



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA QUÍMICA

**NÍVEL DE MATURIDADE DA PRODUÇÃO ACADÊMICA SOBRE CINZAS DE
CALDEIRAS: ESTUDO DE CASO**

MARIA LAURA DE SOUZA PEREIRA

Foz do Iguaçu
2023

**NÍVEL DE MATURIDADE DA PRODUÇÃO ACADÊMICA SOBRE CINZAS DE
CALDEIRAS: ESTUDO DE CASO**

MARIA LAURA DE SOUZA PEREIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Kátya Regina de Freitas Zara.


Foz do Iguaçu
2023

MARIA LAURA DE SOUZA PEREIRA

NÍVEL DE MATURIDADE DA PRODUÇÃO ACADÊMICA SOBRE CINZAS DE CALDEIRAS: ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **KATYA REGINA DE FREITAS ZARA**
Data: 01/11/2023 09:06:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Orientadora: Profa. Dra. Kátya Regina de Freitas Zara
UNILA




Profa. Dra. Andreia Cristina Furtado
UNILA

Documento assinado digitalmente
 **DANIEL TEOTONIO DO NASCIMENTO**
Data: 01/11/2023 10:00:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Daniel Teotonio do Nascimento
UNILA

Documento assinado digitalmente
 **PRISCILA FERRI COLDEBELLA**
Data: 01/11/2023 10:22:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Priscila Ferri Coldebella
UDC

Documento assinado digitalmente
 **RENATA BRAGA SOARES**
Data: 01/11/2023 09:24:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Renata Braga Soares
UFMG

Foz do Iguaçu, 27 de outubro de 2023.

Dedico este trabalho a minha mãe, Priscila Alegre, a quem eu honro com todas as minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Priscila Alegre e Paulo Maurício pelo imensurável apoio afetivo, emocional e financeiro para que eu pudesse ter essa oportunidade. A minha mãe, eu agradeço profundamente por ser meu porto seguro, minha maior inspiração e quem eu honro todos os dias, obrigada por confiar em mim, ser minha maior incentivadora e acreditar que eu pudesse chegar aqui sem nem eu mesma saber. Esse diploma é nosso. Ao meu pai, eu agradeço por me apresentar um mundo novo cheio de possibilidades para que eu pudesse me transformar na profissional que hoje me consagro. Obrigada por aceitar ser meu pai e por todo suporte e paciência que teve para me impulsionar a estar aqui hoje, como uma pessoa melhor. Gostaria de estender meu agradecimento aos meus avós, Shirlei Alegre e Idivan Pereira, que estiveram presentes em toda minha trajetória, me apoiando e por serem minha inspiração de força, perseverança e a quem eu busco dar muito orgulho em todos os momentos da minha vida.

Ao meu namorado, Leonardo Gubiani, eu agradeço por estar presente em grande parte desse processo, pelo apoio e parceria em todos os momentos. Obrigada por confiar em mim, me incentivar em todos os momentos, fazer eu me sentir a mulher mais inteligente, linda e feliz do mundo. Serei eternamente grata por tudo e vamos juntos colher os frutos dos nossos esforços fortalecendo ainda a família que construímos com a Jóia e a Pérola.

À minha duplinha de sempre, Gustavo, que eu amo como um irmão e que passou por absolutamente todos os perrengues e conquistas na universidade. Aos meus amigos Gabriel Zago, Izadora Assis, Kaue Matias, Leticia Vivian, Luis Guilherme, Daniel Mota, Andrew Venturini e Hugo Andrade, pelo companheirismo, trucos em qualquer momento do dia e todos os nossos momentos que estão para sempre em minha memória.

À professora Kátya, pelos anos de orientação e companheirismo, pelos ensinamentos, além da motivação e confiança ao longo do processo que impactaram tão profundamente no meu desenvolvimento pessoal e profissional. Estendo meus agradecimentos aos demais professores do curso de Engenharia Química e a todos os outros que estiveram presentes ao longo da minha graduação.

Por fim, a UNILA, por me proporcionar um pedacinho de toda a América Latina, além de um ensino gratuito e de qualidade.

“Nascemos para manifestar a glória do Universo que está dentro de nós. Não está apenas em um de nós: está em todos nós. E conforme deixamos nossa própria luz brilhar, inconscientemente damos às outras pessoas permissão para fazer o mesmo. E conforme nos libertamos do nosso medo, nossa presença, automaticamente, liberta os outros”.

Nelson Mandela

RESUMO

Em diversos processos industriais, as caldeiras se apresentam como os equipamentos essenciais de fonte de energia para as utilidades, ao atuar na geração de vapor e tratamento de fluidos. Por possuir alta volatilidade em processos de combustão, a biomassa se apresenta como o combustível mais viável para a produção de vapor, visto seu potencial econômico. Com o aumento da utilização da biomassa, cresce também a geração de cinzas, como resíduo, desse processo. Esses resíduos, têm um elevado potencial para aplicação em diversos setores, entretanto as pesquisas precisam ser ampliadas. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo analisar a produção científica sobre o aproveitamento de cinzas, e seu potencial. Ademais, apresentar um estudo de caso, contendo sugestões para aumentar o Nível de Prontidão Tecnológica (TRL – *Technology Readiness Level*), a fim de torná-lo um potencial produto. Para isso, foi realizado uma revisão sistemática da literatura com metanálise conforme as diretrizes do protocolo PRISMA. Ao aplicar os critérios de elegibilidade propostos, a metanálise retornou oito estudos para revisão. Observou-se que produção científica brasileira está alinhada com as tecnologias nos setores produtivos, visto que 37,5% dos estudos correspondem ao setor de construção e apresentou indícios de maior potencial de desenvolvimento tecnológico. A partir destas informações, realizou-se a avaliação do nível TRL dos estudos selecionados. Os estudos apresentaram um TRL médio de 5,5, valor este que apresenta que a tecnologia está em fase de prototipagem e escalonamento, ainda distante do produto que possa ser, de fato, comercializado. Dentre os estudos, foi selecionado um trabalho para realizar o estudo de caso. A análise e sugestões para aumento do nível TRL foi proposta para um sistema de tratamento de efluentes que visa a adsorção de fármacos em efluentes. Para este estudo de caso, foi apresentada a viabilidade técnica e econômica de implementação, e sugestões para elevar a maturidade para o nível TRL 8, considerando a aplicação em escala comercial.

Palavras-chave: Revisão Sistemática; Cinzas de Biomassa; Escala TRL; Inovação Tecnológica; Economia Circular.

RESUMEN

En varios procesos industriales, las calderas se presentan como los equipos esenciales de fuente de energía para las utilidades, al actuar en la generación de vapor y tratamiento de fluidos. Debido a su alta volatilidad en los procesos de combustión, la biomasa se presenta como el combustible más viable para la producción de vapor, dado su potencial económico. Con el aumento del uso de la biomasa, también crece la generación de cenizas, como residuo, de este proceso. Estos residuos tienen un alto potencial para su aplicación en varios sectores, sin embargo, las investigaciones necesitan ser ampliadas. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es analizar la producción científica sobre el aprovechamiento de las cenizas y su potencial. Además, presentar un estudio de caso, con sugerencias para aumentar el Nivel de Preparación Tecnológica (TRL - Technology Readiness Level), con el fin de convertirlo en un producto potencial. Para ello, se realizó una revisión sistemática de la literatura con metanálisis de acuerdo con las directrices del protocolo PRISMA. Al aplicar los criterios de elegibilidad propuestos, el metanálisis devolvió ocho estudios para revisión. Se observó que la producción científica brasileña está alineada con las tecnologías en los sectores productivos, ya que el 37,5% de los estudios corresponden al sector de la construcción y mostraron indicios de mayor potencial de desarrollo tecnológico. A partir de esta información, se realizó la evaluación del nivel TRL de los estudios seleccionados. Los estudios presentaron un TRL medio de 5,5, valor que indica que la tecnología está en fase de prototipado y escalado, aún lejos del producto que pueda ser, de hecho, comercializado. Entre los estudios, se seleccionó uno para realizar el estudio de caso. El análisis y las sugerencias para aumentar el nivel TRL se propusieron para un sistema de tratamiento de efluentes que busca la adsorción de fármacos en efluentes. Para este estudio de caso, se presentó la viabilidad técnica y económica de implementación, y sugerencias para elevar la madurez al nivel TRL 8, considerando la aplicación a escala comercial.

Palabras clave: Revisión sistemática; Cenizas de biomasa; Escala TRL; Innovación tecnológica; Economía circular.

ABSTRACT

In various industrial processes, boilers present themselves as essential equipment for energy source for utilities, acting in the generation of steam and treatment of fluids. Due to its high volatility in combustion processes, biomass presents itself as the most viable fuel for steam production, given its economic potential. With the increase in the use of biomass, the generation of ashes, as a residue, from this process also grows. These residues have a high potential for application in various sectors, however research needs to be expanded. Therefore, the present work aims to analyze the scientific production on the use of ashes, and their potential. In addition, present a case study, containing suggestions to increase the Technology Readiness Level (TRL), in order to make it a potential product. For this, a systematic review of the literature was carried out with meta-analysis according to the PRISMA protocol guidelines. When applying the proposed eligibility criteria, the meta-analysis returned eight studies for review. It was observed that Brazilian scientific production is aligned with technologies in productive sectors, since 37.5% of the studies correspond to the construction sector and showed signs of greater technological development potential. From this information, the TRL level of the selected studies was evaluated. The studies presented an average TRL of 5.5, a value that shows that the technology is in the prototyping and scaling phase, still far from the product that can, in fact, be marketed. Among the studies, one work was selected to carry out the case study. The analysis and suggestions for increasing the TRL level were proposed for a wastewater treatment system that aims at the adsorption of drugs in effluents. For this case study, the technical and economic feasibility of implementation was presented, and suggestions to raise maturity to the TRL 8 level, considering application on a commercial scale.

Key words: Systematic Review; Biomass Ash; TRL Scale; Technological Innovation; Circular Economy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema básico de funcionamento de uma caldeira de cogeração.	19
Figura 2 - Esquema básico de uma caldeira flamotubular.....	20
Figura 3 - Esquema básico de uma caldeira aquatubular.....	21
Figura 4 - Esquema básico de uma caldeira elétrica.....	22
Figura 5 - Representação esquemática do processo Kraft de produção de papel e celulose.	23
Figura 6 - Representação esquemática de uma caldeira de recuperação química. .	24
Figura 7 - Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.....	25
Figura 8 - Rotas tecnológicas de conversão energética da biomassa.....	29
Figura 9 - Tecnologias de co-queima de biomassa.	32
Figura 10 - Termômetro representativo da escala TRL.....	39
Figura 11 - Fases e estado da técnica nos níveis de maturidade tecnológica.....	40
Figura 12 - Modelo conceitual de inovação aberta adotado pela Embrapa.....	41
Figura 13 - Interface da IMATEC Lite.	43
Figura 14 - Método avaliativo ITA.....	44
Figura 15 - Interface do aplicativo AVALchek.	45
Figura 16 - Autores de maior relevância na amostra via VOSviewer.....	49
Figura 17 - Seleção e avaliação dos estudos.....	50
Figura 18 - Resultado da análise da escala TRL utilizando AVALchek.....	51
Figura 19 - Ano de publicação dos estudos selecionados.....	54
Figura 20 - Países de publicação dos estudos selecionados.	54
Figura 21 - Estados brasileiros dos artigos selecionados.....	55
Figura 22 - Setores de estudos dos artigos.....	56
Figura 23 - Nível de TRL médio por setor.....	65
Figura 24 - Esquema do processo de adsorção de fármacos em efluentes.....	67
Quadro 1 - Classificação das caldeiras.	18
Quadro 2 - Principais vantagens e desvantagens dos combustíveis de biomassa. .	25
Quadro 3 - Definições dos níveis de maturidade tecnológica.....	39
Quadro 4 - Principais legislações brasileiras aplicadas à tecnologia.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação geral de caldeiras.....	18
Tabela 2 - Propriedades físicas, químicas e de combustão entre combustíveis de biomassa e carvão.	28
Tabela 3 - Análise das cinzas de diferentes tipos de biomassa (%).	37
Tabela 4 - Participação dos principais setores industriais nos estados brasileiros de publicação dos estudos selecionados.	55
Tabela 5 - Informações dos estudos selecionados (<i>Continuação</i>).	57
Tabela 6 - Avaliação dos estudos selecionados pelo aplicativo AVALchek (<i>Continuação</i>).	63
Tabela 7 - Nível de maturidade tecnológica dos estudos selecionados.	65
Tabela 8 - Dimensionamento dos equipamentos.	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAF	Associação Baiana das Empresas de Base Florestal
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEB	Agência Espacial Brasileira
ALP	Alprazolam
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BDZs	Benzodiazepínicos
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico
CTA	Coeficiente Técnico Atual
CT&I	Ciência, Tecnologia e Inovação
CTR	Coeficiente Técnico de Referência
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETEs	Estações de Tratamento de Esgoto
ILATIT	Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
IMATEC	Índice de Maturidade Tecnológica
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PD&I	Projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
PRISMA	<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses</i>
RCC	Resíduo de Casca de Caldeira
RQ	<i>Research Question</i>
SNC	Sistema Nervoso Central
SEFIP	Secretaria de Estruturas Financeiras e de Projetos
TRL	<i>Technology Readiness Level</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 CALDEIRAS EM PROCESSOS INDUSTRIAIS	18
2.1.1 Caldeiras Flamotubulares	20
2.1.2 Caldeiras Aquatubulares	20
2.1.3 Caldeiras Elétricas	22
2.1.4 Caldeiras de Recuperação Química	22
2.2 BIOMASSA	23
2.2.1 Definição	23
2.2.2 Principais Fontes de Biomassa	26
2.3 CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA	27
2.4 COMBUSTÃO DE BIOMASSA	30
2.5 CINZAS GERADAS PELA COMBUSTÃO EM CALDEIRAS	31
2.5.1 Deposição das Cinzas	34
2.5.2 Caracterização das Cinzas	35
2.5.3 Destinação das Cinzas	38
2.6 MATURIDADE TECNOLÓGICA	38
2.6.1 Modelos de Medição de TRL	41
2.6.1.1 Calculadora IMATEC	42
2.6.1.2 Calculadora TRL IAE-ITA 2020	42
2.6.1.3 AVALchek	45
2.6.1.4 Calculadora TRL – MCTI	46
3 METODOLOGIA	47
3.1 METODOLOGIA DE ABORDAGEM	47
3.2 REVISÃO SISTEMÁTICA	47
3.3 ANÁLISE DO NÍVEL DE MATURIDADE DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA	50
3.4 ESTUDO DE CASO	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA	53
4.2 COMO A PRODUÇÃO DAS CINZAS PROVENIENTE DA QUEIMA DE BIOMASSA EM CALDEIRAS É ABORDADA NA LITERATURA?	60
4.3 AVALIAÇÃO DA MATURIDADE TECNOLÓGICA DOS ESTUDOS SELECIONADOS	62
4.4 ESTUDO DE CASO	65

4.4.2 <i>Removal of Alprazolam in Contaminated Waters: Evaluation of Alternative Adsorbents</i>	66
4.4.3 Sistema de Remoção de Fármacos com Adsorvente à Base de Cinzas de Caldeiras	67
4.4.4 Próximos Passos para Alcançar o TRL 9	69
5 CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS	73
APÊNDICE A – CHECKLIST PRISMA	83
APÊNDICE B – MEMORIAL DE CÁLCULOS PARA O DIMENSIONAMENTO	86

1 INTRODUÇÃO

Em sua maioria, os processos industriais necessitam de uma fonte de energia para as utilidades, que é oriunda de sistemas de produção de vapor, como a caldeira. O custo de produção do vapor depende do tipo de combustível utilizado, geralmente, é biomassa. Por possuir alta volatilidade, a biomassa oferece vantagem no processo de combustão, ao ser comparada com outros combustíveis. Independentemente do tipo de biomassa utilizada nas caldeiras para geração de vapor, para processos industriais diversos, a composição das cinzas após a queima, dependerá da eficiência da combustão (completa ou incompleta).

Segundo Nunes et al. (2016), em um processo de geração de vapor em uma usina de cogeração, cerca de 50 toneladas de cinzas são produzidas mensalmente. Com o aumento do uso de biomassa como combustível para geração de calor e energia, o uso de cinzas a fim de minimizar os impactos ambientais e econômicos negativos que possam ocorrer é um fator de estudo na área de preservação ambiental (Nunes et al., 2016). Por isso, se faz necessário a caracterização das cinzas, para definir se devem ser descartadas ou reaproveitadas. Existem diversos artigos, teses e Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC) acerca do tema, entretanto, na maioria das vezes, os estudos não apresentam um nível de maturidade tecnológica para comercialização do produto desenvolvido pelas pesquisas.

Portanto, o objetivo geral deste trabalho é analisar o nível de maturidade da produção científica sobre reaproveitamento de cinzas de caldeira produzidas a partir de biomassa, para propor sugestões de melhoria no nível de maturidade de um estudo de caso. E tem-se como objetivos específicos:

- Realizar uma revisão sistemática da produção científica sobre reaproveitamento de cinzas de caldeira produzidas a partir de biomassa, aplicando o protocolo PRISMA;
- Analisar as metodologias e resultados dos estudos selecionados e determinar seu nível de maturidade;
- Analisar se os estudos possuem potencial técnico e econômico;
- Analisar se as publicações fazem parte de algum projeto de incentivo do governo;

- Determinar se a metodologia dos estudos pode ser aplicada em escala industrial;
- Realizar um estudo de caso, na qual as sugestões de adequações proporcionem o aumento do nível de maturidade para efetivar a comercialização do produto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, são apresentados conceitos sobre caldeiras, combustíveis, especialmente, biomassa, características das cinzas geradas pela combustão e as possibilidades de destinação. Ademais, os conceitos de maturidade tecnológica, Níveis de Prontidão Tecnológica (TRL – *Technology Readiness Level*) e as calculadoras disponíveis para uma análise preliminar do TRL.

2.1 CALDEIRAS EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

As caldeiras são equipamentos essenciais em diversos setores industriais, desempenhando um papel fundamental no tratamento de fluidos e na geração de vapor para alimentar processos produtivos. São classificadas de acordo com a pressão produzida. De acordo com a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 12177-1: Caldeiras estacionárias a vapor – inspeção de segurança – Parte 1: Caldeiras flamotubulares, as caldeiras são classificadas em três categorias (Quadro 1). Enquanto, de acordo com a Associação Nacional das Águas (ANA, 2009), as caldeiras são classificadas em quatro tipos (Tabela 1). Nota-se que tanto a classificação apresentada no Quadro 1 quanto na Tabela 1, levam em consideração a pressão produzida pelo sistema.

Quadro 1 - Classificação das caldeiras.

Categoria	Descrição
A	São aquelas cuja pressão de operação é igual ou superior a 1.960 kPa (19,98 kgf/cm ²).
C	São aquelas cuja pressão de operação seja superior a 588 kPa (5,99 kgf/cm ²) e o volume interno é igual ou inferior a 100 litros.
B	São todas as caldeiras que não se enquadram nas categorias anteriores.

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1999, p.6.

Tabela 1 - Classificação geral de caldeiras.

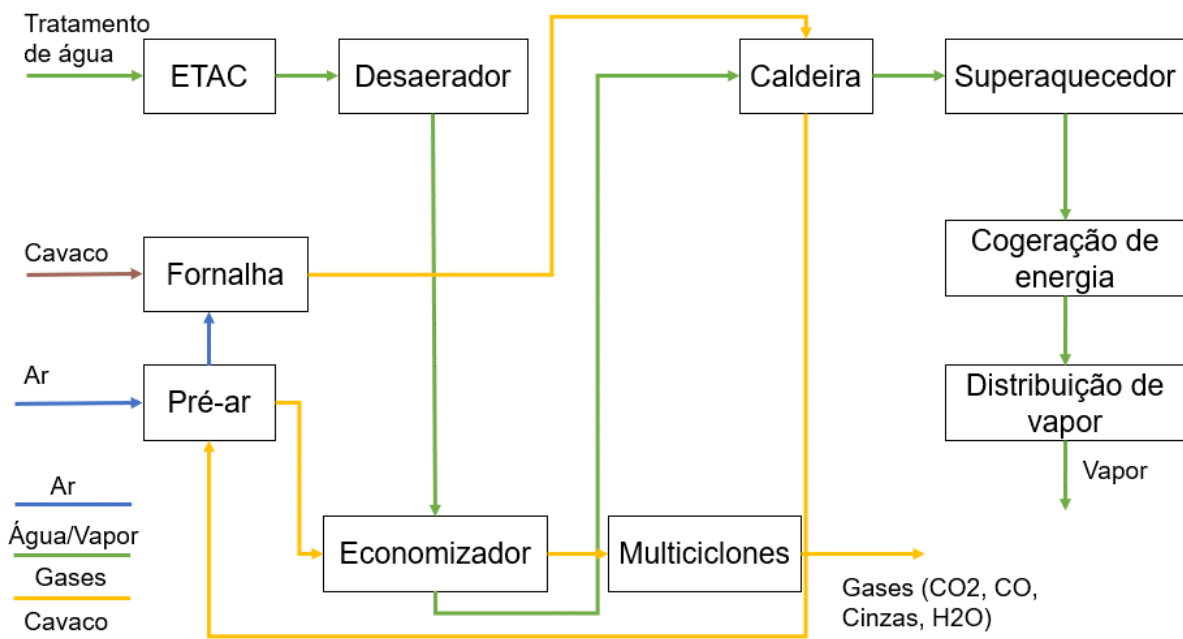
Caldeira	Pressão (Psig)	Pressão (kgf/cm²).
Baixa pressão	100 – 400	7 – 28
Média pressão	400 – 800	28 – 56
Alta pressão	800 – 3.000	56 - 211
Pressão supercrítica	Acima de 3.000	Acima de 211

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Águas, 2009, p. 150.

No Brasil, o vapor industrial, geralmente é produzido por caldeiras que funcionam com óleo, carvão, eletricidade ou biomassas. As caldeiras movidas a biomassas são as mais utilizadas e consomem diversos tipos de materiais vegetais, entre os mais comuns estão o bagaço de cana-de-açúcar, o cavaco de madeira, a lenha e a palha de arroz (ROCCO e MORABITO, 2012).

