

ZHAO, J. et al. Separation and Purification Technology Degradation of recalcitrant organics in nanofiltration concentrate from biologically pretreated land fi ll leachate by ultraviolet-Fenton method. *Separation and Purification Technology*, v. 235, n. May 2019, p. 116076, 2020.

ZHOU, B. et al. Electrochemical oxidation of biological pretreated and membrane separated landfill leachate concentrates on boron doped diamond anode. (2016). *Applied Surface Science.* 377. 10.1016/j.apsusc.2016.03.045.

APÊNDICE A

Referência	Tipo de membrana	Técnica de Tratamento do concentrado	escala do experimento	Redução DQO (%)	Redução COD (%)	DBO ₅ /DQO	pH inicial	redução NH ₃ - N (%)	Nitrogênio redução
Ren et al. 2021	Osmose Inversa	Processo eletroquímico+ UV	bancada	88,61%	86,28%		6,29	99,23%	96,88%
Yazici et al. 2021	Nanofiltração	Fenton	bancada	90%			3,99		
He et al. 2020	Nanofiltração	Persulfato ativado calor+UV	bancada	65,40%				51,40%	
Yazici et al. 2020	Nanofiltração	eletro-peroximonossul-fato (EPM) e eletro-peroxidisulfato (EPD)	bancada		56,91% e 58,43% para EPM e EPD		3 - 7		
Tejera et al. 2020	Osmose Inversa	coagulação e floculação		c/ Fe 76%; c/ Al 60%					
Tejera et al. 2020	Osmose Inversa	Foto-Fenton		45%	44%				
Tejera et al. 2020	Osmose Inversa	Adição de cal		90%					90%
Tang et al. 2020	Osmose Inversa	Pré tratamento Ca(OH) ₂ /O ₃ + CA/O ₃	bancada	95,85%		0,23	7,96		93,60%
Tang et al. 2020	Osmose Inversa	Pré tratamento Ca(OH) ₂ + CA/O ₃	bancada	92,88%		0,025			91,84%
Tang et al. 2020	Osmose Inversa	s/ pré tratamento. CA / O ₃	bancada	87,62%		0,151			87,62%

Referência	Tipo de membrana	Técnica de Tratamento do concentrado	escala do experimento	Redução DQO (%)	Redução COD (%)	DBO ₅ /DQO	pH inicial	redução NH ₃ - N (%)	Nitrogênio redução
Wang et al. 2020	Nanofiltração	Eletro catálise + Eletro Fenton	bancada	97,06%			8,63		
Wang et al. 2020b	Nanofiltração	Eletro Fenton+ Cátodo com Fe	bancada	79,90%			2,81	73,20%	
Zhang et al. 2020	Nanofiltração	Oxidação Eletrocatalítica	bancada	99%	57,40%				32,20%
Varank et al. 2020	Nanofiltração	Eletro Fenton		60,80%			2,9		
Soomro et al. 2020	Ultrafiltração/Nanofiltração/Osmose Inversa em série	Eletrocoagulação+Eletroxidação	bancada	92%			5,42		
Ren et al. 2020	Osmose Inversa	coagulação+eletroxidação+eletrocoagulação	bancada		96,19%		5,00	96,54%	88,21%
Zhao et al. 2020	Nanofiltração	Foto-Fenton eletroquímico /		92,80%			7,52		
Xue et al. 2020	Nanofiltração	peroxidisulfato / Fe ³⁺	bancada	87%			7,6		
Teng et al. 2020	Nanofiltração	Fenton	bancada	78,90%	70,20%	0,106	7,8-8,2		
Guvenc et al. 2019	Nanofiltração	Eletrocoagulação		57,40%	45,00%		7,74		
Guvenc et al. 2019	Nanofiltração	Eletro Fenton		69,40%	60,20%				
Ren et al. 2019	Nanofiltração	coagulação	bancada	67,62%			6,4		44,59%
Fernandes et al. 2019	Osmose Inversa	Eletro Fenton	bancada	45%					
Fernandes et al. 2019	Osmose Inversa	Eletrocoagulação	bancada	60%					
Genc et al. 2019	Nanofiltração	Persulfato ativado com microndas	bancada	53,30%					

Referência	Tipo de membrana	Técnica de Tratamento do concentrado	escala do experimento	Redução DQO (%)	Redução COD (%)	DBO ₅ /DQO	pH inicial	redução NH ₃ - N (%)	Nitrogênio redução
Genc et al. 2019	Nanofiltração	Persulfato ativado com aquecimento normal	bancada	20%					
Guvenc et al. 2019	Nanofiltração	H ₂ O ₂ - Persulfato ativado calor	bancada	56,90%			10,8		
Guvenc et al. 2019	Nanofiltração	Fe ²⁺ - Persulfato ativado calor	bancada	76,20%			2		
Guvenc et al. 2019	Nanofiltração	Persulfato ativado calor	bancada	93,50%			10,9		
Chen et al. 2019	Osiose Inversa	coagulação+ ozonização	bancada	88,32%			7,64		
Koc-Jurczyk et al. 2019	Osiose Inversa	Fenton	bancada	6,6%-26,5%		0,14(início) e 0,33 (após tratamento)	6,49		
Chen et al. 2018	Nanofiltração+ Osiose	microondas (MW) - Fe ⁰ / H ₂ O ₂	bancada	58,70%		0,02	7,62		88,30%
Cui et al. 2018	Nanofiltração	eletroquímico / peroxidisulfato / Fe ³⁺	bancada	55%			7,6		
Zhang et al. 2018	Osiose Inversa	microondas (MW) + Fenton	bancada	84%		0,51	6,35		
Qiao et al. 2018	Nanofiltração	Coagulação+ Fenton	bancada	60%					
Qiao et al. 2018	Nanofiltração	Coagulação+foto eletroxidação	bancada	86%					
Hu et al. 2018	Nanofiltração	Eletro Fenton	bancada	71%			7,5		
He et al. 2018	Nanofiltração	Processo baseado em Ozonização		70%			7,3		