As empresas que utilizam biomassa residual, como bagaço de cana, na sua maioria, optam por caldeiras que possibilitam a cogeração de energia, A Figura 1 apresenta um esquema básico de uma caldeira de cogeração que utiliza biomassa como combustível.

Figura 1 - Esquema básico de funcionamento de uma caldeira de cogeração.



Fonte: Adaptado de Gimenes, 2012.

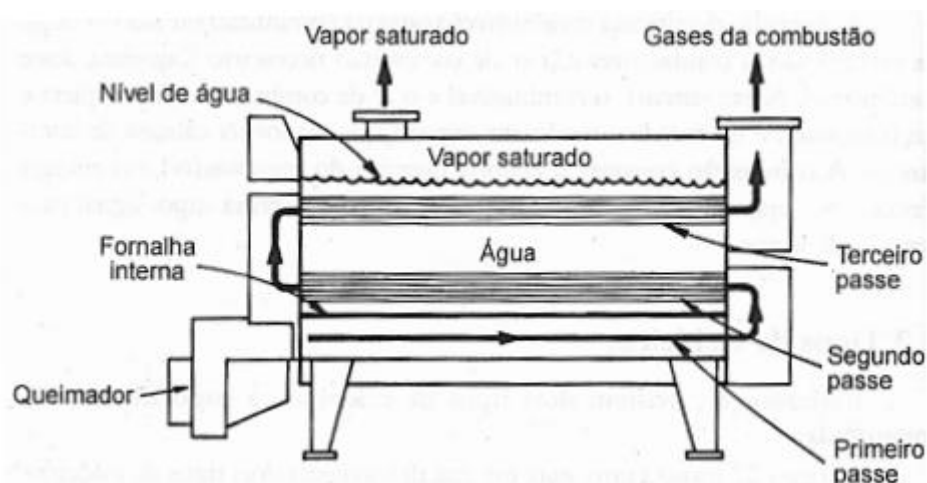
Para produção de vapor, os tipos mais comuns de caldeiras, são as aquatubulares, flamatubulares e elétricas. Entretanto, existem processos como na indústria de papel e celulose, no qual é necessário realizar a recuperação química de insumo. Neste caso, é utilizada a caldeira de recuperação química.

2.1.1 Caldeiras Flamotubulares

De acordo com a UFC 3-240-13FN, do *Department of Defense of United States of America* (Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América) (2005), caldeiras flamotubulares (Figura 2) são aquelas em que o fogo e o gás quente de combustão passam pelo interior dos tubos dos geradores de vapor e a água a ser transformada em vapor passa por fora dos tubos. São utilizadas na maior parte das unidades industriais de pequeno e médio porte (DUKELOW, 1991).

Segundo OYAMA (2017), o vapor é gerado pelo calor transferido dos gases quentes da combustão para a água que os circunda, através das paredes de material metálico dos tubos. O resfriamento desses gases de combustão é função, sobretudo, da condutividade e área dos tubos, e da diferença de temperatura entre os gases e água da caldeira (BEGA, 2003).

Figura 2 - Esquema básico de uma caldeira flamotubular.



Fonte: BEGA, 2003.

2.1.2 Caldeiras Aquatubulares

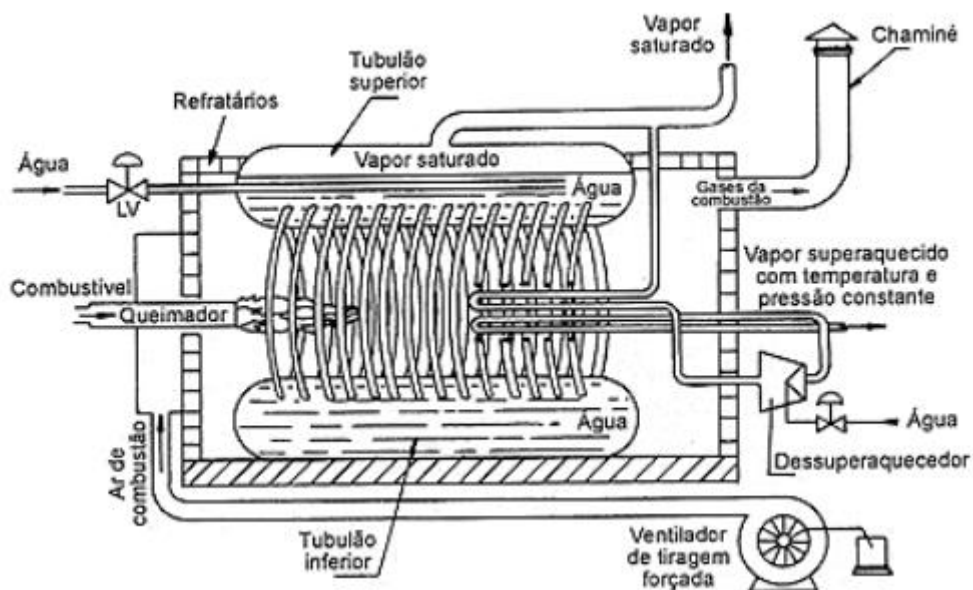
A caldeira aquatubular foi desenvolvida para gerar maiores quantidades de vapor e suportar níveis mais elevados de pressão do que a caldeira flamotubular. Conforme Leite e Militão (2008), nas caldeiras aquatubulares (Figura 3), há circulação de água por dentro dos tubos e os gases quentes por fora. Desta forma, o processo de

aquecimento dos tubos em que circula água é realizado com o calor transferido pelos gases de combustão obtidos pela queima do combustível com o ar de combustão no sistema de queimador (OYAMA, 2017).

A caldeira aquatubular possui tambores, que são recipientes utilizados para armazenar água e vapor. Os tubos estão localizados na zona inferior do equipamento e atravessam a zona da fornalha em contra-corrente com os gases de combustão. Isso garante que o aquecimento ocorra inicialmente numa zona mais fria para uma zona mais quente, com a água sendo exposta a temperaturas cada vez mais elevadas ao longo do seu trajeto (OYAMA, 2017). Depois de sair da rede de tubos, a água é levada para um tambor na zona superior da caldeira, onde a água coexiste em ambos os estados: gasoso e líquido.

A caldeira aquatubular é recomendada para empresas que precisam de alta capacidade de geração de vapor e energia sob pressões e temperaturas bastante elevadas. Como apanágio, o uso de vapor superaquecido aumenta a disponibilidade de energia, além de conferir um maior rendimento das turbinas em função do maior salto entálpico disponível (BEGA, 2003).

Figura 3 - Esquema básico de uma caldeira aquatubular.



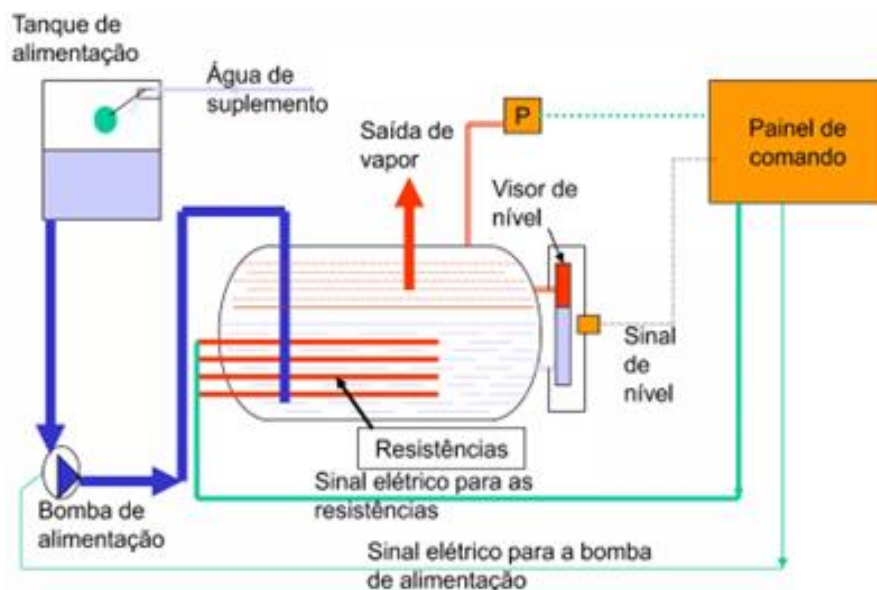
Fonte: BEGA, 2003.

2.1.3 Caldeiras Elétricas

Segundo Zarpelon e Azzolini (2015), as caldeiras elétricas (Figura 4) são convenientes quando houver abundância de energia elétrica e quando os custos forem compensadores. Sua aplicação é bastante restrita e são projetadas para fornecerem apenas vapor saturado.

As caldeiras elétricas têm o princípio de funcionamento baseado na conversão direta da energia elétrica em energia térmica, mediante o uso de resistências ou de eletrodos submersos (SAREV, 1998; BAZZO, 1995). É comumente utilizada para alimentar máquinas como autoclaves e reatores, nos mais diversos processos industriais, para esterilização de equipamentos, instrumentos ou detritos (ECAL, 2022).

Figura 4 - Esquema básico de uma caldeira elétrica.



Fonte: Vale, 2015.

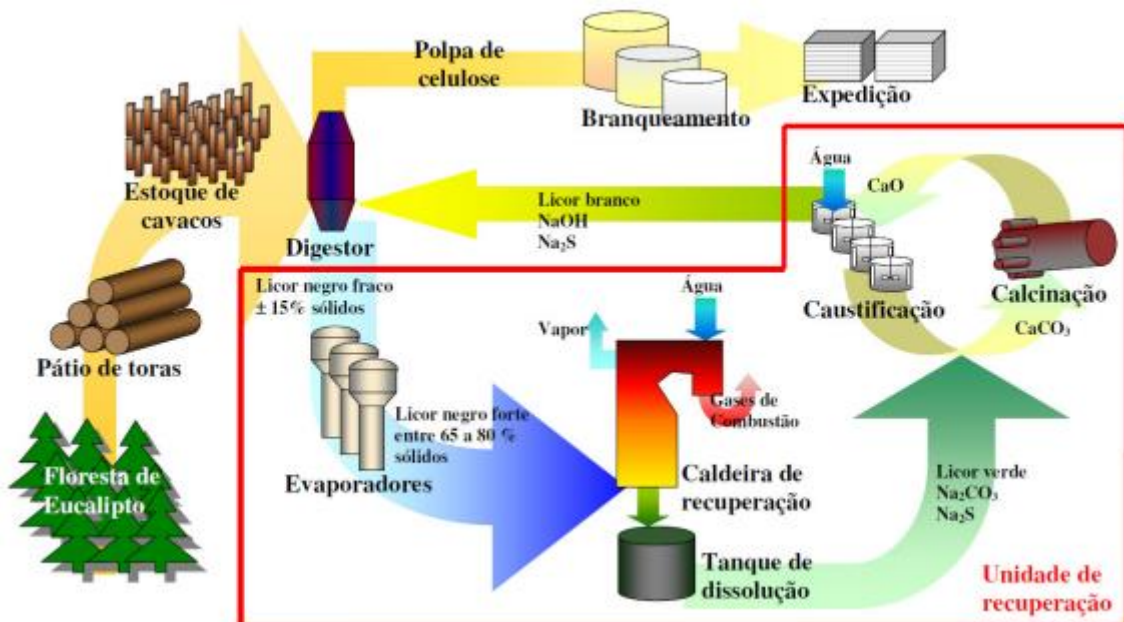
2.1.4 Caldeiras de Recuperação Química

Os princípios básicos das caldeiras de recuperação é a geração de vapor a partir da queima do licor negro, oriundo do processo de produção de papel e celulose, e a recuperação dos químicos utilizados no processo de cozimento. Na Figura 5 é apresentado o processo descrito como “Processo Kraft”, na qual consta a unidade de

produção de papel e celulose e de recuperação e utilidades.

A caldeira de recuperação representa, sozinha, até 20% dos custos da instalação de uma fábrica de papel e celulose (BREWSTER, 2007) e pode apresentar custos mais elevados em casos de especificações operacionais. Possui duas regiões básicas: zona de combustão do licor e a região de transferência de calor convectiva. A estrutura denominada nariz da caldeira delimita a fronteira entre a fornalha e a região dos acessórios. A Figura 6 apresenta um esquema representativo de uma caldeira de recuperação (FERREIRA, 2013).

Figura 5 - Representação esquemática do processo Kraft de produção de papel e celulose.



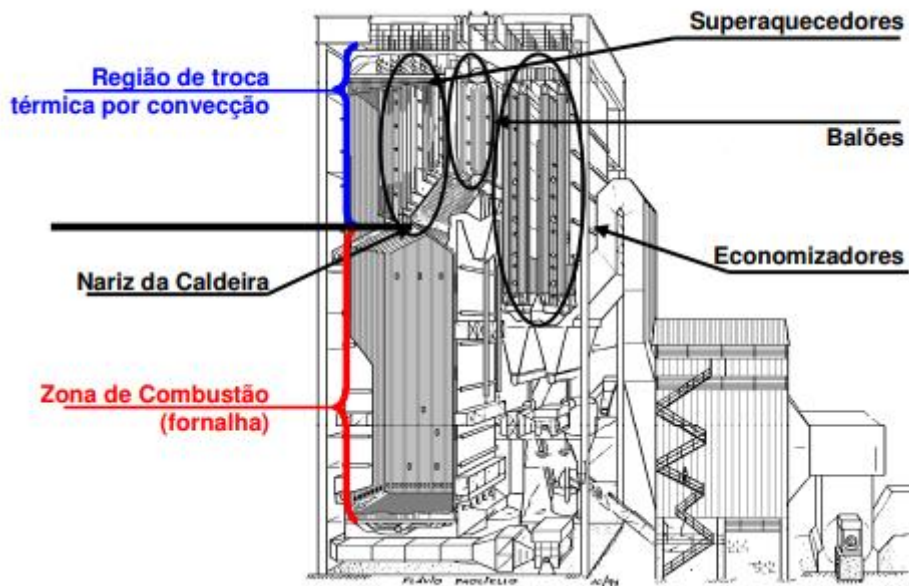
Fonte: Ferreira, 2007.

2.2 BIOMASSA

2.2.1 Definição

Para Saidur et al. (2011) biomassa é o nome dado a qualquer matéria orgânica derivada de plantas. Enquanto Vassilev et al. (2012) descreve a biomassa como contemporânea (não fóssil) e um produto sólido orgânico-inorgânico complexo formado por processos naturais e antropogênicos.

Figura 6 - Representação esquemática de uma caldeira de recuperação química.



Fonte: Paoliello et al., 2002.

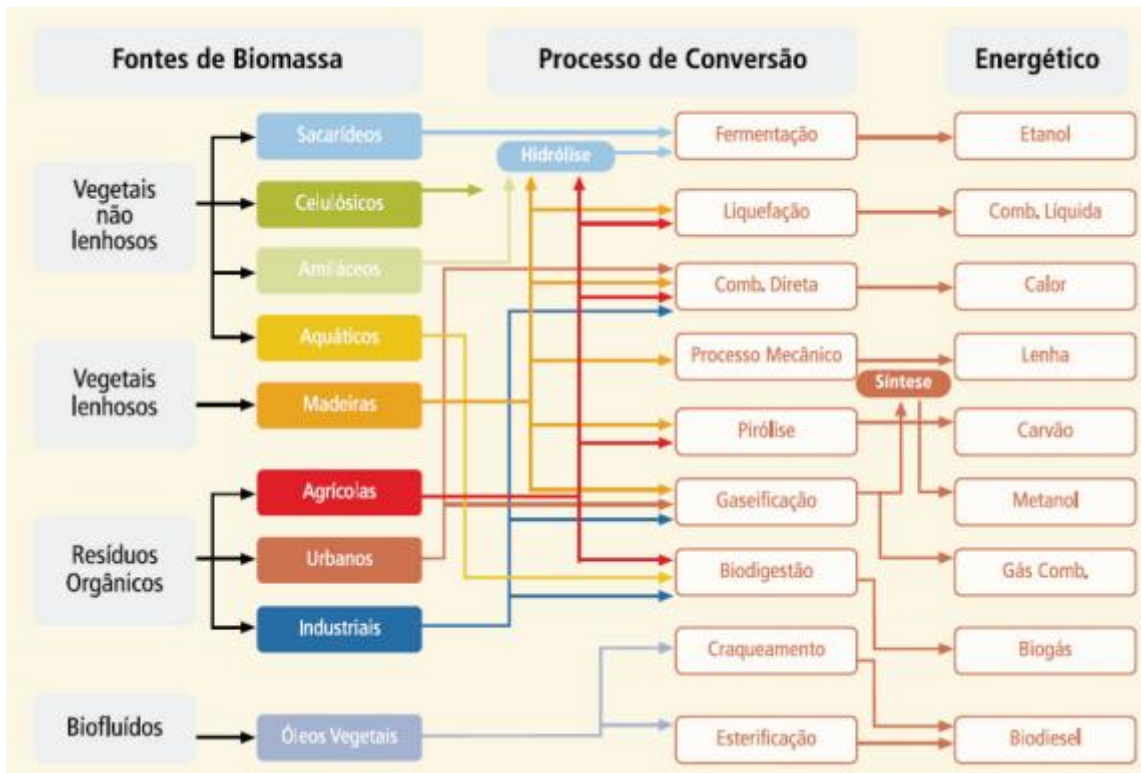
Os principais constituintes da biomassa são celulose, hemicelulose e lignina. As concentrações de cada classe de compostos variam dependendo da espécie, tipo de tecido vegetal, estágio de crescimento e condições de crescimento (Jenkins et al., 1998). Por isso, a análise estrutural da biomassa é importante no desenvolvimento de processos de produção de outros combustíveis e produtos químicos, e no estudo do fenômeno da combustão (SAIDUR et al., 2011).

As principais fontes de biomassa são caracterizadas por resíduos e culturas energéticas.

“As culturas energéticas incluem culturas lenhosas e culturas agrícolas. Os resíduos incluem resíduos de madeira, resíduos florestais, resíduos de culturas temperadas, resíduos de culturas tropicais, esgotos, resíduos sólidos urbanos e resíduos animais” (SAIDUR et al., 2011, p. 2267).

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2007), a biomassa para fins energéticos em geral, e particularmente como fonte para geração de energia elétrica, está entre as fontes renováveis com maiores possibilidades em termos de natureza, origem, tecnologia de conversão e produtos energéticos. A Figura 7 apresenta as diversificadas rotas para a utilização da biomassa como fonte energética.

Figura 7 - Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.



Fonte: ANEEL, 2005.

Segundo Saidur et al. (2011), “a utilização térmica da biomassa pode contribuir para a redução de emissões de CO₂, uma vez que a mesma quantidade de CO₂ é extraída do ar durante o período de crescimento das plantas”. O Quadro 2 apresenta as principais vantagens dos combustíveis de biomassa.

Quadro 2 - Principais vantagens e desvantagens dos combustíveis de biomassa.

Vantagens	Desvantagens
Fonte de combustível renovável e inesgotável.	Recurso de energia renovável incompleto em relação ao ciclo de vida completo.
Baixo teor de cinzas, C, S, N e vestígios.	Comumente altos teores de umidade, Cl, K, Na, Mn e alguns oligoelementos.
Grande reatividade durante a conversão.	Baixa densidade de energia.
Mitigação de emissões perigosas (CH ₄ , CO ₂ , NO _x , SO _x e resíduos separados).	Odor, emissão potencial e lixiviação de componentes perigosos durante o descarte e tratamento térmico.
Recurso relativamente barato.	Grande colheita, coleta, transporte, custo de armazenamento.
Pode ser co-queimado com combustíveis fósseis convencionais para reduzir as emissões e alcançar benefício econômico.	Poderia contribuir muito para o aquecimento global e poluição por partículas se queimado diretamente.

Fonte: Adaptado de Kamm, 2004 e Vassilev et al., 2010.

2.2.2 Principais Fontes de Biomassa

A biomassa é classificada como recurso energético nas categorias: a) biomassa energética florestal, seus produtos e subprodutos ou resíduos; b) biomassa energética agrícola, as culturas agroenergéticas e os resíduos e subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal; e c) rejeitos urbanos (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007).

Segundo a Associação Baiana das Empresas de Base Florestal (ABAF, 2023), floresta energética é uma floresta plantada e tem a biomassa para energia como principal produto. Conforme o Ministério de Minas e Energia (2007) inclui basicamente a biomassa lenhosa, produzida de forma sustentável a partir de florestas cultivadas ou de florestas nativas, obtida por desflorestamento de floresta nativa para abertura de áreas para agropecuária, ou ainda originada em atividades que processam ou utilizam a madeira para fins não energéticos.

“Seu aproveitamento no uso final energético se realiza, principalmente, através das rotas tecnológicas de transformação termoquímica mais simples, como combustão direta e carbonização, mas rotas mais complexas também são empregadas para a produção de combustíveis líquidos e gasosos, como metanol, etanol, gases de síntese, licor negro (um subproduto da indústria de celulose), entre outros;” (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007, p.104).

A biomassa energética agrícola é proveniente das plantações não florestais, tipicamente originados de colheitas anuais, cujas culturas são selecionadas segundo as propriedades de teores de amido, celulose, carboidratos e lipídios, contidos na matéria, em função da rota tecnológica a que se destina (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007).

Essa categoria de biomassa pode ser dividida em duas subcategorias: a) culturas agroenergéticas e subprodutos das atividades agrícolas e b) agroindustriais e da produção animal. As culturas agroenergéticas tem como objetivo a produção de óleos vegetais e biocombustíveis, na qual a cana-de-açúcar, oleaginosas, trigo, beterraba e soja integram as matérias-primas a serem exploradas.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2007), os subprodutos de atividades agrícolas têm suas possíveis aplicações muito diversificadas que variam segundo a rota tecnológica empregada, e pode variar desde a transformação termoquímica, com combustão direta, pirólise ou gaseificação, passando pelas transformações biológicas e físico-químicas, incluindo a digestão anaeróbica. O esterco

animal, casca de arroz e castanha de caju são exemplos de matérias-primas dessa subcategoria.

Os rejeitos urbanos correspondem ao lixo proveniente das cidades, com origem diversa.

“O lixo urbano é uma mistura heterogênea de metais, plásticos, vidro, resíduos celulósicos e vegetais, e matéria orgânica. As rotas tecnológicas de seu aproveitamento energético são: a combustão direta, a gaseificação, pela via termoquímica, após a separação dos materiais recicláveis, e a digestão anaeróbica, na produção de biogás, pela via biológica.” (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007, p. 104).

2.3 CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA

Durante a última década, o uso de combustíveis de biomassa para geração de energia ganhou importância crescente como uma “fonte de energia neutra em carbono seguindo as restrições globais de redução de emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE)” implementadas em usinas de energia de todo o mundo (RIZVI et al., 2015).

A biomassa é uma fonte de energia renovável com propriedades muito específicas. Comparada a outras tecnologias renováveis como solar ou eólica, a biomassa tem poucos problemas com armazenamento de energia (SAIDUR et al., 2011). A biomassa apresenta um nível de custo razoável em comparação com outras energias renováveis (DEMIRBAS, 2005).

Para alcançar um sistema de geração de energia estável, os requisitos impostos pelo combustível devem ser bem conhecidos. Uma vez que se faz necessário a adaptação das tecnologias de queima, para cada tipo de combustível, sejam resíduos industriais ou biomassa (LIU et al., 2012).

“Quando a biomassa é queimada, ou usada após convertê-la em outros tipos de combustível, como combustíveis sólidos, líquidos e gasosos (por exemplo, carvão, etanol, metano), o carbono da biomassa reage com o oxigênio do ar para formar dióxido de carbono que é liberado na atmosfera. Se totalmente queimado, a quantidade de dióxido de carbono produzida é igual à quantidade que foi retirada da atmosfera durante o estágio de crescimento. Portanto, não há adição líquida de CO₂ e a biomassa pode ser considerada um sumidouro de carbono. Isso é conhecido como o ciclo do carbono ou zero emissões de carbono” (SAIDUR et al., 2011, p. 2266).

O conhecimento do comportamento do combustível é essencial para um

projeto e operação seguros, estáveis e eficientes de equipamentos de combustão (HENNE et al., 2019).

Propriedades físico-químicas são as que estabelecem as principais diferenças entre a biomassa e outros combustíveis, como o carvão (Tabela 2). Em relação ao carvão, a biomassa geralmente tem menos carbono, mais oxigênio, maior teor de hidrogênio e maior componente volátil (SAIDUR et al., 2011). Para Nunes et al. (2019) “combustíveis de biomassa são intrinsecamente mais reativos que o carvão devido ao seu teor de oxigênio e voláteis orgânicos geralmente mais elevados”.

Tabela 2 - Propriedades físicas, químicas e de combustão entre combustíveis de biomassa e carvão.

Propriedade	Unidade	Biomassa	Carvão
Densidade do combustível	kg/m ³	500,0	1300,0
Tamanho da partícula	mm	3,0	100,0
Teor de Carbono	% úmida de combustível seco	43,0 - 54,0	65,0 - 85,0
Teor de Oxigênio	% úmida de combustível seco	35,0 - 45,0	2,0 - 15,0
Teor de Enxofre	% úmida de combustível seco	Máx. 0,5	0,5 - 7,5
SiO ₄	% úmida de combustível seco	23,0 - 49,0	40,0 - 60,0
K ₂ O	% úmida de combustível seco	4,0 - 48,0	2,0 - 6,0
Al ₂ O ₃	% úmida de combustível seco	2,4 - 9,5	15,0 - 25,0
Fe ₂ O ₃	% úmida de combustível seco	1,5 - 8,5	8,0 - 18,0
Temperatura de ignição	K	418,0 - 426,0	490,0 - 595,0

Fonte: Adaptado de Demirbas, 2004.

Muitos métodos podem ser aplicados para a conversão de biomassa em fonte de energia. As três principais rotas tecnológicas de conversão de biomassa são a conversão termoquímica, bioquímica e físico-química, conforme apresentado pela Figura 8. A conversão térmica é a principal, onde a combustão, gaseificação e pirólise são usadas para recuperar energia da biomassa (SAIDUR et al., 2011).

A conversão termoquímica é um processo que transforma a energia armazenada em moléculas orgânicas em energia térmica. Os produtos dos processos termoquímicos são divididos em uma fração volátil consistindo em gases, vapores e componentes de alcatrão de um carbono rico resíduo sólido (YAMAN, 2004).

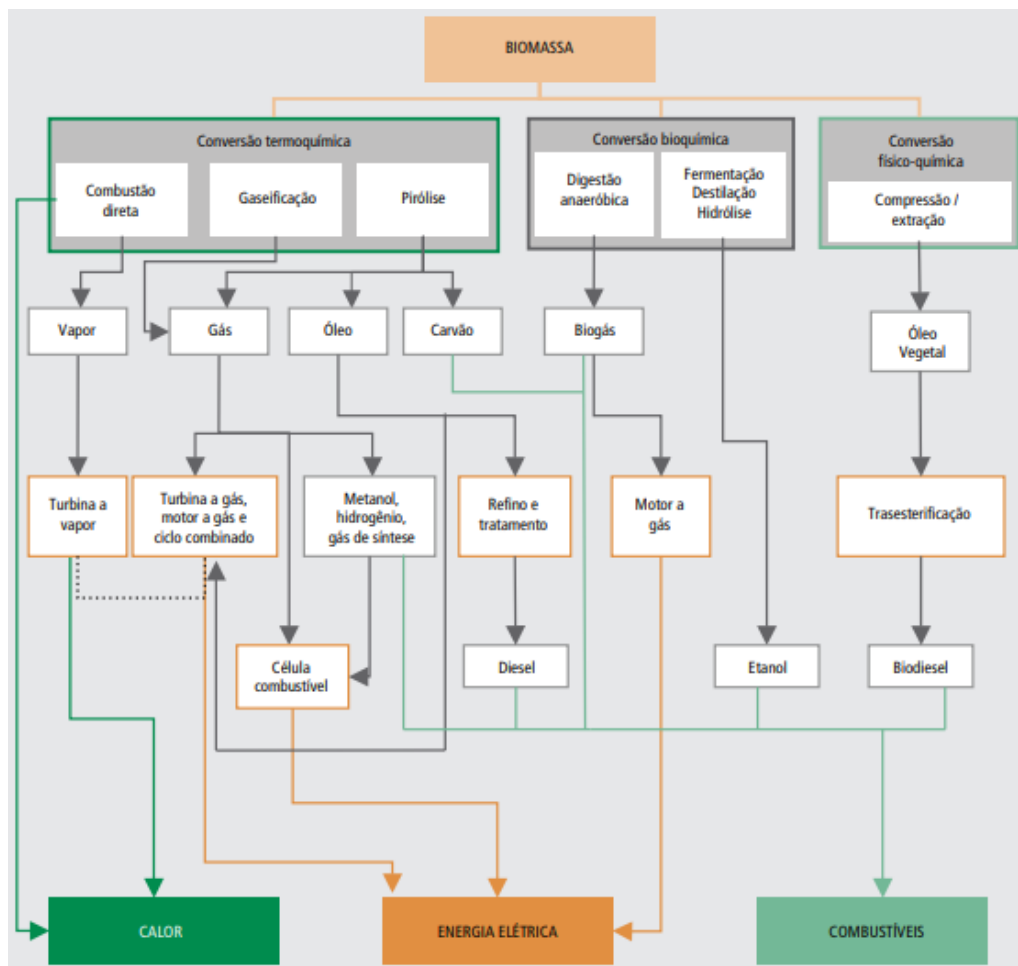
A biomassa pode ser queimada diretamente em usinas de transformação de resíduos em energia sem qualquer processamento químico para produzir vapor para fazer eletricidade (SAIDUR et al., 2011). A biomassa pode ser queimada para fornecer calor para indústrias e residências (DEMIRBAS, 2005).

O processo de conversão bioquímica da biomassa utiliza microrganismos e enzimas para converter a biomassa em combustíveis e produtos químicos. Existem várias rotas bioquímicas para a conversão da biomassa, incluindo a fermentação, a

digestão anaeróbica e a hidrólise enzimática (SAIDUR et al., 2011). A escolha da rota bioquímica de conversão da biomassa depende de vários fatores, incluindo o tipo de biomassa utilizada, o produto desejado e os custos associados ao processo.

A via de conversão físico-química da biomassa é aquela que utiliza técnicas de compressão e extração de óleos vegetais de oleaginosas para posterior modificação química por meio da esterificação (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007). Segundo Veringa, (2000) os óleos vegetais processados pela esterificação direta, podem ser utilizados diretamente em motores a combustão interna.

Figura 8 - Rotas tecnológicas de conversão energética da biomassa.



Fonte: Larkin et al., 2004 e Ministério de Minas e Energia, 2007, p.105.

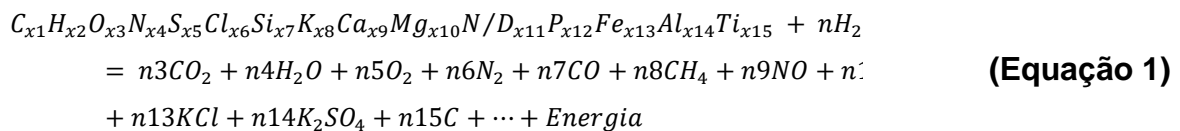
2.4 COMBUSTÃO DE BIOMASSA

A combustão é composta por um conjunto de fenômenos complexos que envolvem ocorrências de transferência de massa e calor que promove reações químicas simultâneas e fluxo de fluido (NUNES et al., 2019). As propriedades do combustível para a análise de combustão de combustíveis de biomassa podem ser convenientemente agrupadas em propriedades físicas, químicas, térmicas e minerais (SAIDUR et al., 2011).

A combinação de maior teor de oxigênio e matéria volátil na biomassa indica um potencial para criar grandes quantidades de vapores inorgânicos durante a combustão (NUNES et al., 2019). Quando exposta a um ambiente de alta temperatura, a estrutura orgânica pode sofrer decomposição térmica e liberar matéria volátil. Este processo é descrito como desvolatilização, com os principais produtos contendo gases leves (FRANSEN et al., 2011).

A combustão da biomassa é uma série de reações químicas pelas quais principalmente o carbono é oxidado em dióxido de carbono e o hidrogênio é oxidado em água (SAIDUR et al., 2011). Durante a combustão, partículas de biomassa com diferentes composições orgânicas e inorgânicas (composição elementar) irão se comportar de forma diferente (MOSIER et al., 2005, SAIDUR et al., 2011). A divisão de compostos inorgânicos influencia as propriedades e comportamento das cinzas em uma caldeira (BAXTER, 1993).

A reação geral que ocorre durante a combustão de biomassa na presença de ar pode assumir a forma apresentada pela Equação 1, onde o primeiro reagente representa um combustível de biomassa genérico (JENKINS et al., 1998).



“A inclusão de 15 elementos na fórmula empírica do combustível é incompleta. Existem muitos mais, especialmente no que diz respeito aos constituintes inorgânicos que são muito importantes para a questão da combustão de biomassa e problemas associados, como incrustações e escórias. O segundo termo reagente expressa a umidade no combustível. Se houver muita umidade, o combustível não reagirá espontaneamente. O terceiro termo representa o ar e é representado pela mistura binária simples de oxigênio e nitrogênio na proporção de volume de 21-79%. O lado do produto da reação é complexo” (SAIDUR et al., 2011, p. 2275).

As temperaturas de ignição e de pico são as temperaturas características mais importantes de um perfil de queima. A temperatura de ignição corresponde ao ponto em que o perfil de queima sofreu um aumento súbito, enquanto a temperatura de pico do perfil de queima é geralmente tomada como uma medida da reatividade da amostra (SAIDUR et al., 2011).

Existem muitas tecnologias de combustão disponíveis para a combustão de biomassa, tais como: combustão em leito fixo, combustão em leito fluidizado e combustão em leito pulverizado (SAIDUR et al., 2011). A combustão em leito fluidizado é a melhor tecnologia utilizada para queimar um combustível de baixa qualidade, alto teor de cinzas e baixo poder calorífico.

Segundo Saidur et al. (2011), a co-queima refere-se à combustão de biomassa e carvão para produção de energia. O método é muito viável para reduzir os impactos ambientais da combustão, visto que diminui as emissões de gases poluentes. A tecnologia de co-queima apresenta três técnicas: co-queima direta, co-queima paralela e co-queima disparo indireto. A Figura 9 apresenta o esquema de tecnologias de co-queima da biomassa.

“[...] (1) Co-queima direta que envolve a mistura de biomassa e carvão no sistema de manuseio de combustível e alimentação dessa mistura na caldeira. (2) Coqueima paralela pela qual a biomassa é preparada separadamente do carvão e injetada na caldeira sem impactar o sistema convencional de entrega de carvão. (3) Co-disparo indireto, na qual a biomassa é gaseificada e, em seguida, pode ser queimada em uma caldeira ou em uma usina geradora de turbina de combustão de ciclo combinado” (SAIDUR et al., 2011, p. 2278).

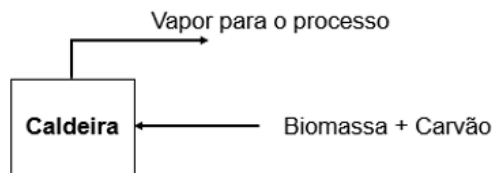
Problemas relacionados a incrustações e corrosão são um fator limitante para o uso da biomassa, pois as cinzas residuais do processo de combustão sofrem mudanças em sua composição. Com isso, fica estabelecido que devido a mudanças indesejadas na composição das cinzas, a proporção de biomassa é geralmente limitada a aproximadamente 20% da entrada de combustível (MCILVEEN-WRIGHT et al., 2011).

2.5 CINZAS GERADAS PELA COMBUSTÃO EM CALDEIRAS

A biomassa tem grande importância na produção de energia térmica. Esta biomassa para fins energéticos vem principalmente da floresta em todas as suas formas, ou seja, aquela transformada em cavacos de madeira após operações florestais

(ADANEZ et al., 2012). Estas aparas de madeira são utilizadas diretamente como combustível na produção de energia térmica por meio da combustão (NUNES et al., 2019). Neste processo de conversão térmica, os elementos orgânicos presentes no combustível sofrem oxidação total ou parcial, transformando a energia química em energia térmica (AHMADI et al., 2014).

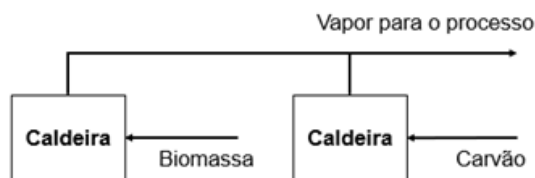
Figura 9 - Tecnologias de co-queima de biomassa.



(a) Co-disparo direto.



(b) Co-disparo indireto.



(c) Co-disparo paralelo.

Fonte: Adaptado de Al-Mansour; Zuwala, 2010, p. 34.

Durante a queima da biomassa, ocorre a formação de cinzas. Os elementos que as formam estão presentes na biomassa como sais que estão quimicamente ligados à estrutura do carbono (cinzas naturais) (HENNE et al., 2019). Os principais elementos químicos que podem ser encontrados nas cinzas de biomassa são potássio (K), cálcio (Ca), fósforo (P), silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe), titânio (Ti), sódio (Na) e magnésio (Mg) (VASSILEV et al., 2010). Uma fração desses compostos de cinzas são volatilizados e tornam-se parte da fase gasosa (WILLIAMS et al., 2012). A quantidade

volatilizada depende das características do combustível, a atmosfera ao redor da partícula e a tecnologia do queimador (VASSILEV et al., 2010). Por exemplo, uma alta temperatura de combustão e uma atmosfera redutora aumentam a volatilização de elementos ambientalmente relevantes, como metais pesados (Zn, Pb, etc.) (VASSILEV et al., 2013).

Durante a combustão ocorrem várias mudanças químicas e físicas dos minerais em altas temperaturas (ABRAHAM et al., 2013).

“A sílica derreterá parcial ou totalmente e interagirá quimicamente com outros componentes das cinzas, formando principalmente silicatos de metais alcalinos (K e Na). Os silicatos de alumínio sofrerão fusão parcial ou total. Carbonatos, oxalatos, cloretos e outros sais serão decompostos. Metais alcalinos e outros metais pesados serão volatilizados. As partículas sofrerão fragmentação por choque térmico e rápida emissão de gases, assim como as partículas minerais irão coalescer e aglomerar. O tipo de equipamento de combustão utilizado também é relevante em termos de comportamento das cinzas, uma vez que as condições de combustão são diferentes. Por exemplo, em equipamentos de leito móvel, a fusão de cinzas pode não ser tão problemático como é em situações de leito fixo, pois há menos coalescência das partículas fundidas” (NUNES et al., 2016, p. 4).

Detalhes de cada tipo de tecnologia de queima de biomassa, juntamente com seus efeitos correspondentes, podem ser encontrados em várias pesquisas e estudos técnicos (LI et al., 2012).

Segundo Nunes et al. (2019), o processo de formação de cinzas depende principalmente do tempo de residência e da temperatura à qual a partícula de biomassa foi submetida. Fryda et al. (2010) e Míguez et al. (2012) demonstraram que os testes laboratoriais devem avaliar pelo menos duas temperaturas: uma temperatura em que 15% da massa é líquida (considerada a temperatura na qual as partículas começam a amolecer, permitindo a aglomeração de depósitos de cinzas) e uma temperatura onde 70% da massa é líquido (considerado como a temperatura na qual a cinza flui como um líquido).

“O desempenho líquido-sólido das cinzas é um fenômeno muito complexo e depende principalmente de sua composição química. Outro estudo mostra que para pontos distantes do ponto eutético, a fusão ocorre ao longo uma faixa de várias centenas de graus, e a influência do teor de Cl nas cinzas é um fator importante na temperatura de fusão na qual os sólidos começam a amolecer. Por exemplo, cinzas sem Cl ou com um teor muito baixo. O conteúdo de Cl começa a fundir a 800°C e é completamente líquido a 1000°C” (NUNES et al., 2016, p. 5).

Por outro lado, cinzas com conteúdo de Cl próximo a 20% começam a fundir a 600°C e são totalmente fundidos a 800°C (TEIXEIRA et al., 2012).

Durante sua permanência no fogo da caldeira, as cinzas precipitam a baixas temperaturas e nucleam na superfície como partículas finas de CaO. Eles então tornam-se parte dos gases no que é chamado de “cinzas volantes” (Nunes et al., 2016). Além disso, as cinzas de fundo são separadas dos gases de combustão dentro do forno enquanto a temperatura ainda está alta, enquanto as cinzas volantes deixam o forno suspensas nos gases de combustão (ZHAI et al., 2022). Os vapores também podem condensar em partículas de cinzas volantes fragmentadas ou diretamente na superfície do equipamento de processo (ZHU; ZHUANG, 2012).

2.5.1 Deposição das Cinzas

A formação de depósitos de cinzas pode ser aproximadamente estimada a partir da composição química do combustível e como o material inorgânico presente no combustível está associado (NUNES et al., 2019).

O comportamento de fusão das cinzas é um fator importante na determinação da propensão dos diferentes combustíveis para formar depósitos de escórias, seja na grelha ou nas paredes da superfície da caldeira (NUNES et al., 2016).

Segundo Sommersacher et al. (2011), os problemas relacionados às cinzas nos sistemas de combustão de biomassa de queimadores e caldeiras estão associados à formação de aglomerados de cinzas parcialmente derretidas, sua influência na grelha e depósitos de escória no equipamento em altas temperaturas, bem como a formação, controle, uso, manuseio e descarte de resíduos de cinzas dos equipamentos de combustão de biomassa (NUNES et al., 2016).

A natureza dos problemas e seu impacto no desempenho do equipamento de combustão depende das características do combustível, bem como de projeto e operação de equipamentos de combustão e caldeiras (CHERNEY; VERMA, 2013). Os comportamentos das cinzas durante a combustão estão intimamente relacionados com as características do combustível de biomassa, que podem levar a maiores desafios relacionados a cinzas (NUNES et al., 2016).

Na queima de combustíveis com alto teor de cinzas e composição química que promovam efeitos corrosivos nas caldeiras, é importante reconhecer que a cinza é um fator importante a ser considerado no projeto e concepção do equipamento (LEINO et al., 2013). Os problemas associados à deposição de cinzas durante a operação

do equipamento ocorrem em todos os queimadores e caldeiras de biomassa (NUNES et al., 2016).

De acordo com Kumar et al. (2015), a diminuição da eficiência do queimador; danos no queimador e problemas de manutenção são alguns dos principais efeitos do aumento da deposição de cinzas, tendo assim, sua eficiência impactada negativamente. Segundo Tamura et al. (2012) é preferível evitar a deposição de cinzas, ou pelo menos mantê-la em um nível muito baixo em vez de usar métodos de limpeza, mas estes devem ser usados exaustivamente durante os programas de parada do equipamento.

2.5.2 Caracterização das Cinzas

A composição das cinzas de biomassa é fortemente dependente da espécie e parte da planta de biomassa (Tabela 3). Os nutrientes disponíveis, a qualidade do solo, os fertilizantes e as condições climáticas têm impacto significativo nos teores de compostos inorgânicos (SAIDUR et al., 2011).

A caracterização química das cinzas residuais do processo de combustão é de extrema importância para analisar o processo de queima como um todo. A composição é um código único que caracteriza aspectos fundamentais e determina as propriedades, qualidade, aplicações potenciais e problemas ambientais relacionados a qualquer combustível (HENNE et al., 2019). Nesse contexto, estudos de propriedades físicas e químicas têm sido utilizados para caracterização de combustíveis sólidos (VASSILEV; VASSILEVA, 2005).

Segundo Nunes et al. (2019), análises iniciais (cinzas, volatilidade, umidade e carbono fixo) e análises finais (carbono, hidrogênio, carbonatos, enxofre e oxigênio) são análises de rotina para biomassa. Os principais elementos analisados são Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, P, Mn e S. Essas análises são relatadas como óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , $\text{Na}_2\text{OK}_2\text{O}$, TiO_2 , P_2O_5 , MnO e SO_3). Essas análises de óxidos são amplamente usadas para determinar a propensão à escória do carvão, composição mineral e para prever a viscosidade das partículas de cinzas volantes e dos depósitos de escória (Nunes et al., 2019), Razões típicas de previsão de escória são a razão ácido/base, índice de escória, fator de escória e índice de incrustação (Menon; Rao, 2012). A caracterização de materiais minerais presentes em combustíveis, cinzas e outros

tipos de deposições podem ser obtidas com análise mineralógica e técnicas microscópicas (NUNES et al., 2019).