Referência	Tipo de membrana	Técnica de Tratamento do concentrado	escala do experimento	Redução DQO (%)	Redução COD (%)	DBO ₅ /DQO	pH inicial	redução NH ₃ - N (%)	Nitrogênio redução
Hong et al. 2017	Nanofiltração	Fenton	bancada	69,10%			2-3		
Hong et al. 2017	Nanofiltração	Foto-Fenton	bancada	80,10%			7,5		
Wang et al. 2017	Nanofiltração	Processo baseado em Ozonização		76%	69,90%	0,055	9		
Ji et al. 2017	Osiose Inversa	Sistema combinado Fe ⁰ / PS / O ₃		84,10%		0,01(inicial) e 0,25(pós-tratamento)	7,69		
Hou et al. 2017	Nanofiltração	Foto-Fenton		94,80%					
Xu et al. 2017b	Nanofiltração	Fenton		69,60%	68,90%		4,1		
Long et al. 2017	Nanofiltração	Coagulação com FeCl ₃	bancada	82%	81%		4,00		
Labiadh et al. 2016	Osiose Inversa	Oxidação anódica+ Eletro Fenton		60%		0,43	8,1	33%	22%
Wang et al. 2016a	Nanofiltração	Processo baseado em Ozonização	bancada	43,20%	5,62%		7,84		
Wang et al. 2016a	Osiose Inversa	Processo baseado em Ozonização	bancada	55,52%	10,50%		7,84		
Zhou et al. 2016	Osiose Inversa	Eletroxidação	bancada	87,50%			5,16	90%	
Wang et al. 2016c	Nanofiltração	Foto-Fenton	bancada	94,75%			8,2		
Li et al. 2016	Nanofiltração	Sistema combinado Fenton/Foto-Fenton	bancada	95,36%	93,45%	0,01	5		
Huang et al. 2015	Nanofiltração	Coagulação+ microeletrolise c/ H ₂ O ₂	bancada	79,20%	79,60%	0,03(início) 0,31(pós-tratamento)	4,00		
He et al. 2015	Nanofiltração	Fenton	bancada	63,50%		0,53	3		

Referência	Tipo de membrana	Técnica de Tratamento do concentrado	escala do experimento	Redução DQO (%)	Redução COD (%)	DBO ₅ /DQO	pH inicial	redução NH ₃ - N (%)	Nitrogênio redução
Li et al. 2013	Osiose Inversa	Sistema combinado Eletro-peroxona			87%				
Wang et al. 2012	Nanofiltração	Eletro Fenton			82%				51%
Top et al. 2011	Nanofiltração	Eletrocoagulação	bancada	45%			6,61-7		

APÊNDICE B

Referência	Redução DQO (%)	DQO inicial (mg/L)
Processo de coagulação química		
Tejera et al. 2020	76%	21220
Tejera et al. 2020	60%	21220
Tejera et al. 2020	90%	21220
Ren et al. 2019	67,62%	2550
Long et al. 2017	82%	4000
Processos Foto fenton		
Tejera et al. 2020	45%	21220
Zhao et al. 2020	92,80%	1280
Hong et al. 2017	80,10%	724
Hou et al. 2017	94,80%	2189
Wang et al. 2016c	94,75%	2172
Processos Fenton		
Yazici et al. 2021	90%	6800-7200
Teng et al. 2020	78,90%	3300
Koc-Jurczyk et al. 2019	6,6%-26,5%	26771
Hong et al. 2017	69,10%	724
Xu et al. 2017b	69,60%	1120
He et al. 2015	63,50%	3060
Processos eletroquímicos		
Ren et al. 2021	88,61%	2598
Wang et al. 2020	97,06%	1418,24
Wang et al. 2020b	79,90%	2567,39
Zhang et al. 2020	99%	2088,6
Varank et al. 2020	60,80%	5250
Xue et al. 2020	87%	1281
Guvenc et al. 2019a	57,40%	10000
Fernandes et al. 2019	45%	Não informado
Fernandes et al. 2019	60%	Não informado
Cui et al. 2018	55%	1281
Hu et al. 2018	71%	3100
Zhou et al. 2016	87,50%	3778,56
Top et al. 2011	45%	6200
Processos de oxidação por sulfato		
He et al. 2020	65,40%	1500
Genc et al. 2019	53,30%	Não informado
Guvenc et al. 2019b	56,90%	5575
Guvenc et al. 2019b	76,20%	5575
Guvenc et al. 2019b	93,50%	5575
Processo de Ozonização		
Tang et al. 2020	87,62%	4018
He et al. 2018	70%	1317,5
Wang et al. 2017	76%	2930
Wang et al. 2016a	43,20%	5846
Wang et al. 2016a	55,52%	2356

APÊNDICE B (cont.)

Referência	Redução DQO (%)	DQO inicial (mg/L)
Processo de Híbrido		
Tang et al. 2020	95,85%	4018
Tang et al. 2020	92,88%	4018
Soomro et al. 2020	92%	2520
Chen et al. 2019	88,32%	3855
Chen et al. 2018	58,70%	1501
Zhang et al. 2018	84%	2494
Qiao et al. 2018	60%	4700
Ji et al. 2017	84,10%	1247
Labiadh et al. 2016	60%	9900
Li et al. 2016	95,36%	3450
Huang et al. 2015	79,20%	6500