Devido a alterações complexas entre K, Cl, P, Si e Ca, cada elemento não pode ser avaliado individualmente sem incluir interações entre diferentes óxidos e composições de equilíbrio, condições operacionais e parâmetros de vapor gerado (Nunes et al., 2016). Por exemplo, um teor de Cl inferior a 0,1% não é suficiente para evitar problemas de corrosão com aquecedores com um vapor de alta temperatura (PISA; LAZAROIU, 2012).

Segundo Nunes et al. (2016), as cinzas de plantas, como árvores, que têm longos períodos reprodutivos, contêm grandes quantidades de óxidos com baixos pontos de fusão, principalmente K e P, diferentemente das plantas que são colhidas várias vezes ao ano. O teor de cinzas de diferentes formas de biomassa é variado e pode ser tão baixo quanto 0,5% em base seca para algumas espécies de madeira de polpa, ou até 20% para alguns cereais ou resíduos florestais e agrícolas, nomeadamente se estiverem contaminados com materiais inertes como pequenas pedras ou pó de rocha (GARBA et al., 2013).

O produto sólido gerado dentro do processo de pirólise é um resíduo carbonáceo e incombusto denominado de char (UDEN, 1993; Machado et al., 2011). Portanto, o biochar é um material rico em carbono, produzido a partir do processo de pirólise da matéria orgânica, que consiste na queima de biomassa sem a presença de oxigênio, ou de forma limitada a temperaturas geralmente menores de 700°C (IBI, 2015).

O biochar é um material multifuncional que é empregado, principalmente, como um condicionante de solo para imobilizar metais, aumentar a resistência pedológica à seca, para fertilizar e recuperar solos, sobretudo por intermédio do aumento do pH do solo (SCHMIDT, 2012), principalmente devido à sua elevada capacidade de retenção de água (VARTAPETYAN E VOLOSHCHUK, 1995; OGAWA et al., 2006).

“O biochar é altamente poroso, usualmente alcalino e apresenta grande área de superfície específica. Na pirólise cerca de 50% do carbono contido na biomassa original pode ser retido dentro do biochar. Possui uma forte estrutura aromática e é por isso bioquimicamente mais recalcitrante (difícil degradação) que muitas outras formas de matéria orgânica no solo. A sua oxidação no solo ocorre de forma lenta, o que leva à produção de grupos funcionais negativos na sua superfície, como o grupo carboxílico e fenólico. No entanto, a sua natureza recalcitrante não implica que este permaneça igual, sem mudanças, depois de aplicado ao solo. Sendo que o tempo em que o biochar se mantém estável é muito importante, estando ainda pouco claro, principalmente para diferentes fatores climáticos” (NÓBREGA, 2011, p.12).

Tabela 3 - Análise das cinzas de diferentes tipos de biomassa (%).

Combustível	Cl	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	Mn	MgO	CaO	Na₂O	K₂O	TiO₂	P₂O₅	SO₃
Pallets de madeira	NA	4,30	1,30	1,50	5,90	8,50	55,90	0,60	16,80	0,10	3,90	1,30
Pallets de girassol	NA	2,90	0,60	0,80	0,10	21,60	21,60	0,24	22,80	0,10	15,20	14,00
Casca de noz	0,10	23,10	2,40	1,50	NA	13,40	16,60	1,00	32,80	0,10	6,30	2,20
Casca de amêndoas	0,20	23,50	2,70	2,80	NA	5,20	10,50	1,60	48,50	0,10	4,50	0,80
Casca de azeitona	0,20	32,70	8,40	6,30	NA	4,20	14,50	26,20	4,30	0,30	2,50	0,60
Casca de avelã	0,10	33,70	3,10	3,80	NA	7,90	15,40	1,30	30,40	0,10	3,20	1,10
Madeira de carvalho	0,80	49,00	9,50	8,50	NA	1,10	17,50	0,50	9,50	NA	1,80	2,60
Palha de trigo	3,60	48,00	3,50	0,50	NA	1,80	3,70	14,50	20,00	NA	3,50	1,90
Casca de faia	-	12,40	0,12	1,10	-	11,50	62,20	0,90	2,60	0,10	2,30	0,80
Casca de Tamarack	-	7,77	8,89	3,83	-	9,04	53,50	3,40	5,64	0,11	5,00	2,77
Palha de arroz	-	77,20	0,55	0,50	-	2,71	2,46	1,79	12,59	0,04	0,98	1,18
Caroço de azeitona	-	67,7	20,3	0,05	-	0,05	0,5	11,20	0,15	0,05	-	-

Fonte: Adaptado de Saidur et al., 2011, p. 2272.

2.5.3 Destinação das Cinzas

A preocupação com os impactos gerados por meio de processos industriais são cada vez mais recorrentes. Com isso, muitas pesquisas sobre formas de reaproveitamento e tratamento de resíduos estão sendo desenvolvidas, sobretudo, sobre cinzas.

Vieira Pereira (2006) apresenta uma alternativa para o reaproveitamento de cinzas através de sua reinserção no ciclo produtivo. Para tal efeito, é proposto uma metodologia para aproveitar o potencial econômico do cromo presente na cinza, composto esse que possui muitas destinações em processos industriais.

As cinzas também podem ser aplicadas no setor de construção civil. Strieder (2021) propõe a incorporação das cinzas à matriz cimentícia, que são compostas de aglomerantes minerais, os quais podem conter agregados ou particulados, que dão origem a argamassas ou concretos.

Pz et al. (2018) afirma que as cinzas podem ser reaproveitadas como matéria prima para síntese de zeólitas, para uso como adsorvente no tratamento de efluentes.

2.6 MATURIDADE TECNOLÓGICA

O *Technology Readiness Level* (Níveis de Prontidão de Tecnologia) (TRL) ou Nível de Maturidade Tecnológica é um método criado pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) para avaliar a maturidade tecnológica no ecossistema de Projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) (MCTI, 2022). No ano de 1989, foi formalmente definida em sete níveis, e em 1995, a NASA adotou a definição e incluiu dois níveis, passando para uma gradação de nove (QUINTELLA et al., 2019).

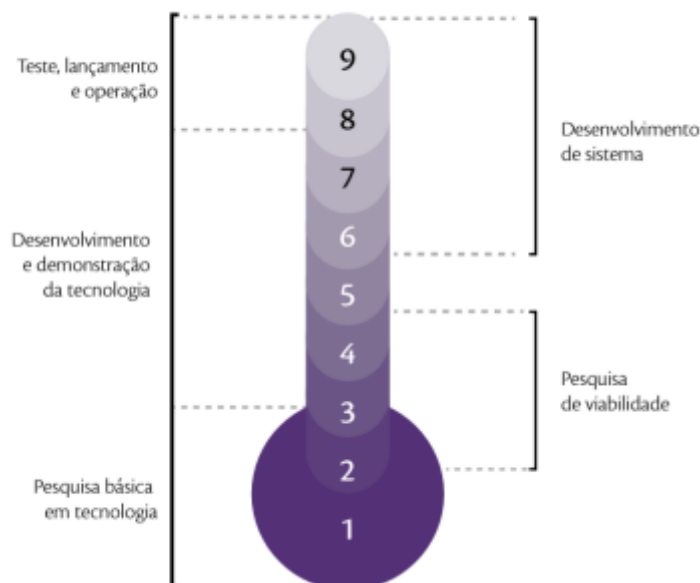
O Quadro 3 apresenta as definições dos níveis de maturidade tecnológica, e como são subdivididas na escala de 1 a 9, como estabelecido pela ABNT NBR ISO 16290: Sistemas espaciais – Definição dos níveis de maturidade da tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação e Mankins (1995).

Quadro 3 - Definições dos níveis de maturidade tecnológica.

Nível	Descrição
1	Princípios básicos observados e reportados.
2	Concepção tecnológica e/ou aplicação formulada.
3	Prova de conceitos das funções críticas de forma analítica ou experimental.
4	Validação em ambiente de laboratório de componentes ou arranjos experimentais básicos de laboratório.
5	Validação em ambiente relevante de componentes ou arranjos experimentais com configurações físicas finais.
6	Modelo do sistema/subsistema protótipo de demonstrador em ambiente relevante.
7	Protótipo do demonstrador do sistema em ambiente operacional.
8	Sistema totalmente completo, testado, qualificado e demonstrado.
9	O sistema já foi operado em todas as condições, extensão e alcance.

Fonte: Adaptado de Capdeville et al., 2017 p. 4.

A determinação da maturidade tecnológica é um importante processo de investigação para indústria e serve como uma ferramenta de gestão do risco inerente à tecnologia em desenvolvimento (QUINTELLA et al., 2019). A tecnologia é avaliada dividindo o processo de desenvolvimento em níveis, os quais se referem aos níveis TRL. Então é analisado o estado da arte, as necessidades e requisitos desta tecnologia, e o seu potencial para lançamento no mercado (VIEIRA, 2021). A Figura 10 apresenta um “termômetro” representativo da escala TRL para ilustração dos níveis de desenvolvimento da tecnologia.

Figura 10 - Termômetro representativo da escala TRL.

Fonte: Velho et.al, 2017, p. 55.

Existem diferentes definições dos Níveis de Maturidade Tecnológica (TRL) utilizados nas organizações, sendo a mais empregada delas a elaborada pela NASA (QUINTELLA et al., 2019). No que diz respeito ao uso dessa metodologia de aferição e avaliação em escala global, são considerados os níveis conforme o estado atual da tecnologia, consistindo no nível mais alto de conhecimento a respeito da tecnologia em questão, analisando quais se enquadram conforme as descrições referentes aos níveis (VIEIRA, 2021).

Segundo a Embrapa (2018), para avançar na escala do nível de maturidade, a partir do nível 3, é preciso comparar o Coeficiente Técnico de Referência (CTR) com o Coeficiente Técnico Atual (CTA). Abaixo do nível 3, não há CTA, pois as pesquisas/estudos ainda são teóricas. O CTR representa o requisito técnico (ou um conjunto de requisitos técnicos) expresso em números, que indica o nível de qualidade que a tecnologia em desenvolvimento deve alcançar para ser vantajosa/competitiva em relação às tecnologias existentes. Enquanto o CTA se refere ao coeficiente atual da tecnologia em desenvolvimento, obtido experimentalmente seguindo o mesmo método de medição do parâmetro técnico que caracteriza o CTR da tecnologia em questão (EMBRAPA, 2018). As fases e o estado da técnica ao longo dos níveis podem ser descritos pela Figura 11.

Figura 11 - Fases e estado da técnica nos níveis de maturidade tecnológica.

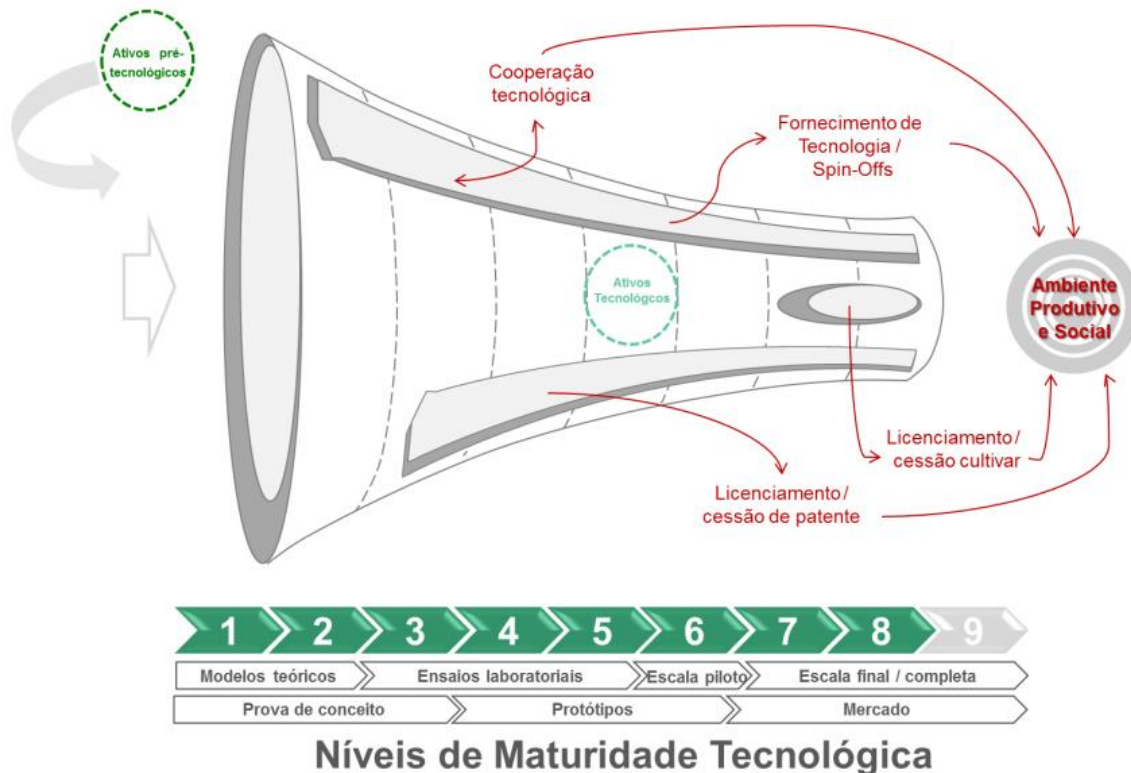
Níveis TRL/MRL	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fases [f]	Descobrir	Entender	Adaptar		Validar	Refinar	Usar		
Estado da técnica [c]	Conceito		Desenvolvimento				Produto		

Fonte: Embrapa, 2018, p. 7.

“É importante reconhecer também que atividades de PD&I são sempre acompanhadas de risco, e muitos dos ativos tecnológicos em estágio inicial de desenvolvimento serão obrigatoriamente descontinuados no caminho. Assim, o funil se estreita, uma vez que nem todas as ideias e projetos resultam em novos produtos, processos ou serviços. Adicionalmente, uma vez que a Embrapa não é capaz de inserir seus ativos tecnológicos no ambiente produtivo e social de forma isolada, ela deve, necessariamente, buscar a inovação aberta por meio de “aberturas” no funil. Estas “aberturas” podem ser viabilizadas por diferentes estratégias de negócios como a cooperação tecnológica, fornecimento de tecnologia, licenciamento de direitos sobre patentes e cultivares, dentre outros” (EMBRAPA, 2018, p. 8).

A Embrapa (2018) apresenta uma perspectiva inovadora acerca dos níveis de maturidade tecnológica. A instituição apresenta o laço estreito (Figura 12) entre as ações de PD&I.

Figura 12 - Modelo conceitual de inovação aberta adotado pela Embrapa.



Fonte: Embrapa, 2018, p. 9.

2.6.1 Modelos de Medição de TRL

Segundo Vieira (2021), apesar da existência de algumas metodologias e estratégias existentes nas agências governamentais e indústrias para avaliação da maturidade tecnológica de tecnologias, ainda não existe, até o momento, um processo para definição de TRL que seja extensamente aceito e oficialmente documento para isso em escala mundial (VALENTE, 2020). Desde a criação do TRL, o cenário de metodologias para aplicação vem sendo adaptado e adequado para garantir a efetividade de seu uso e para atender a demanda por inovação tecnológica (ROCHA; MELO; RIBEIRO, 2017).

No cenário brasileiro, a tecnologia está a cada dia mais ganhando espaço e demonstrando sua importância na qualificação da produção científica. Os modelos de medição de TRL, popularmente conhecidos como calculadora de TRL, são produzidos por centros governamentais e universidades brasileiras.

2.6.1.1 Calculadora IMATEC

Agência Espacial Brasileira (AEB), vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), desenvolveu uma ferramenta online capaz de avaliar a maturidade de desenvolvimento de tecnologias para o setor espacial. A ferramenta, denominada como IMATEC (Índice de Maturidade Tecnológica), auxilia os usuários a medirem seus próprios componentes tecnológicos. Para isso, o usuário deve fazer um modelo detalhado da estrutura analítica do seu sistema.

A criação da ferramenta de avaliação e medição de TRL aconteceu como uma solução para abordar os graves problemas de mitigação de riscos em todas as fases de um projeto espacial, identificando os riscos tecnológicos desde o início (Xavier Junior et al., 2020). O IMATEC Lite (Figura 13), de acordo com Xavier Junior (2020), faz uma pesquisa com o usuário, na qual o questionário tem perguntas que são as mesmas da calculadora TRL da NASA, dando campos para identificar níveis do sistema, subsistema, conjuntos e componentes. O IMATEC possibilita que o usuário salve e reavalie dados de produtos externos no seu sistema, usando um arquivo ASCII simples.

“A entrada do aplicativo é representada por uma estrutura de dados (DS - Data Structure) na qual as questões preenchem a hierarquia de componentes do produto. A aplicação foi desenvolvida de tal forma que descarta a instalação de qualquer software, desconsiderando que o provedor do sistema precise armazenar as informações do produto fornecidas pelo usuário” (VIEIRA, 2021, p. 31).

2.6.1.2 Calculadora TRL IAE-ITA 2020

Rocha, Melo e Ribeiro (2017) elaboraram uma adaptação da metodologia TRL, a partir da NBR ISO 16290 (2015), da NASA, do Laboratório de Pesquisa da Força Aérea dos EUA – *Air Force Research Laboratory* (AFRL), do Departamento de Defesa

Americano (DOD) e da Agência Espacial Europeia (*European Space Agency*) (ESA) para estudos direcionados à área de aviação e aos interesses da aeronáutica.

Figura 13 - Interface da IMATEC Lite.



Fonte: IMATEC Lite, 2023.

Segundo Olechowski et al. (2015), a norma ABNT NBR ISO 16290: Sistemas espaciais – Definição dos níveis de maturidade da tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação, tem o intuito de padronizar os princípios básicos para a avaliação da maturidade de uma tecnologia, no entanto, cientistas do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) apontaram falhas que a norma pode vir a trazer quanto à aplicabilidade. Por exemplo, a ABNT NBR ISO 16290 não avalia o *know-how* da tecnologia, apenas dados documentais, e não avalia os meios de transferência de conhecimento, aspectos político-legais, padronização da avaliação e realização de análise quantitativa (VIEIRA, 2021).

Segundo Rocha, Melo e Ribeiro (2017), a calculadora foi desenvolvida visando suprir as seguintes falhas do TRL:

1. Limitação da avaliação documental;
2. Não disponibilização de uma padronização das avaliações de forma objetiva;
3. Não facilitação à realização de análise quantitativa; não consideração do ambiente político-legal brasileiro e nem dos aspectos econômicos

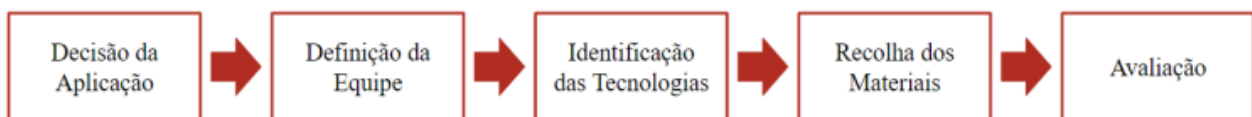
relativos à tecnologia;

4. Não consideração da avaliação dos meios de transferência de conhecimento.

O método desenvolvido pelo ITA está apresentado pela Figura 14. Baseia-se em 5 etapas (ROCHA, MELO E RIBEIRO, 2017):

1. Decisão da aplicação: definição de quando fazer uma avaliação, podendo a periodicidade desta ser fixa ou somente em caso de alteração no projeto;
2. Definição da equipe: a equipe deve incluir o pesquisador, que sabe sobre a tecnologia avaliada, o gestor, que cuida da missão do projeto, e o especialista no ambiente operacional;
3. Identificação das tecnologias: o processo deve ser avaliado por completo, isto é, deve-se fazer a avaliação em todas as tecnologias e elementos ligados a elas;
4. Recolha dos materiais: é preciso fornecer toda a documentação da tecnologia que será avaliada;
5. Avaliação: execução da avaliação do TRL da tecnologia.

Figura 14 - Método avaliativo ITA.



Fonte: Vieira, 2021, p. 35 e Rocha, Melo e Ribeiro, 2017, p. 48.

A calculadora TRL IAE-ITA 2020 foi desenvolvida no software *Microsoft Excel®* e sua tecnologia apresenta 6 (seis) “abas”. A primeira, denominada como Início, consta uma apresentação da ferramenta e seus objetivos. A segunda aba, com o nome ISO, apresenta uma tabela resumida da ABNT NBR ISO 16290: Sistemas espaciais – Definição dos níveis de maturidade da tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação, em forma de *checklist*. Na aba “Manual TRL” há uma apresentação da ferramenta. A aba 4 resume as etapas do formulário da calculadora, onde o usuário deve responder o questionário, para então, o resultado ser apresentado na quinta aba, denominada como “Resultado”. O resultado é caracterizado pela apresentação do resultado e pelo resultado

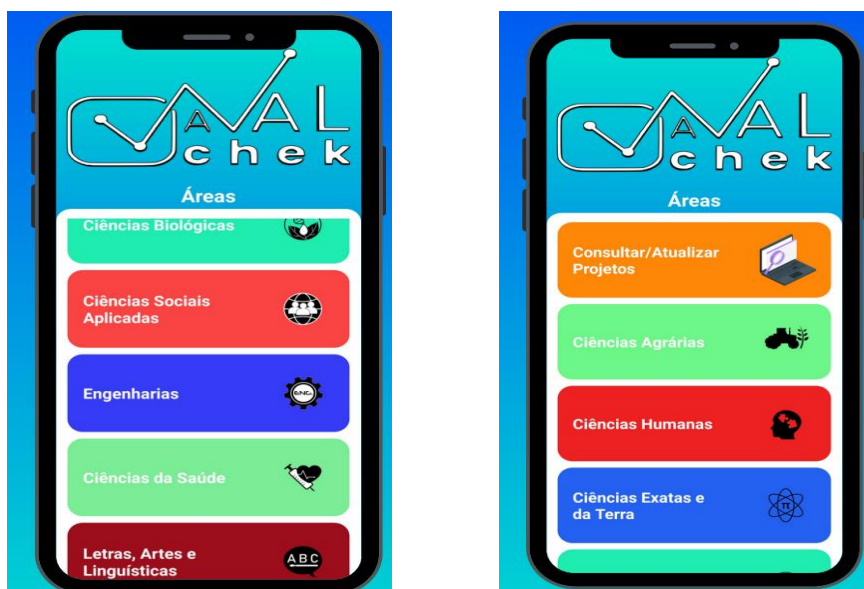
do cálculo ao aplicar os critérios estabelecidos pela ABNT NBR ISO 16290: Sistemas espaciais – Definição dos níveis de maturidade da tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação.

2.6.1.3 AVALchek

O AVALchek é uma calculadora desenvolvida pela Universidade Federal de Sergipe (UFS), que apresenta uma maior praticidade, agilidade e abrangência ao determinar o nível TRL de trabalhos acadêmicos, ao comparada com as demais calculadoras disponíveis. Com o objetivo de proporcionar uma experiência simplificada e de fácil compreensão, a ferramenta apresenta resultados sobre o nível de TRL em questão de minutos e fornece orientações valiosas quanto aos próximos passos a serem tomados (AVALchek, 2023).

A ferramenta está disponível para *download* em *smartphones* do tipo *Android* na *Play Store*®. A tela inicial do AVALchek (Figura 15), apresenta as grandes áreas de ensino do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq).

Figura 15 - Interface do aplicativo AVALchek.



Fonte: AVALchek, 2023.

O usuário deve selecionar a área de ensino correspondente ao estudo a ser avaliado, para então, seguir para a tela de análise. Após o preenchimento dos dados

solicitados para identificação do projeto e para apresentar um endereço para envio do resultado, o utente deve selecionar as caixas de seleção que representam os passos pelos quais seu estudo já passou. Ao confirmar as informações fornecidas, o usuário é encaminhado para a tela com o resultado da avaliação e as demais informações são apresentadas para o contínuo desenvolvimento da tecnologia.

2.6.1.4 Calculadora TRL – MCTI

Segundo Brasil (2022), a calculadora TRL do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), foi publicada dia 19 de outubro de 2022 no Diário Oficial da União, por meio da Portaria 6449/22, que institui a utilização de métrica para a avaliação da maturidade tecnológica dos projetos de CT&I (Ciência, Tecnologia e Inovação).

“O sistema de medição tem como objetivo avaliar a maturidade tecnológica dos projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação do MCTI e de suas unidades vinculadas, permitindo assim diferenciais estratégicos na avaliação, na execução de ações e alocação de recursos. Outro objetivo é aumentar a capacidade institucional das unidades vinculadas na captação de recursos financeiros não orçamentários por meio da classificação dos projetos, segundo suas características e natureza de apoio mais adequado” (Brasil, 2022).

O cálculo é realizado por meio de um formulário disponibilizado pelo MCTI, e inicia-se com a solicitação do preenchimento de dados do requerente. E em seguida, devem ser respondidas 149 questões, que representam os passos pelos quais seu estudo já passou. Ao término do preenchimento, o resultado é disponibilizado na plataforma da Secretaria de Estruturas Financeiras e de Projetos (SEFIP), onde somente o pessoal autorizado consegue acessar.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os procedimentos metodológicos para realizar a revisão sistemática da produção científica sobre reaproveitamento de cinzas de caldeira produzidas a partir de biomassa, análise do nível de maturidade e os critérios para proposição de sugestões para produção do produto.

3.1 METODOLOGIA DE ABORDAGEM

O método de abordagem utilizado neste trabalho foi o descritivo e exploratório visando a melhor compreensão das produções acadêmicas atuais, bem como a familiarização com o objetivo principal do trabalho, sendo esse analisar o nível de maturidade da produção científica sobre reaproveitamento de cinzas de caldeira produzidas a partir de biomassa.

3.2 REVISÃO SISTEMÁTICA

As revisões sistemáticas são baseadas em perguntas claras, utilizando-se de métodos sistematizados e explícitos com objetivo de identificar, selecionar e avaliar criticamente pesquisas relevantes (LIMA et al., 2018).

Ao combinar a revisão sistemática com metanálise conforme as diretrizes *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses* (PRISMA), foi possível obter um processo científico e transparente, que por consequência apresenta uma auditoria das etapas, tornando assim, a análise mais robusta e replicável. O método PRISMA foi selecionado para contribuir nas diretrizes do estudo pois apresenta um *checklist* com 27 (vinte e sete) itens (APÊNDICE A) e um fluxograma com o objetivo de auxiliar autores a melhorarem a qualidade de suas revisões sistemáticas e metanálises (GALVÃO, PASANI E HARRAD, 2015).

Neste trabalho, a revisão sistemática foi utilizada para mapear o nível de maturidade dos trabalhos desenvolvidos por instituições de ensino superior ou institutos de pesquisa, com ou sem parceria com empresas. O tema pesquisado foi a reutilização de cinzas de caldeiras à base de biomassa e sua aplicabilidade como meio de minimizações do impacto ambiental nos processos produtivos. Os estudos de interesse

foram os publicados na forma de artigos, dissertações e teses. A pesquisa foi realizada no fim do mês de agosto do ano de 2023, e baseou-se na seguinte questão de pesquisa, do inglês, *Research Question* (RQ) para a revisão sistemática responder: *Como a produção das cinzas proveniente da queima de biomassa em caldeiras é abordada na literatura?*

Ao responder a RQ, a revisão sistemática oferece uma análise fundamentada sobre o nível e o potencial de retorno dos estudos selecionados a macro e micro processos, sendo possível assim, propor uma nova perspectiva para futuros estudos.

As bases de pesquisas escolhidas foram: *Web of Science*, *Scopus* e *Science Direct*. As bases escolhidas abrangem todos os tipos de estudos desejáveis para a análise, tornando assim, a revisão mais abrangente.

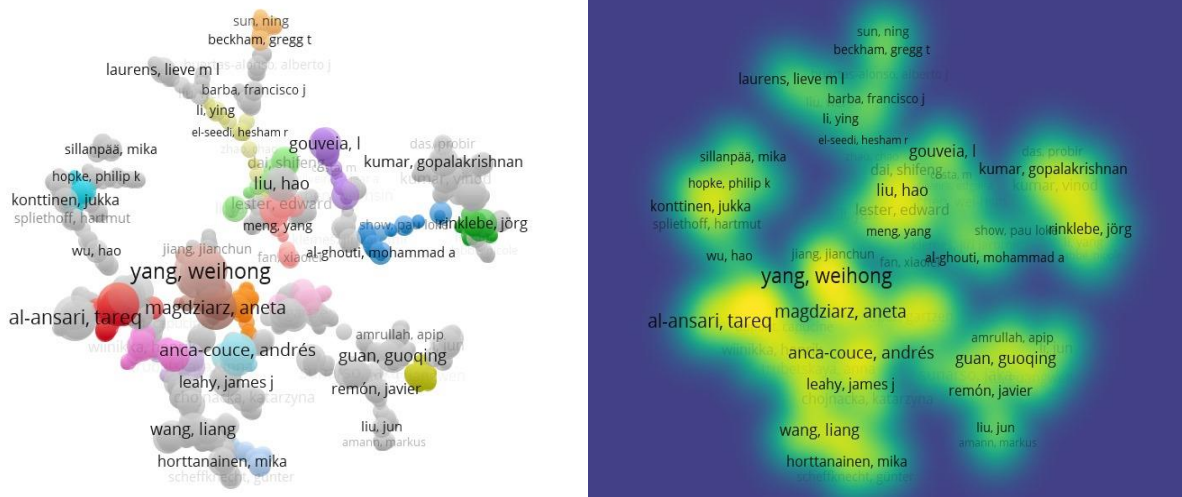
Após a definição das bases de dados e da questão de pesquisa, as seguintes palavras-chaves foram determinadas: *"Boiler" AND "Ash" AND "Utilization"*, *"Boiler" and "Ash" and "Incorporation"*, *"Boiler" and "Ash" and "Innovation"*, *"Boiler" and "Ash" and "Product Development"*, *"Boiler" and "Ash" and "Product"*, *"Biomass Ash" and "Reuse"*, *"Biomass Ash" and "Wastewater Treatment"*, *"Biomass Ash" and "Environmental Reuse"*, *"Biomass Ash" and "Circular Economy"*, *"Biomass Ash" and "Applications in Environmental Field"*, *"Biomass Ash" and "Applications"*, *"Reuse of Biomass Ash"* e *"Reuse of Boiler Ash"*. Essa *string* de pesquisa foi aplicada, e a busca inicial retornou 246.896 artigos.

Os estudos foram então, submetidos a critérios de inclusão e exclusão a fim de serem filtrados. O primeiro critério de inclusão filtrou os estudos publicados como tese, artigos e dissertações, estudos publicados em inglês, português e/ou espanhol, com acesso aberto e a data de publicação a partir de 2018. Com isso, foram excluídos livros, trabalhos em congresso e similares, trabalhos publicados até 2018, estudos publicados em outros idiomas e com acesso restrito. Essa primeira triagem reduziu a amostra para 17.460 estudos.

Em seguida, foi aplicado o segundo critério de elegibilidade, no qual os estudos foram filtrados a partir da exclusão dos trabalhos que abordavam estudos sobre *biochar*, exclusão dos estudos dos autores de menor relevância na amostra, adição de estudos brasileiros e da leitura dos títulos e resumos. Foram excluídos 11.286 estudos duplicados, resultando em uma amostra de 6.174 trabalhos para a revisão. Após a exclusão dos trabalhos sobre *biochar*, a amostra foi reduzida a 5.522 estudos.

Para a avaliação dos principais autores dos estudos filtrados, foi utilizado o *software* VOSviewer, que resultou em uma rede que interligava os autores dos trabalhos apresentados (Figura 16). A partir da imagem foram selecionados os estudos dos autores: *Yang, Weihong; Al-ansari, Tareq; Rinklebe, Jorg; Kumar, Gopalakrishnan; Gouveia, I; Beckham, Gregg T; Laurens, Lieve M L; Remón, Javier; Konttinen, Jukka; Wang, Liang; Meng, Yang; Li, Ying; Magdziarz, Aneta*. Após esse filtro, a amostra foi reduzida para 108 estudos. Em seguida, foram incluídos 51 trabalhos de autores e universidades brasileiras, aumentando a amostra para 159 estudos. Os trabalhos que apresentaram tópicos inadequados, ou seja, que não tratavam sobre cinzas de caldeiras, ou a aplicação das cinzas visando sua reutilização, foram excluídos, reduzindo a amostra para 27 estudos.

Figura 16 - Autores de maior relevância na amostra via VOSviewer.



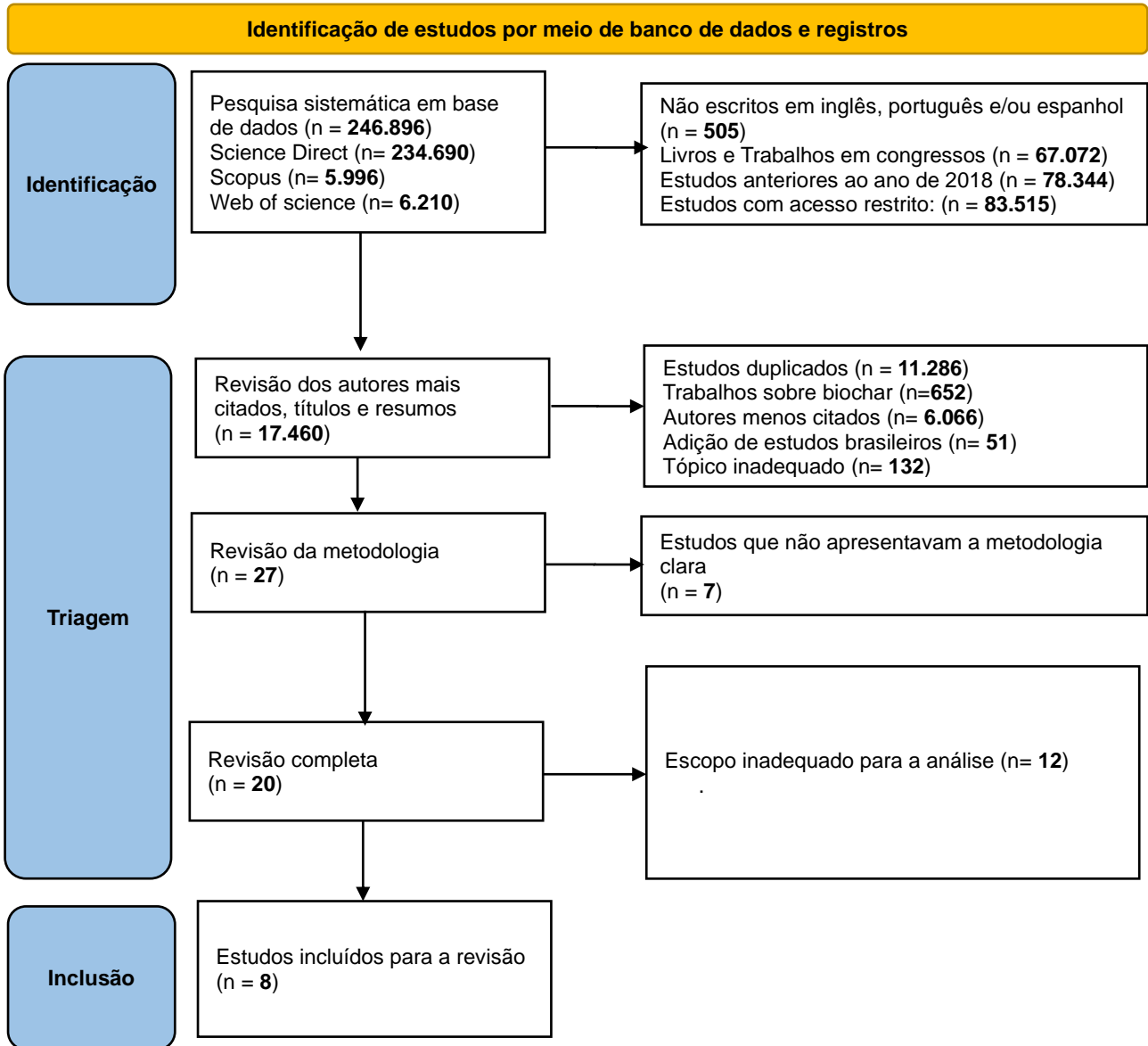
Fonte: A autora, 2023.

A etapa seguinte consistiu em uma revisão aprofundada da metodologia dos trabalhos. Os estudos que não apresentaram uma metodologia clara, coesa e minimamente replicável, foram excluídos. Assim, os trabalhos foram reduzidos para 20 estudos.

Antes da metassíntese foi realizada a leitura e avaliação completa dos 20 trabalhos. Neste ponto, os estudos que não apresentaram um escopo com as cinzas de biomassa provenientes da combustão em caldeiras como protagonista e resultados não satisfatórios, também foram excluídos. Com isso, foram incluídos 8 estudos para a revisão. A Figura 17 apresenta o resumo quantitativo da seleção e avaliação dos estudos,

segundo o protocolo PRISMA.

Figura 17 - Seleção e avaliação dos estudos.



Fonte: Adaptado de Page et al., 2021.

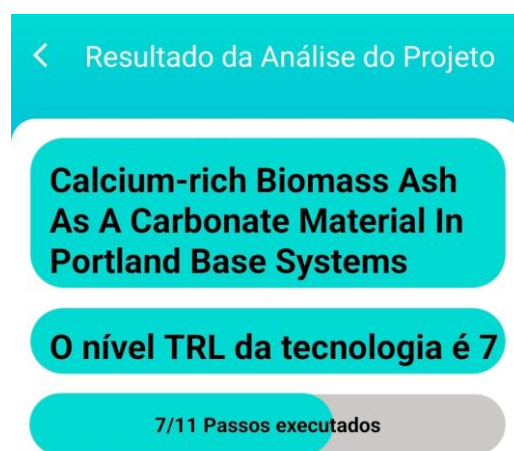
3.3 ANÁLISE DO NÍVEL DE MATURIDADE DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA

A análise do nível de maturidade das amostras foi realizada com o aplicativo *AVALchek* (calculadora) desenvolvida pela Universidade Federal de Sergipe. Este aplicativo foi selecionado pois atende diversas áreas de estudo com acesso aberto para quaisquer usuários. Ao realizar a leitura completa dos artigos e pesquisas em sites de

patentes, a área de estudo que englobou todos os estudos para uma análise igualitária foi o de “Ciências Exatas e da Terra” e assim, foi possível avaliar os critérios estabelecidos.

Ao realizar a seleção dos critérios apresentados, o aplicativo retornou com a escala TRL correspondente ao estudo analisado. A Figura 18 apresenta a interface do aplicativo com a conclusão da análise. Assim, foi possível dimensionar a escala TRL dos estudos acerca do tema e avaliar as possíveis influências para a escala apresentada.

Figura 18 - Resultado da análise da escala TRL utilizando *AVALchek*.



Fonte: A autora, 2023.

3.4 ESTUDO DE CASO

Ao avaliar o nível de maturidade dos trabalhos selecionados, um dos estudos analisados foi eleito para um estudo de caso. O estudo de caso teve por objetivo apresentar um protótipo funcional para aumentar o TRL da tecnologia, e assim, aproximar a produção acadêmica de uma possível comercialização no formato de um produto. Para selecionar o estudo foram utilizados três critérios: 1º) nível TRL maior que 5: após esse nível, a tecnologia apresenta uma maturidade preliminar relevante, restando apenas a adequação dos ensaios laboratoriais em um protótipo e o fortalecimento da ideia; 2º) utilização das cinzas *in natura*: maior potencial econômico e 3º) processo simplificado e com o mínimo de reagentes possíveis: maior potencial econômico a longo prazo.

O estudo que mais atendeu aos critérios apresentados foi escolhido para a realização do estudo de caso. Assim, um esquema representativo e seu futuro como um

produto tecnológico foram projetados por meio de dados apresentados na literatura e um cálculo de dimensionamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados da revisão sistemática, da avaliação da maturidade tecnológica dos estudos selecionados e do estudo de caso.

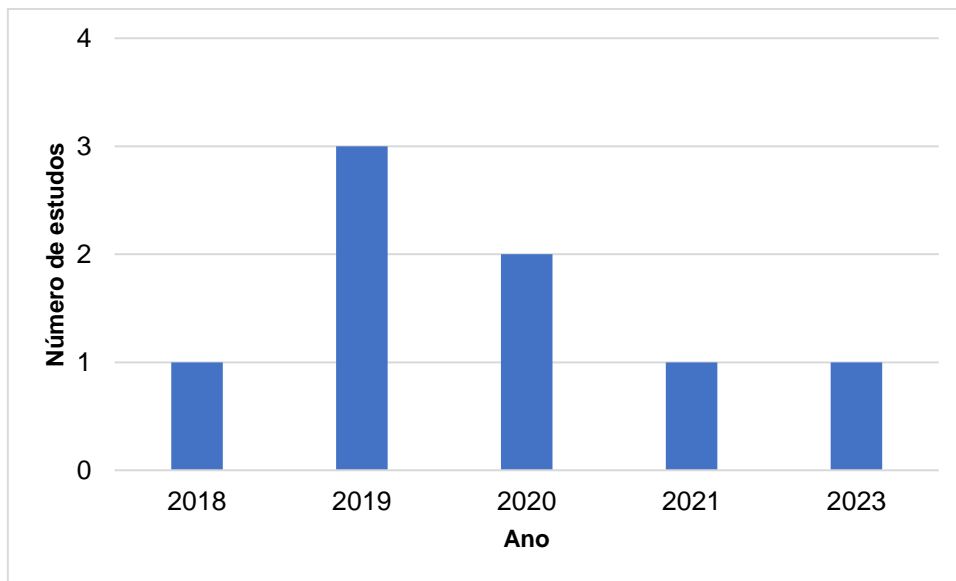
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

Ao aplicar o protocolo PRISMA de revisão sistemática juntamente com os critérios de inclusão e exclusão, a amostra contabilizou 8 estudos. Os critérios foram aplicados para reduzir o tamanho da amostra, considerando os estudos mais relevantes acerca do tema, dentre eles o tipo de estudo, ano, idioma, localidade, principais autores e uma análise mais aprofundada da abordagem de cada estudo pré-selecionado.

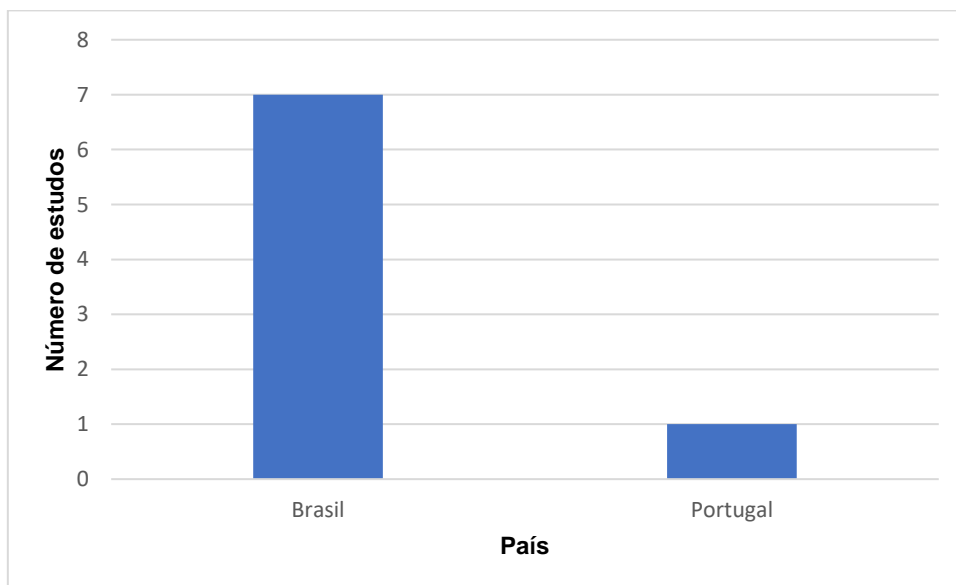
O critério de inclusão de estudos brasileiros considerou o interesse em pesquisas realizadas no Brasil que possibilitassem o desenvolvimento tecnológico e econômico do país. Estudos que abordavam a utilização, caracterização, produção e reutilização de *biochar* foram excluídos da análise, pois o *biochar* é produzido em ambiente controlado, como a pirólise, diferentemente de condições da queima de combustível em caldeiras.

Por possuir uma ampla quantidade de estudos sobre a aplicação de cinzas de caldeiras, a pesquisa foi reduzida aos estudos mais recentes, e com isso, a amostra se enquadra em estudos publicados entre os anos de 2018 e 2023. A Figura 19 apresenta a relação entre o número de artigos e o ano de publicação. Nota-se que em 2019 houve a maior quantidade de artigos publicados sobre o tema.

Ao aplicar os critérios de inclusão e exclusão, de idioma e artigos nacionais, as amostras foram publicadas em 2 países diferentes: Brasil e Portugal. A Figura 20 apresenta a relação entre o número dos estudos selecionados e seus países de publicação. Como o principal interesse do presente estudo é apresentar a perspectiva das pesquisas no cenário nacional, foi avaliado, também, o estado brasileiro em que foi desenvolvido cada estudo.

Figura 19 - Ano de publicação dos estudos selecionados.

Fonte: A autora, 2023.

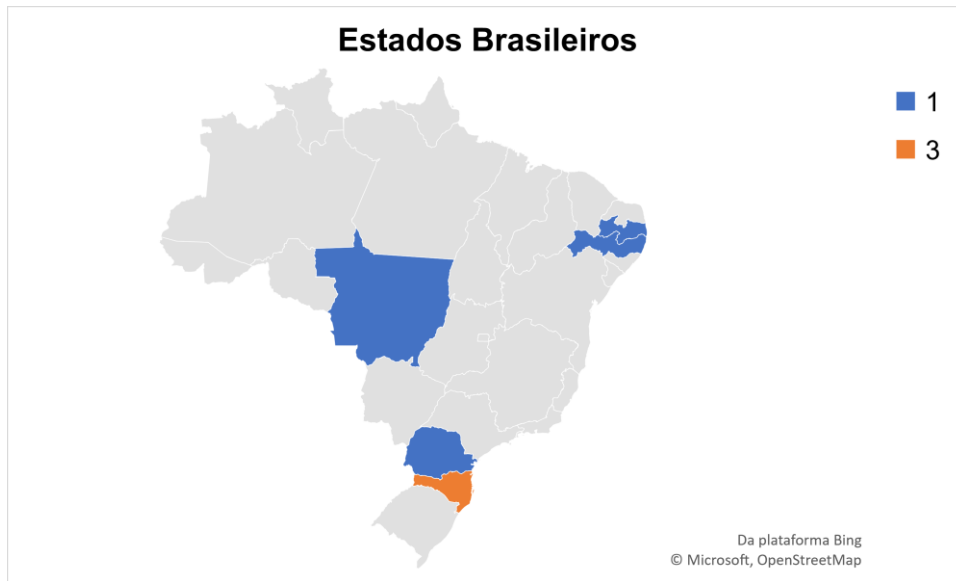
Figura 20 - Países de publicação dos estudos selecionados.

Fonte: A autora, 2023.

A Figura 21 apresenta o número de artigos brasileiros correspondente a cada estado. Dentre os estudos brasileiros (7), o estado de Santa Catarina apresentou o maior número de estudos (3), seguido pelos estados do Paraná (1), Mato Grosso (1),

Pernambuco (1) e Paraíba (1). Os trabalhos representaram a maioria das regiões brasileiras, constatando, assim, que o tema de estudo é uma preocupação a nível nacional. Os estados brasileiros apontados possuem diversos setores industriais como pilares econômicos e sociais. A Tabela 4 apresenta a participação dos principais setores industriais em cada estado.

Figura 21 - Estados brasileiros dos artigos selecionados.



Fonte: A autora, 2023.

Tabela 4 - Participação dos principais setores industriais nos estados brasileiros de publicação dos estudos selecionados.

Setores	Paraíba	Santa Catarina	Paraná	Pernambuco	Mato Grosso
Construção	35,7	17,4	18,3	20,1	23,8
Serviços industriais de utilidade pública	23,5	8,7	20,8	19,2	20,1
Couros e calçados	10,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Alimentos	6,1	17,5	18,7	15,6	26,2
Minerais não metálicos	5,8	6,7	0,0	0,0	0,0
Vestuário	0,0	5,1	0,0	0,0	0,0
Derivados de petróleo e biocombustíveis	0,0	0,0	5,9	8,2	9,0
Veículos automotores	0,0	0,0	4,8	7,4	0,0
Químicos	0,0	0,0	0,0	0,0	5,3
Outros	18,3	44,6	31,5	29,5	15,6

Fonte: Adaptado de Portal da Indústria, 2023.

O setor de construção é o único que lidera a participação em mais de um estado, e o setor de serviços industriais de utilidade pública é a atividade que mais cresce, principalmente na Paraíba e no Mato Grosso (Portal da Indústria, 2023). Esses dois setores expressivos, são espelhados na amostra, pois são os principais setores de estudos dos trabalhos, seguidos pela agricultura, como apresentado pela Figura 22.

Figura 22 - Setores de estudos dos artigos.



Fonte: A autora, 2023.

A Tabela 5 apresenta as especificações dos estudos selecionados, bem como sua fonte de financiamento, que em toda a amostra recebeu apoio governamental para pesquisa. Com isso, foi possível afirmar que o Estado segue com um compromisso com as empresas privadas ao oferecer recursos financeiros para que pesquisadores avancem ainda mais com novas tecnologias de inovação.

Tabela 5 - Informações dos estudos selecionados (*Continuação*).

Título	Autor	Ano	País	Idioma	Periódico	Universidade	Palavras-chave	Área/ Indústria	Contribuição	Tipo do financiamento
Calcium-rich biomass ash as a carbonate material in Portland base systems	Nascimento, J E F; Nóbrega, A C V; Ferreira, H C; Neves, G A; Santana, L N L	2019	Brasil	Português	Cerâmica	Universidade Federal de Campina Grande	<i>Algaroba; Ash; Highly-calcareous biomass; Hydration; Limestone filler</i>	Construção/ Cimentícia	Produção de um fíler calcário alternativo a partir de a cinza de algaroba.	Governamental
Characterization of pulp and paper mill waste for the production of waste-based cement	Simão, L; Hotza, D; Raupp-Pereira, F; Labrincha, J A; Montedo, O R K	2019	Brasil	Inglês	Revista Internacional de Contaminacion Ambiental	Universidade Federal de Santa Catarina	<i>Clinker; Mortar; Waste recycle; ash; biochemical composition; biomass; calcium; industrial waste; leaching; pulp and paper industry; recycling; sludge; sulfate; wastewater treatment plant</i>	Construção/ Cimentícia	Utilização de cinzas de biomassa para produção de clínquer.	Governamental
Is biomass ash an effective product for use in cereal crops in an agroecological system?	da Fonseca, J A; Hanisch, A L	2018	Brasil	Português	Revista de Ciencias Agroveterinarias	Universidade Federal de Santa Catarina	<i>Green manure; Soil management; Sustainability; Waste</i>	Sustentabilidade/ Agricultura	Utilização de cinzas de biomassa como corretivos da acidez e fertilizante do solo.	Governamental
Removal of alprazolam in contaminated waters: Evaluation of alternative adsorbents	Pereira, V C; do Nascimento, P.M.K.B.; Nunes, C N; Gimenes, M L; Cordeiro, P H Y; de Lima, L S; Quináia, S P	2019	Brasil	Português	Revista Virtual de Quimica	Universidade Estadual do Centro-Oeste	<i>Adsorption; Emerging pollutant; Industrial carbonaceous waste</i>	Serviços industriais de utilidade pública/ Tratamento de efluentes industriais	Produção de um adsorvente à base de Cinzas provenientes da combustão em caldeiras para remoção de Alprazolam em águas contaminadas.	Governamental

Fonte: A autora, 2023.

Tabela 5 - Informações dos estudos selecionados (Continuação).

Título	Autor	Ano	País	Idioma	Periódico	Universidade	Palavras-chave	Área/ Indústria	Contribuição	Tipo do financiamento
A circular approach for landfill leachate treatment: Chemical precipitation with biomass ash followed by bioremediation through microalgae	Viegas, C; Nobre, C; Mota, A; Vilarinho, C; Gouveia, L; Gonçalves, M	2021	Portugal	Inglês	<i>Journal of Environmental Chemical Engineering</i>	Mechanical Engineering and Resource Sustainability Center	<i>Algae; Ash handling; Biomass; Biomass concentrations; Bioremediation; Biotechnology; Bottom ash; Chemical oxygen demand; Chemical precipitation; Efficiency; Effluent treatment; Fatty acids; Integrated approach; Landfill leachate treatment; Landfill leachates; Leachate treatment; Microalgae; Microorganisms; Mortar formulation; Mortars; Particle size; Precipitation; Precipitation (chemical); Pretreatment conditions.</i>	Serviços industriais de utilidade pública/ Tratamento de efluentes industriais	Utilização de cinzas de biomassa no processo de pré-tratamento para redução de cor e turbidez de lixiviados de aterros sanitários.	Governamental
Study of cure conditions effect on the properties of wood biomass fly ash geopolymers	De Rossi, A Simão, L Ribeiro, M J Hotza, D Moreira, R.F.P.M.	2020	Brasil	Inglês	<i>Journal of Materials Research and Technology</i>	Universidade Federal de Santa Catarina	<i>Alkali activators; Alkaline activators; Alkalinity; Biomass; Compressive strength; Cure; Cure condition; Curing; Curing methods; Fly ash; Geopolymer; Geopolymers; Inorganic polymers; Processing parameters; Property; Silicates; Sodium hydroxide; Sodium silicate; Temperature; Waste; Wood; Wood biomass; Wood biomass fly ash</i>	Serviços industriais de utilidade pública/ Inovação	Investigação da influência de parâmetros de processamento nas propriedades de geopolímeros à base de cinzas de biomassa e seu potencial de aplicação.	Governamental

Fonte: A autora, 2023.

Tabela 5 - Informações dos estudos selecionados (*Conclusão*).

Título	Autor	Ano	País	Idioma	Periódico	Universidade	Palavras-chave	Área/ Indústria	Contribuição	Tipo do financiamento
Durability of Concrete Structures with Sugar Cane Bagasse Ash	Berenguer, R; Lima, N; Valdés, A C; Medeiros, M H F; Lima, N B D; Delgado, J.M.P.Q.; Silva, F A N; Azevedo, A C; Guimarães, A S; Rangel, B	2020	Brasil	Inglês	<i>Advances in Materials Science and Engineering</i>	Universidade Federal de Pernambuco	<i>Bagasse; Carbon dioxide; Cement industry; Cementitious pastes; Concrete buildings; Concrete construction; Concrete mixtures; Concrete productions; Concrete products; Durability; Durability of concrete structure; Durability property; Environmental impact; Experimental campaign; Industrial transformations; Mortar; Partial substitution; Portland cement; Silica; Sugar cane;</i>	Construção/ Cimentícia	Utilização de cinzas de biomassa como um aditivo mineral para argamassa e concreto.	Privado e Governamental
Cultivation of Urochloa brizantha under different soil densities and doses of wood ash	Rocha, R A S da Silva, T J A Bonfim-Silva, E M Duarte, T F de Oliveira, N P R	2023	Brasil	Inglês	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental	Universidade Federal do Mato-Grosso	<i>orange production; physical attribute; solid waste</i>	Sustentabilidade e/ Agricultura	Utilização de cinzas de biomassa como corretivos da acidez e fertilizante do solo para o crescimento de capim paiaaguás.	Governamental

Fonte: A autora, 2023.

4.2 COMO A PRODUÇÃO DAS CINZAS PROVENIENTE DA QUEIMA DE BIOMASSA EM CALDEIRAS É ABORDADA NA LITERATURA?

Como apresentado pela Figura 22, os setores abordados pelos estudos brasileiros são: serviços industriais de utilidade pública, agricultura e construção. Esses números representam os principais setores dos estados brasileiros abordados nos trabalhos publicados, o que permitiu determinar que os objetivos da produção científica brasileira acerca do tema estão de acordo com as necessidades das indústrias locais. As principais abordagens tinham como foco agregar valor ao resíduo e diminuir os impactos ambientais ao apresentar uma rota viável para sua utilização.

Os estudos em PD&I são sempre aprimorados com o tempo e as mudanças de prioridade e objetivos da indústria e da sociedade de forma global. Com isso, materiais versáteis têm ganhado cada vez mais ganhando espaço em aplicações industriais, como os geopolímeros. Geopolímeros são materiais sintéticos obtidos pela ativação alcalina de alguns materiais ricos em silício e alumínio, principalmente metacaulim e resíduos industriais específicos (ROSSI et.al, 2020). Geopolímeros à base de cinzas volantes de biomassa de madeira são materiais promissores que sugerem muitas aplicações. De acordo com o estudo realizado por Rossi et.al (2020), ao investigar a influência de parâmetros de processamento nas propriedades de geopolímeros à base de cinzas, as amostras apresentaram aplicabilidade como adsorventes de poluentes e em argamassas densas.

A reutilização de cinzas de biomassa pode ser realizada de forma direta (adição da cinza *in natura* ao processo) ou de forma indireta (a cinza passa por um pré-tratamento). A primeira alternativa é a forma que mais agrega valor ao processo. Uma das aplicabilidades mais simples desse resíduo, é a sua utilização em estações de tratamento de esgoto para remoção de poluentes. Pereira et.al (2019) avaliaram um adsorvente alternativo à base de cinzas de biomassa proveniente da combustão incompleta em caldeiras para remoção de fármacos em águas contaminadas. O estudo utilizou os resíduos de casca de madeira (pinus e/ou eucalipto) provenientes da queima incompleta de biomassa em caldeiras para geração de vapor na indústria madeireira, sem nenhum tipo de tratamento preliminar e apresentou uma remoção de 84,2% do fármaco.

As cinzas de biomassa podem agregar mais soluções aos problemas de médio e grande impactos ambientais. Uma outra rota de aplicação, é em sistemas de

remediação de lixiviados de aterros sanitários, como apresentado por Veiga et.al (2021). Um dos aspectos mais significativos na gestão de aterros sanitários é a produção de um chorume altamente complexo, que representa um problema de poluição muito grave que afeta solos, corpos d'água e saúde humana (VEIGA et.al, 2021). Assim, o estudo teve como objetivo utilizar a cinza de biomassa como um agente no pré-tratamento para a redução de cor e turbidez através de um processo de precipitação química. Mais uma vez, a aplicabilidade das cinzas se mostrou um fator positivo, pois dentre as condições de processo, o pré-tratamento foi satisfatório com a remoção de 74,3% de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e de 98,5% da cor.

Outra grande aplicabilidade das cinzas apresentadas na literatura, é na indústria cimentícia. O setor produtivo busca soluções alternativas para adição na matriz cimentícia em substituição ao clínquer. Por isso, Simião et.al (2019) e Nascimento et.al (2019) propuseram estudos de incorporação de cinzas de biomassa como materiais carbonáticos em sistemas cimentícios. As cinzas apresentaram resultados satisfatórios de resistência mecânica e estabilidade físico-químicas e assim, se caracterizaram como um potencial tecnológico para aplicação em cimentos. Berenguer et.al (2020) ratificam as conclusões dos estudos de Simião et.al (2019) e Nascimento et.al (2019) ao avaliar a durabilidade de estruturas de concreto com cinzas de biomassa. Ao incorporar 15% de cinza em pastas cimentícias, o estudo resultou em bons resultados de durabilidade. Adicionar a cinza de bagaço de cana à matriz cimentícia é mais um passo para a indústria do concreto aumentar sua responsabilidade sustentável e melhorar o desempenho do cimento (BERENGUER et.al, 2020).

Segundo Fonseca e Hanisch (2018), a demanda da sociedade sobre desenvolvimento sustentável tem exigido do setor de Pesquisa e Desenvolvimento inovações nos processos industriais com redução de impactos ambientais, bem como a geração de tecnologias para a alocação dos resíduos gerados nestes processos. Uma das estratégias de alocação de resíduos sólidos gerados nos processos industriais pode ser sua aplicação no solo como insumo agrícola (ALMEIDA et al. 2007). Assim, Rocha et.al (2023) e Fonseca e Hanisch (2018) apresentam aplicações de incorporação de cinzas no solo para cultivo. Rocha et.al (2023) realizaram o estudo do cultivo do capim paiaguás sob diferentes densidades de solo de cinzas. A incorporação de cinzas apresentou alto poder de neutralização da acidez do solo e houve um crescimento satisfatório no cultivo. Fonseca e Hanisch (2018) avaliaram a incorporação de cinzas no solo visando a produção de cereais em bases agroecológicas e constataram que as

cinzas não apresentaram efeitos nocivos ao sistema além de apresentar uma fonte segura de potássio.

4.3 AVALIAÇÃO DA MATURIDADE TECNOLÓGICA DOS ESTUDOS SELECIONADOS

A escala TRL facilita a comparação direta entre diferentes ativos tecnológicos. Por isso, os 8 (oito) estudos selecionados tiveram a sua maturidade tecnológica mensurada a partir do aplicativo *AVALchek*. A Tabela 6 apresenta as competências atingidas por cada estudo.

A calculadora foi escolhida por ser a única com acesso disponível e que englobasse diversas áreas de estudo. A Tabela 7 apresenta a escala de TRL de cada estudo. Observa-se que a maior parte dos estudos estão na fase de escalonamento, pois apresentam um nível de TRL igual a 6. Essa fase indica que o desenvolvimento está próximo ao fim e que já existem testes em ambientes relevantes, além da possibilidade da formação e teste de um protótipo. Os estudos com TRL igual a 7, indicam que a tecnologia chegou ao fim de sua fase de desenvolvimento e ao início da fase de comissionamento, onde deve haver testes em ambientes próximos ao real. O próximo passo para os níveis 6 e 7, seriam de fortalecimento e proteção da tecnologia, por meio de validações e possível patente.

Os demais estudos, se enquadram nos níveis de modelos teóricos e ensaios laboratoriais. Os trabalhos com TRL igual a 5 indicam que foram iniciados os primeiros testes dos componentes da tecnologia e por isso, ela segue em desenvolvimento. O único estudo com TRL igual a 2 apresenta que a tecnologia já passou por uma elaboração preliminar de hipóteses, que servem como demonstração da tecnologia e o próximo passo seria realizar estudos analíticos e laboratoriais de forma a validar o conceito preliminar.

A avaliação obtida pode ser justificada pelo desenvolvimento de tecnologia nos setores os quais os estudos abrangem. A Figura 23 apresenta o TRL médio para cada macro setor. Nota-se que o setor de construção apresenta uma tecnologia mais avançada em comparação aos demais. Esse fato se justifica pelo crescimento no setor nos últimos anos, pois, segundo a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC) a construção civil cresce há três anos consecutivos acima da economia nacional e em 2023, esse crescimento foi projetado em 2,5%.

Tabela 6 - Avaliação dos estudos selecionados pelo aplicativo AVALchek (Continuação).

CRITÉRIOS	ARTIGOS							
	<i>Calcium-rich biomass ash as a carbonate material in Portland base systems</i>	<i>Characterization of pulp and paper mill waste for the production of waste-based cement</i>	<i>Is biomass ash an effective product for use in cereal crops in an agroecological system?</i>	<i>Removal of alprazolam in contaminated waters: Evaluation of alternative adsorbents</i>	<i>A circular approach for landfill leachate treatment: Chemical precipitation with biomass ash followed by bioremediation through microalgae</i>	<i>Study of cure conditions effect on the properties of wood biomass fly ash geopolymers</i>	<i>Durability of Concrete Structures with Sugar Cane Bagasse Ash</i>	<i>Cultivation of Urochloa brizantha under different soil densities and doses of wood ash</i>
Os conceitos e elementos do invento já foram definidos.	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Realizou a demonstração preliminar dos conceitos da invenção.	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Ocorreu pesquisas sistemáticas e analíticas sobre o conceito e posteriormente a validação do mesmo.	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Foi iniciado o desenvolvimento da tecnologia e seus componentes foram testados em ambiente laboratorial.	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Foi realizado o depósito do pedido de proteção de propriedade intelectual.	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não

Fonte: A autora, 2023.

Tabela 6 - Avaliação dos estudos selecionados pelo aplicativo AVALchek (Conclusão).

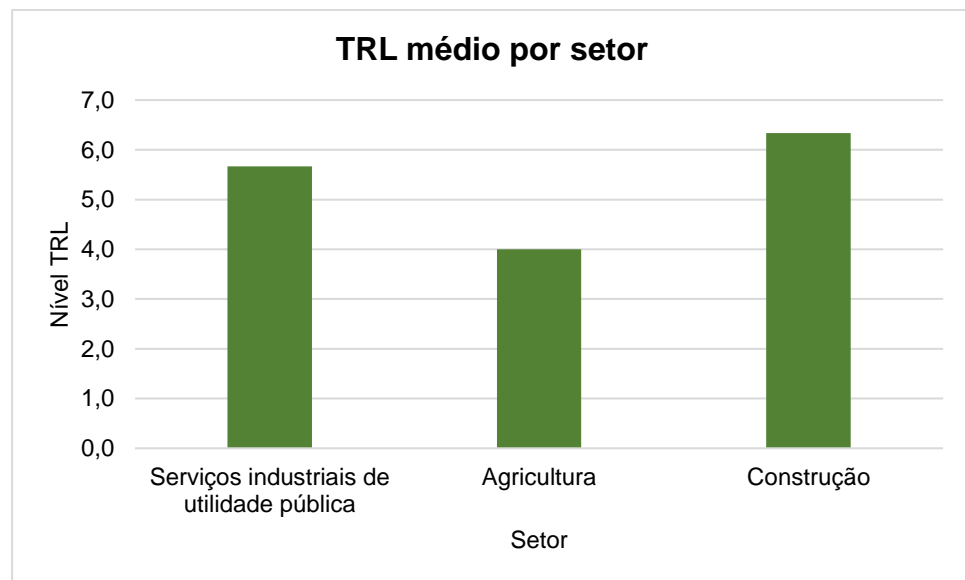
Há alguma proteção de propriedade intelectual aplicável a esta invenção, ou parte dessa?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Os componentes da tecnologia foram testados em ambiente relevante.	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Foi realizada a demonstração do modelo de protótipo de tecnologia em ambiente relevante.	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Não	Sim
Já foi realizada uma pesquisa sobre o potencial de comercialização da tecnologia.	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
A tecnologia já foi avaliada em ambiente próximo ao real.	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Não
A tecnologia já foi avaliada em ambiente real e entregou resultado de acordo com o esperado.	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
A tecnologia já possui um arcabouço legal e todas as permissões necessárias para sua comercialização.	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
A tecnologia está pronta para comercialização.	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não

Fonte: A autora, 2023.

Tabela 7 - Nível de maturidade tecnológica dos estudos selecionados.

Estudo	TRL
Calcium-rich biomass ash as a carbonate material in Portland base systems	7
Characterization of pulp and paper mill waste for the production of waste-based cement	7
Is biomass ash an effective product for use in cereal crops in an agroecological system?	2
Removal of alprazolam in contaminated waters: Evaluation of alternative adsorbents	6
A circular approach for landfill leachate treatment: Chemical precipitation with biomass ash followed by bioremediation through microalgae	6
Study of cure conditions effect on the properties of wood biomass fly ash geopolymers	5
Durability of Concrete Structures with Sugar Cane Bagasse Ash	5
Cultivation of <i>Urochloa brizantha</i> under different soil densities and doses of wood ash	6

Fonte: A autora, 2023.

Figura 23 - Nível de TRL médio por setor.

Fonte: A autora, 2023.

4.4 ESTUDO DE CASO

Após avaliar o TRL dos oito artigos selecionados na revisão sistemática. Foi selecionado um artigo para elevar o nível de maturidade, como estudo de caso, dentre os trabalhos com TRL igual a 6. Ao avaliar a temática dos artigos, foi escolhido o trabalho publicado por Pereira, V.C; do Nascimento, P.M.K.B; Nunes, C N; Gimenes, M L; Cordeiro, P H Y; de Lima, L S e Quináia, S P, cujo título é: *“Removal of alprazolam in contaminated waters: Evaluation of alternative adsorbents”*. Esse trabalho apresenta a remoção de fármacos em ambientes aquáticos, como em sistemas de tratamentos de águas e

esgotos. Os autores propõem a utilização da cinza *in natura* em um sistema batelada, o que se caracteriza como mais um fator de escolha, visto seu maior potencial econômico.

4.4.2 *Removal of Alprazolam in Contaminated Waters: Evaluation of Alternative Adsorbents*

Com o maior consumo de medicamentos, tanto pela indústria agropecuária como pela população, fármacos vêm sendo encontrados mais frequentemente em estações de tratamento de esgotos e águas superficiais (Richard et.al, 2014 e Tambosi, 2008). O principal meio de aporte de fármacos no ambiente aquático ocorre por meio das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) (PEREIRA et. al, 2019).

O Alprazolam (ALP), é um contaminante emergente e pertence a um grupo de substâncias denominado Benzodiazepínicos (BDZs), que são fármacos ansiolíticos que atuam sobre o sistema nervoso central (SNC) e possuem efeitos sedativos e hipnóticos (PEREIRA et.al, 2019, CARVALHO et.al, 2014).

Estudos apresentam uma remoção de 30 a 35% do fármaco em ETE, e a metodologia de Pereira et. al (2019), apresentou uma remoção de 67,1% utilizando cinzas de biomassa como adsorvente. Com isso, é possível ser otimista quanto à aplicação de cinzas provenientes da combustão de biomassa em caldeiras como um adsorvente alternativo para remoção de poluentes em efluentes.

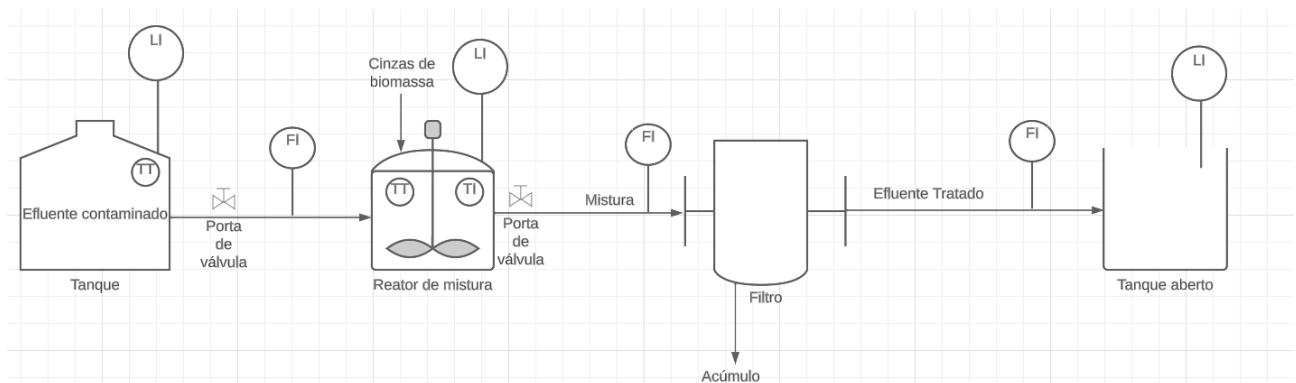
Pereira et. al (2019) utilizaram Resíduo de Casca de Caldeira (RCC) proveniente da queima incompleta de biomassa e o resíduo foi incorporado ao processo sem nenhum tipo de tratamento. Foi preparada uma solução de 100 mL utilizando amostra de água coletada em um lago de água doce, apresentando valores de pH igual a 7,86 e oxigênio dissolvido de 10 mg L⁻¹ a uma temperatura de 25,5°C. A amostra foi enriquecida com ALP (50 mg L⁻¹) com 0,007 g de RCC. Em seguida, a amostra foi agitada por 90 minutos em um agitador e posteriormente, filtrada. O estudo foi realizado visualizando o processo em batelada e em leito fixo, sendo o primeiro, o ponto focal do presente trabalho, pois é o processo mais simples, que apresenta maior custo-benefício e uma remoção de 84,2% de ALP da água do lago.

4.4.3 Sistema de Remoção de Fármacos com Adsorvente à Base de Cinzas de Caldeiras

O efluente contaminado, armazenado em um tanque deve ser transferido para um tanque/reator de mistura onde permanece em agitação com as cinzas de caldeiras, durante 90 minutos, em condições normais de temperatura e pressão. Após a homogeneização, a mistura passa por um filtro, onde parte do contaminante e as cinzas são filtradas, para então, o efluente tratado ser destinado da forma correta. A Figura 24 apresenta o esquema do processo de adsorção proposto.

Como apresentado no estudo realizado por Rossi et.al (2020), a aplicação de cinzas como adsorventes apresenta resultados promissores na qualidade da água tratada, removendo não só os fármacos, mas também corantes e metais pesados. A fim de avaliar o verdadeiro potencial técnico-econômico do produto, torna-se viável realizar sua aplicação de maneira interna, ou seja, em indústrias de cogeração e quaisquer outras que utilizam caldeiras para geração de vapor, visto que as cinzas são resíduos de seus processos, e conseqüentemente, não há custos adicionais para sua aplicabilidade nas estações de tratamento de efluentes.

Figura 24 - Esquema do processo de adsorção de fármacos em efluentes.



Fonte: A autora, 2023.

A quantidade de efluentes líquidos gerados por uma empresa de cogeração depende de vários fatores, como o tipo de combustível utilizado, o processo de geração de energia, o consumo de água e o tratamento dos resíduos. De acordo com o estudo realizado por Albuquerque (2005), uma usina termelétrica a biomassa que utiliza bagaço de cana como combustível pode gerar cerca de 0,2 m³ de efluentes líquidos por

tonelada de bagaço consumido. Considerando um consumo médio de 2,5 toneladas de bagaço por MWh de energia produzida, isso significa que essa usina pode gerar cerca de 0,5 m³ de efluentes líquidos por MWh. Considerando uma potência instalada de 100 MW e um fator de capacidade de 50%, isso significa que essa usina pode gerar cerca de 600 m³ de efluentes líquidos por dia, ou 18.000 m³ por mês.

Ao fazer uma correlação direta com a metodologia proposta por Pereira et. al (2019), foi possível determinar a quantidade de cinzas necessárias para tratar um volume de efluente estimado em 18.000 m³. Pereira et.al (2019) propôs o experimento de 100 mL de amostra com 50 mg L⁻¹ de ALP para tratamento com 0,007g de RCC. Para tratar os 18.000 m³ propostos, se faz necessário de 1260 kg de cinzas, como apresentado pela equação abaixo. Foi considerado somente uma estimativa base, porém outros fatores devem ser considerados, como a caracterização físico-química do efluente a ser tratado.

$$100 \text{ mL de solução} \text{ --- } 0,007 \text{ g de cinzas}$$

$$1,8 \times 10^{10} \text{ mL de solução} \text{ --- } x \text{ g de cinzas}$$

$$x = 1260000 \text{ g de cinzas} = 1.260 \text{ kg de cinzas}$$

Para avaliar a complexidade do esquema proposto pela Figura 25, o qual consiste em um tanque, uma válvula, um reator, um filtro e um acumulador, foi realizado um cálculo preliminar para dimensionar esses componentes. Para um cálculo efetivo deve-se considerar alguns fatores, como a vazão de efluentes, a concentração de fármacos, a dosagem de cinzas, o tempo de contato, a eficiência de remoção e o volume de lodo gerado. O cálculo baseia-se em sua aplicação, característica de cada indústria, mas é possível usar algumas referências bibliográficas que apresentam métodos e exemplos de dimensionamento de sistemas similares.

No APÊNDICE B consta o memorial de cálculo realizado para a definição dos valores apresentados pela Tabela 8, considerando uma entrada de 18.000 m³ cúbicos de efluentes e 1.260 kg de cinzas por mês.

Ademais, foi determinado o tempo de contato das cinzas com o efluente no reator com base no estudo apresentado por Cacuro e Waldman (2015), e o tempo estipulado foi 12 horas, considerando uma dosagem de 70 g de cinzas por m³ de efluente em uma vazão de 25 m³/h. Assim, considerando que o processo apresente um tempo de

operação de 24 horas por dia, e considerando as demais informações apresentadas, foi possível determinar as demais dimensões do filtro, o qual conta com uma área superficial de 120 m², altura da camada filtrante igual a 1,07 m atuando a uma velocidade de filtração de 5 m/h.

Tabela 8 - Dimensionamento dos equipamentos.

Componente	Volume (m³)	Diâmetro (m)	Altura (m)
Tanque	600,00	8,48	10,6
Reator	300,00	5,03	15,09
Acumulador	30,00	2,67	5,35
Filtro	-	11,93	-
Válvula	-	0,09	-

Fonte: A autora, 2023.

A partir dos dados estimados, o planejamento demonstra ser viável, visto que 50 toneladas de cinzas são produzidas mensalmente em sistemas de combustão em caldeiras. A aplicação de cinzas como adsorvente dentro do modelo proposto, pode apresentar benefícios na remoção de cor, turbidez e DQO, como apresentado na literatura, sendo uma escolha muito sustentável e rentável em sistemas de tratamento de água e efluentes.

4.4.4 Próximos Passos para Alcançar o TRL 9

O potencial econômico desse processo de tratamento de efluentes depende da integração com a cadeia produtiva da biomassa, da valorização dos bioprodutos gerados, da eficiência do processo de adsorção e da localidade de implementação. Uma avaliação técnico-econômica detalhada para estimar os custos e benefícios do processo requer a definição do escopo do projeto, o dimensionamento dos componentes e insumos, a realização de uma análise econômica para avaliar a viabilidade financeira do projeto e uma análise ambiental para avaliar os possíveis impactos à biodiversidade. Os dois primeiros critérios foram atendidos, pelos idealizadores do projeto, e pelo estudo de caso apresentado no presente trabalho. Apesar, deste trabalho apresentar uma limitação de pesquisa ao não realizar uma análise econômica preliminar.

Ao implementar os resultados apresentados pelo estudo de caso, a produção científica se caracterizaria com um nível de maturidade tecnológica igual a 8,

caso o protótipo dimensionado apresente viabilidade. Ao confirmar a viabilidade, o protótipo se encontraria pronto para a fase de produção, restando somente a verificação e validação do sistema, comparando os resultados obtidos com os requisitos definidos e avaliando o desempenho, a funcionalidade, a confiabilidade, a durabilidade, a manutenibilidade e a usabilidade do sistema em um ambiente operacional real. Para alcançar o nível de produção continuada (TRL 9), sugere-se que o produto seja patenteado visando atender todas as documentações necessárias e legislações vigentes, em especial, as apresentadas pelo Quadro 4. Outra sugestão, seriam novos cálculos de dimensionamento visando “compactar” a ETE, a depender do local de instalação, visto que os componentes avaliados apresentam grandes dimensões.

Quadro 4 - Principais legislações brasileiras aplicadas à tecnologia.

Título da legislação	Resumo
Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981	Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências.
Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997	Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1982.
Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010	Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.
Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março 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.
Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011	Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005.
Resolução CONAMA nº 313, de 29 de outubro de 2002	Dispõe sobre o Inventário Nacional dos Resíduos Sólidos Industriais.

Fonte: A autora, 2023.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisada a produção científica, em especial no cenário nacional, acerca do estudo sobre o reaproveitamento de cinzas de biomassa provenientes da combustão em caldeiras. Uma revisão sistemática da literatura combinada com uma metanálise conforme as diretrizes do método PRISMA foi realizada, e ao aplicar os diversos critérios de inclusão e exclusão, a revisão retornou 8 estudos para a análise.

Verificou-se que os estudos eram em sua maioria brasileiros, visto que sete, dos oito artigos selecionados, eram de produção nacional, enquanto somente um era de origem estrangeira (Portugal). O estado de Santa Catarina foi o que apresentou o maior número de estudos. Deve-se ainda, destacar que 37,5% dos estudos apresentam a incorporação de cinzas no setor de construção.

Ao avaliar a abordagem dos estudos sobre o tema, foi possível identificar a versatilidade do uso de cinzas em diferentes tipos de processos. A reutilização de cinzas, nos trabalhos, ocorreu de forma direta e indireta, tanto com aplicabilidades simples quanto complexas. Dentre as mais diversas formas de aplicação, em uma apresentou a incorporação das cinzas para produção de cimento, como alternativa para a substituição do clínquer na matriz cimentícia. E na área de desenvolvimento ambiental, o uso das cinzas para remoção de poluentes em ETE e aterros sanitários e na incorporação em solo para cultivo.

A avaliação da maturidade tecnológica dos estudos selecionados, utilizando a calculadora de TRL *AVALchek*, apresentou uma média de 5,5. Este resultado representa a fase de testes laboratoriais e desenvolvimento da prototipagem, indicando que o nível tecnológico dos estudos ainda está distante de um produto que possa ser, de fato, comercializado. Os estudos relacionados ao setor de construção apresentaram maior TRL.

O estudo de caso foi realizado com o artigo que apresentou TRL igual a 6 e com maior potencial econômico, visto que o processo avaliado foi em batelada, com a utilização das cinzas *in natura*. O protótipo apresentado foi um sistema de tratamento de efluentes que visa a adsorção de fármacos em efluentes, na qual a cinza apresenta-se como o material adsorvente. O processo apresentou uma viabilidade técnica de implementação, visto que o principal insumo (cinzas) e os equipamentos definidos são de fácil aquisição. Avaliou-se que a implementação dos resultados obtidos no estudo de caso pode elevar o TRL da tecnologia para o nível 8. Ademais, para alcançar o nível de

produção continuada, faz-se necessário a continuidade da avaliação técnico-econômica do protótipo, bem como a proteção da tecnologia e a regulamentação de toda a documentação necessária para a viabilização do produto.

Portanto, o presente estudo atingiu os objetivos propostos, mesmo possuindo limitações para a proposição do estudo de caso. Ademais, fica a provocação: *Como podemos aumentar o nível de maturidade tecnológica em nossos Trabalhos de Conclusão de Curso?*

REFERÊNCIAS

ABRAHAM, R.; GEORGE, J.; THOMAS, J.; YUSUFF, K. K. M. Physicochemical characterization and possible applications of the waste biomass ash from oleoresin industries of India. **Fuel**, v. 109, p. 366–372, 2013. Elsevier.

ADANEZ, J.; ABAD, A.; GARCIA-LABIANO, F.; GAYAN, P.; DE DIEGO, L. F. Progress in Chemical-Looping Combustion and Reforming technologies. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 38, n. 2, p. 215–282, 2012. Pergamon.

AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA. **Manual de uso da ferramenta IMATEC**. 2018. Disponível em: <https://imatec.aeb.gov.br/resources/img/manual/manual.pdf/>. Acesso em: 12 set. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. União da Indústria da Cana-de-açúcar. Centro de Tecnologia Canavieira. **Manual de Conservação e Reuso de Água na Agroindústria Sucroenergética**. Brasília-DF: 2009.

AHMADI, P.; DINCER, I.; ROSEN, M. A. Thermoeconomic multi-objective optimization of a novel biomass-based integrated energy system. **Energy**, v. 68, p. 958–970, 2014. Pergamon.

ALBUQUERQUE, Ademir Gonçalves. **Avaliação exergética dos efluentes do processo industrial do álcool**. 2005. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. doi:10.11606/D.18.2005.tde-17052006-105609. Acesso em: 2023-09-27.

AL-MANSOUR, F.; ZUWALA, J. An evaluation of biomass co-firing in Europe. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 5, p. 620–629, 2010. Pergamon.

ALMEIDA HC et al. 2007. Composição química de um resíduo alcalino da indústria de papel e celulose (DREGS). *Química Nova* 30: 1669-1672.

ANDRÉIA, R. et al. Cultivation of *Urochloa brizantha* under different soil densities and doses of wood ash. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 3, p. 230–238, 1 mar. 2023.

ANEEL, 2005, Atlas de Energia Elétrica do Brasil, **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2ª ed., Brasília, DF.

ASSOCIAÇÃO BAIANA DAS EMPRESAS DE BASE FLORESTAL. **ABAF: Biomassa Florestal**. Disponível em: < <https://www.abaf.org.br/produtos/biomassa-florestal/#:~:text=Biomassa%20%C3%A9%20um%20recurso%20renov%C3%A1vel,escala%2C%20os%20pellets%20de%20madeira.>>. Acesso em: 05 ago. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR ISSO 16290: Sistemas espaciais – Definição dos níveis de maturidade da tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12177-1 – Caldeiras estacionárias a vapor – Inspeção de segurança – Caldeiras flamotubulares**. Brasília, DF, 1999.

AVALchek. **Manual do usuário**. Disponível em: <https://cinttec.ufs.br/uploads/page_attach/path/18137/Manual_do_usu_rio.pdf>. Acesso em: 17 set. 2023.

BALAT, MUSTAFA; BALAT, MEHMET; KIRTAY, E.; BALAT, H. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 12, p. 3147–3157, 2009. Disponível em: <http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:41074237>. Acesso em: 2 jul. 2022.

BAXTER, L. L. Ash deposition during biomass and coal combustion: A mechanistic approach. **Biomass and Bioenergy**, v. 4, n. 2, p. 85–102, 1993. Pergamon.

BAZZO, Edson. **Geração de vapor**. 2. ed. Florianópolis: Ed. UFSC, 1995.

BERENQUER, R. et al. Durability of Concrete Structures with Sugar Cane Bagasse Ash. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2020, p. e6907834, 5 out. 2020.

BEGA, E. A. **Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras**. 3.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. p. 179.

BRASIL. **MCTI institui a calculadora de maturidade tecnológica baseada no Technology Readiness Level (TRL)**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2022/10/mcti-institui-a-calculadora-de-maturidade-tecnologica-baseada-no-technology-readiness-level-trl>>. Acesso em: 01 set. 2023.

BREWSTER, J. Economic Impact of Modern Kraft Recovery Boilers. *Tappi International Chemical Recovery Conference*, p. 9-14, 2007.

CACURO, T. A.; WALDMAN, W. R. Fly-Ash from Biomass Burning: Applications and Potentialities. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 6, p. 2154–2165, 2015.

Carvalho, A. J. P.; Dordio, A. V.; Ramalho, J. P. P.; A DFT study on the adsorption of benzodiazepines to vermiculite surfaces. **Journal of Molecular Modeling** 2014, 20, 2336.

CAPDEVILLE, G. D.; ALVES, A. A.; BRASIL, D. S. A. **Modelo de Inovação e Negócios da Embrapa Agroenergia**: Gestão Estratégica Integrada de P&D e TT. EMBRAPA Agroenergia, 2017. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/173992/1/DOC-24-CNPAE.pdf>>. Acesso em: 09 set. 2023.

CHERNEY, J. H.; VERMA, V. K. Grass pellet Quality Index: A tool to evaluate suitability of grass pellets for small scale combustion systems. **Applied Energy**, v. 103, p. 679–684, 2013. Elsevier.

CNI - Perfil da Indústria nos Estados. Disponível em:

<<https://perfildaindustria.portaldaindustria.com.br/>>. Acesso em: 10 ago. 2023.

CORMA, A.; DE LA TORRE, O.; RENZ, M.; VILLANDIER, N. Production of high-quality diesel from biomass waste products. **Angewandte Chemie - International Edition**, v. 50, n. 10, p. 2375–2378, 2011.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 2, p. 219–230, 2004. Pergamon.

DEMIRBAS, A. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 31, n. 2, p. 171–192, 2005. Elsevier Ltd.

DEMIRBAS, A. The influence of temperature on the yields of compounds existing in bio-oils obtained from biomass samples via pyrolysis. **Fuel Processing Technology**, v. 88, n. 6, p. 591–597, 2007.

DEMIRBAŞ, A. Partly chemical analysis of liquid fraction of flash pyrolysis products from biomass in the presence of sodium carbonate. **Energy Conversion and Management**, v. 43, n. 14, p. 1801–1809, 2002.

DEPARTMENT OF DEFENSE OF UNITED STATES OF AMERICA. Unified Facilities Criteria (UFC) 3-240-13FN – **Industrial Water Treatment Operation And Maintenance**. Estados Unidos da América, 25 maio 2005. Disponível em: <http://www.wbdg.org/ccb/DOD/UFC/ufc_3_240_13fn.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2023.

DUKELOW, S. G. **The Control of Boilers**. International Society of Automation. 2. ed. 1991. p. 414.

EMBRAPA. **Manual sobre o uso da escala TRL/MRL**. Disponível em: <<https://cloud.cnpqg.embrapa.br/nap/files/2018/08/EscalaTRL-MRL-17Abr2018.pdf>>. Acesso em: 01 set. 2023.

FERREIRA, D. J. O. **Modelagem de Caldeira de Recuperação Química Kraft**. 2013. Tese (Doutorado) – Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

FONSECA, J. A. DA; HANISCH, A. L. Cinza de biomassa é um produto eficiente para uso em sistema de produção de cereais em base agroecológica? **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 4, p. 454–461, 21 nov. 2018.

FOURNEL, S.; PALACIOS, J. H.; MORISSETTE, R.; et al. Influence of biomass properties on technical and environmental performance of a multi-fuel boiler during on-farm combustion of energy crops. **Applied Energy**, v. 141, p. 247–259, 2015. Elsevier.

FRANDSEN, J.; WU, H.; GLARBORG, P.; JAPPE FRANDSEN, F.; DAM-JOHANSEN, K. General rights Solid fuel interactions in co-combustion a literature survey Solid fuel interactions in co-combustion-a literature survey. , 2011.

FRYDA, L.; SOBRINO, C.; CIEPLIK, M.; VAN DE KAMP, W. L. Study on ash deposition under oxyfuel combustion of coal/biomass blends. **Fuel**, v. 89, n. 8, p. 1889–1902, 2010.

Elsevier.

GALVÃO TF, PANSANI TS, HARRAD D. Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *Epidemiol Serv Saúde*. 2015;24:335-42.

GARBA, M. U.; INGHAM, D. B.; MA, L.; et al. Modelling of deposit formation and sintering for the co-combustion of coal with biomass. *Fuel*, v. 113, p. 863–872, 2013. Elsevier.

HENNE, R. A.; BRAND, M. A.; SCHEIN, V. A. S.; PEREIRA, E. R.; SCHVEITZER, B. CHARACTERIZATION OF ASHES FROM FOREST BIOMASS COMBUSTION IN BOILERS: A SYSTEMIC VIEW OF POTENTIAL APPLICATIONS. *FLORESTA*, v. 50, n. 1, p. 1081–1090, 2019. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/61229>>. Acesso em: 27 jun. 2022.

IBI - International Biochar Initiative. **Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil**. versão 2.1, novembro 2015.

JENKINS, B. M.; BAXTER, L. L.; MILES, T. R.; MILES, T. R. Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, v. 54, n. 1–3, p. 17–46, 1998. Elsevier.

KAMM, J. A new class of plants for a biofuel feedstock energy crop. *Applied biochemistry and biotechnology*, v. 113–116, n. 1–3, p. 055–070, 2004. *Appl Biochem Biotechnol*. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15054196/>>. Acesso em: 2 jul. 2022.

KUMAR, A.; KUMAR, N.; BARENDAR, P.; SHUKLA, A. A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 45, p. 530–539, 2015. Pergamon.

LARKIN, S., RAMAGE, J., SCURLOCK, J., 2004, “Bioenergy”. In: BOYLE, G. (ed.), **Renewable Energy: Power for a Sustainable Future**, 2ª ed., capítulo 4, New York, USA, Oxford University Press.

LEINO, T. J.; AHO, M. J.; GYNTER, S. J.; RUUSKANEN, T. A.; HÄKKINEN, M. H. Experiences from a Novel Sensor for Fireside Corrosion Monitoring during Grate Combustion of Corn Stover/Wood Chip Blends. *Energy and Fuels*, v. 27, n. 10, p. 5653–5662, 2013. American Chemical Society. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef400492c>>. Acesso em: 3 jul. 2022.

LI, L.; YU, C.; BAI, J.; WANG, Q.; LUO, Z. Heavy metal characterization of circulating fluidized bed derived biomass ash. *Journal of Hazardous Materials*, v. 233–234, p. 41–47, 2012. Elsevier.

LIMA, A.C.; CUNHA, D.; & ALBUQUERQUE, R.; COSTA, R.; JUSTINO, H. (2018). ALTERAÇÕES SENSORIAIS EM RESPIRADORES ORAIS: REVISÃO SISTEMÁTICA BASEADA NO MÉTODO PRISMA. *Revista Paulista de Pediatria*. 37. 10.1590/1984-0462/2019;37;1;00012.

LIU, X.; WANG, W.; SHI, Y.; et al. Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal biomass waste and waste activated sludge in China: Effect of organic loading rate. *Waste*

Management, v. 32, n. 11, p. 2056–2060, 2012. Pergamon.

MACHADO, A. S. et al. Quantificação por DRX dos componentes carbonosos presentes no pó de balão do alto-forno. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 8, n. 4, p. 254-260, 2011.

MANKINS, J. C. **Technology Readiness Levels: A White Paper**. Advanced Concepts Office, Office of Space Access and Technology: NASA, 1995. Disponível em: <https://www.spacepropulsion.org/uploads/2/5/3/9/25392309/john_mankins_paper_of_4-6-95_trl.pdf>. Acesso em: 07 set. 2023.

MCILVEEN-WRIGHT, D. R.; HUANG, Y.; REZVANI, S.; et al. A Techno-economic assessment of the reduction of carbon dioxide emissions through the use of biomass co-combustion q. , 2011.

MENON, V.; RAO, M. Trends in bioconversion of lignocellulose: Biofuels, platform chemicals & biorefinery concept. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 38, n. 4, p. 522–550, 2012. Pergamon.

MÍGUEZ, J. L.; MORÁN, J. C.; GRANADA, E.; PORTEIRO, J. Review of technology in small-scale biomass combustion systems in the European market. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 3867–3875, 2012.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: MME/EPE, 2007.

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI. **MCTI INSTITUI A CALCULADORA DE MATURIDADE TECNOLÓGICA NA METODOLOGIA TRL**. Disponível em: <<https://invest.mcti.gov.br/blog/mcti-institui-a-calculadora-de-maturidade-tecnologica-na-metodologia-trl/>>. Acesso em: 20 set. 2023.

MOSIER, N.; WYMAN, C.; DALE, B.; et al. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 96, n. 6, p. 673–686, 2005. Elsevier.

NASCIMENTO, F. et al. Cinza de biomassa rica em calcário como material carbonático em sistemas cimentícios de base Portland. **Cerâmica**, v. 65, n. 373, p. 85–91, 1 jan. 2019.

NÓBREGA, P. C. **Efeitos do Biochar nas Propriedades Físicas e Químicas do Solo**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Ambiente, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.

NUNES, L. J. R.; GODINA, R.; MATIAS, J. C. O.; CATALÃO, J. P. S. Evaluation of the utilization of woodchips as fuel for industrial boilers. **Journal of Cleaner Production**, v. 223, p. 270–277, 2019. Elsevier.

NUNES, L. J. R.; MATIAS, J. C. O.; CATALÃO, J. P. S. Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 235–242, 2016. Pergamon.

OGAWA, M.; OKIMORI, Y.; TAKAHASHI, F. Carbon sequestration by carbonization of biomass and forestation: three case studies. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 11, n. 2, p. 421–436, 2006.

OLECHOWSKI, A.; EPPINGER, D. S.; JOGLEKAR, N.; TOMASCHEK, K. Technology Readiness Levels at 40: A Study of State-of-the-Art Use, Challenges, and Opportunities. **CONFERENCE PICMET 2015**, p. 2084-2094, 2015. Disponível em: <<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/109222>>. Acesso em: 07 set. 2023.

Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* 2021;372:n71. doi: 10.1136/bmj.n71

PAOLIELLO, F. A.; ALVEZ, A. C.; MAESTRI, E.; NETO, J. F.; ASPGREN, L. P. Guide for recovery boiler inspection. CSBR – Safety Committee in (Chemical) Recovery Boiler of Brazil. ABTCP, 2002.

PEREIRA, V. C. et al. Removal of Alprazolam in Contaminated Waters: Evaluation of Alternative Adsorbents. **Revista Virtual de Química**, 1 jan. 2019.

PISA, I.; LAZAROIU, G. Influence of co-combustion of coal/biomass on the corrosion. **Fuel Processing Technology**, v. 104, p. 356–364, 2012. Elsevier.

PZ, B.; KH, N.; SS, F.; RM, N.; AF, L. APLICAÇÃO DE ZEÓLITAS SINTETIZADAS A PARTIR DE CINZAS DE CARVÃO COMO ADSORVENTES.

QUINTELLA, C. M.; RIBEIRO, N. M.; GONÇALVES, K. F.; LINHARES, M. V. D.; PATERNOSTRO, A. G. Maturidade Tecnológica: níveis de prontidão TRL. **Coleção PROFNIT**, Salvador, v. 2, p. 18-54, 2019. Disponível em: <<https://www.profnit.org.br/wp-content/uploads/2019/02/PROFNIT-Serie-Prospeccao-Tecnologica-Volume-2.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

Richard, J.; Boergers, A.; Vom eyser, C.; Bester, K.; Tuerk, J.; Toxicity of the micropollutants Bisphenol A, Ciprofloxacin, Metoprolol and Sulfamethoxazole in water samples before and after the oxidative treatment. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 2014, 217, 506.

RIZVI, T.; XING, P.; POURKASHANIAN, M.; et al. Prediction of biomass ash fusion behaviour by the use of detailed characterisation methods coupled with thermodynamic analysis. **Fuel**, v. 141, p. 275–284, 2015. Elsevier.

ROCHA, D.; MELO, L. C. D.; RIBEIRO, J. Uma adaptação da metodologia TRL. *Revista Gestão em Engenharia*, São José dos Campos, v. 4, n. 1, p. 45-56, 2017. Disponível em: <<http://www.mec.ita.br/~cge/RGE/ARTIGOS/v04n01a04.pdf>>. Acesso em: 07Set. 2023.

ROSSI, A. et al. Study of cure conditions effect on the properties of wood biomass fly ash geopolymers. **Journal of materials research and technology**, v. 9, n. 4, p. 7518–7528, 1 jul. 2020.

SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E. A.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M. S.; MEKHILEF, S. A review

on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2262–2289, 2011. Pergamon.

SAREV, Allan Sven; MARTINELLI JUNIOR, Luiz Carlos. Características e tratamento da água para geradores de vapor. **Cadernos Unijuí**, Série Tecnologia Mecânica, n. 7, 1998.

SCHMIDT, H. P. 55 Uses of Biochar. **Ithaka Journal**, n. Viticulture Ecology Climate - Farming, p. 286-289, 2012.

SIMÃO, L. et al. CHARACTERIZATION OF PULP AND PAPER MILL WASTE FOR THE PRODUCTION OF WASTE-BASED CEMENT. **Revista Internacional de Contaminación Ambiental**, v. 35, n. 1, p. 237–246, 1 fev. 2019.

SOMMERSACHER, P.; BRUNNER, T.; OBERNBERGER, I. Fuel Indexes: A Novel Method for the Evaluation of Relevant Combustion Properties of New Biomass Fuels. **Energy and Fuels**, v. 26, n. 1, p. 380–390, 2011. American Chemical Society. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef201282y>>. Acesso em: 3 jul. 2022.

STRIEDER, G. B. UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ CAMPUS SANTA HELENA. , 2021.

TAMBOSI, J. L.; Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2008.

TAMURA, M.; UCHIDA, M.; OONO, E.; et al. Computationally Predicted Performance of Pulverised Coal Fired Boilers and Study of Ash Deposition Phenomenon. **American Society of Mechanical Engineers, Power Division (Publication) POWER**, v. 1, n. 1, p. 141–146, 2012. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.

TEIXEIRA, P.; LOPES, H.; GULYURTLU, I.; LAPA, N. Uncertainty estimation to evaluate mass balances on a combustion system. **Accreditation and Quality Assurance**, v. 17, n. 2, p. 159–166, 2012.

THOMAS, M.; DUNSTER, A.; NIXON, P.; BLACKWELL, B. Effect of fly ash on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction – Exposure site studies. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 3, p. 359–367, 2011. Elsevier.

UDEN, P. C. NOMENCLATURE AND TERMINOLOGY FOR ANALYTICAL PYROLYSIS (IUPAC RECOMMENDATIONS 1993). **Pure and Applied Chemistry**, v. 65, n. 11, p. 2405-2409, Nov 1993.

VALENTE, M. **Como avaliar a maturidade tecnológica no desenvolvimento do seu produto: technology readiness assessment**. 2020. Disponível em: <<https://certi.org.br/blog/tra-desenvolvimento-de-produto/>>. Acesso em: 11 set. 2023.

VARTAPETYAN, R. S.; VOLOSHCHUK, A. M. Adsorption mechanism of water molecules on carbon adsorbents. **Uspekhi Khimii**, v. 64, n. 11, p. 1055-1072, 1995 1995.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. An Overview of the Chemical Composition of Biomass. **Fuel**, v. 89, n. 5, p. 913–933, 2010. Disponível em:

<<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC53196>>. Acesso em: 2 jul. 2022.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase–mineral and chemical composition and classification. **Fuel**, v. 105, p. 40–76, 2013. Elsevier.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G.; MORGAN, T. J. An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. **Fuel**, v. 94, p. 1–33, 2012. Elsevier.

VASSILEV, S. V.; VASSILEVA, C. G. Methods for Characterization of Composition of Fly Ashes from Coal-Fired Power Stations: A Critical Overview. **Energy and Fuels**, v. 19, n. 3, p. 1084–1098, 2005. American Chemical Society . Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef049694d>>. Acesso em: 3 jul. 2022.

VALE. **Operador de caldeira.** Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/Sergio1500/caldeiras-44542296>>. Acesso em: 26 set. 2023.

VELHO, S.R. K.; SIMONETTI, M. L.; SOUZA, C. R. P.; IKEGAMI, M. Y. Nível de Maturidade Tecnológica: uma sistemática para ordenar tecnologias. **Parcerias Estratégicas**, v. 22, n. 45, p. 119-140, 2017. Disponível em: <http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/viewFile/867/7> . Acesso em: 8 set. 2023.

VERINGA, H.J., 2000, Advanced Techniques for Generation of Energy from Biomass and Waste, Energy research Centre of the Netherlands – ECN. Disponível em: http://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/bio/Overig/pdf/Biomassa_voordelen.pdf. Acesso em: 05 ago. 2023.

VIEGAS, C. et al. A circular approach for landfill leachate treatment: Chemical precipitation with biomass ash followed by bioremediation through microalgae. **Journal of environmental chemical engineering**, v. 9, n. 3, p. 105187–105187, 1 jun. 2021.

VIEIRA, G. F. **PROPOSTA DE UM MODELO PARA AVALIAÇÃO DO TRL EM PROJETOS DE PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de engenharia de Transportes e Logística, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2021.

VIEIRA PEREIRA, S. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL ESCOLA DE ENGENHARIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA. , 2006.

WILLIAMS, A.; JONES, J. M.; MA, L.; POURKASHANIAN, M. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 38, n. 2, p. 113–137, 2012.

XAVIER JR., A. et al. AEB Online Calculator for Assessing. **Journal Aerospace Technology and Management**, v. 12, 2020.

YAMAN, S. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. **Energy Conversion and Management**, v. 45, n. 5, p. 651–671, 2004. Pergamon.

YILDIZ, G.; RONSSE, F.; VENDERBOSCH, R.; et al. Effect of biomass ash in catalytic fast pyrolysis of pine wood. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 168–169, p. 203–211, 2015. Elsevier.

Zarpelon, W.; Azzolini, J. C. Caldeiras de alta pressão: caracterização e avaliação da qualidade do tratamento das águas de abastecimento. **Unoesc & Ciência – ACET Joaçaba**, v. 6, n. 2, p. 141-154, 2015.

ZHAI, J.; BURKE, I. T.; STEWART, D. I. Potential reuse options for biomass combustion ash as affected by the persistent organic pollutants (POPs) content. **Journal of Hazardous Materials Advances**, v. 5, p. 100038, 2022. Elsevier.

ZHU, J. Y.; ZHUANG, X. S. Conceptual net energy output for biofuel production from lignocellulosic biomass through biorefining. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 38, n. 4, p. 583–598, 2012. Pergamon.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CHECKLIST PRISMA

Seção/tópico	N.	Item do <i>checklist</i>	Relatado na página n.
TÍTULO			
Título	1	Identifique o artigo como uma revisão sistemática, meta-análise, ou ambos.	1
ABSTRACT			
Resumo estruturado	2	Apresente um resumo estruturado incluindo, se aplicável: referencial teórico; objetivos; fonte de dados; critérios de elegibilidade; participantes e intervenções; avaliação do estudo e síntese dos métodos; resultados; limitações; conclusões e implicações dos achados principais; número de registro da revisão sistemática.	7
INTRODUÇÃO			
Racional	3	Descreva a justificativa da revisão no contexto do que já é conhecido.	12
Objetivos	4	Apresente uma afirmação explícita sobre as questões abordadas com referência a participantes, intervenções, comparações, resultados e desenho de estudo (PICOS).	12
MÉTODOS			
Protocolo e registro	5	Indique se existe um protocolo de revisão, se e onde pode ser acessado (ex. endereço eletrônico), e, se disponível, forneça informações sobre o registro da revisão, incluindo o número de registro.	48
Critérios de elegibilidade	6	Especifique características do estudo (ex. PICOS, extensão do seguimento) e características dos relatos (ex. anos considerados, idioma, se é publicado) usadas como critérios de elegibilidade, apresentando justificativa.	49
Fontes de informação	7	Descreva todas as fontes de informação na busca (ex. base de dados com datas de cobertura, contato com autores para identificação de estudos adicionais) e data da última busca.	49
Busca	8	Apresente a estratégia completa de busca eletrônica para pelo menos uma base de dados, incluindo os limites utilizados, de forma que possa ser repetida.	49
Seleção dos estudos	9	Apresente o processo de seleção dos estudos (isto é, busca, elegibilidade, os incluídos na revisão sistemática, e, se aplicável, os incluídos na meta-análise).	49, 50 e 51
Processo de coleta de dados	10	Descreva o método de extração de dados dos artigos (ex. formas para piloto, independente, em duplicata) e todos os processos para obtenção e confirmação de dados dos pesquisadores.	49, 50 e 51
Lista dos dados	11	Liste e defina todas as variáveis obtidas dos	49, 50 e 51

		dados (ex. PICOS, fontes de financiamento) e quaisquer suposições ou simplificações realizadas.	
Risco de viés em cada estudo	12	Descreva os métodos usados para avaliar o risco de viés em cada estudo (incluindo a especificação se foi feito durante o estudo ou no nível de resultados), e como esta informação foi usada na análise de dados.	49,50 e 51
Medidas de sumarização	13	Defina as principais medidas de sumarização dos resultados (ex. risco relativo, diferença média).	N/A
Síntese dos resultados	14	Descreva os métodos de análise dos dados e combinação de resultados dos estudos, se realizados, incluindo medidas de consistência (por exemplo, I ²) para cada meta-análise.	49,50 e 51
Risco de viés entre estudos	15	Especifique qualquer avaliação do risco de viés que possa influenciar a evidência cumulativa (ex. viés de publicação, relato seletivo nos estudos).	N/A
Análises adicionais	16	Descreva métodos de análise adicional (ex. análise de sensibilidade ou análise de subgrupos, metarregressão), se realizados, indicando quais foram pré-especificados.	49 e 50
RESULTADOS			
Seleção de estudos	17	Apresente números dos estudos rastreados, avaliados para elegibilidade e incluídos na revisão, razões para exclusão em cada estágio, preferencialmente por meio de gráfico de fluxo.	50
Características dos estudos	18	Para cada estudo, apresente características para extração dos dados (ex. tamanho do estudo, PICOS, período de acompanhamento) e apresente as citações.	52,53 e 54
Risco de viés entre os estudos	19	Apresente dados sobre o risco de viés em cada estudo e, se disponível, alguma avaliação em resultados (ver item 12).	52,53, 54, 55 e 56
Resultados de estudos individuais	20	Para todos os desfechos considerados (benefícios ou riscos), apresente para cada estudo: (a) sumário simples de dados para cada grupo de intervenção e (b) efeitos estimados e intervalos de confiança, preferencialmente por meio de gráficos de floresta.	N/A
Síntese dos resultados	21	Apresente resultados para cada meta-análise feita, incluindo intervalos de confiança e medidas de consistência.	N/A
Risco de viés entre estudos	22	Apresente resultados da avaliação de risco de viés entre os estudos (ver item 15).	N/A
Análises adicionais	23	Apresente resultados de análises adicionais, se realizadas (ex. análise de sensibilidade ou subgrupos, metarregressão [ver item 16]).	N/A
DISCUSSÃO			
Sumário da evidência	24	Sumarize os resultados principais, incluindo a força de evidência para cada resultado; considere sua relevância para grupos-chave (ex. profissionais da saúde, usuários e formuladores de políticas).	52,53, 54, 55 e 56

Limitações	25	Discuta limitações no nível dos estudos e dos desfechos (ex. risco de viés) e no nível da revisão (ex. obtenção incompleta de pesquisas identificadas, relato de viés).	52,53, 54, 55 e 56
Conclusões	26	Apresente a interpretação geral dos resultados no contexto de outras evidências e implicações para futuras pesquisas.	62
FINANCIAMENTO			
Financiamento	27	Descreva fontes de financiamento para a revisão sistemática e outros suportes (ex. suprimento de dados), papel dos financiadores na revisão sistemática.	N/A

APÊNDICE B – MEMORIAL DE CÁLCULOS PARA O DIMENSIONAMENTO

A seguir, será apresentado o memorial de cálculo para o dimensionamento do protótipo apresentado no item 4.4.2. Todos os valores base para os cálculos utilizam como referência o estudo apresentado por Albuquerque (2005) e Cacuro e Waldman (2015).

B.1 TANQUE

O volume do tanque foi calculado considerando uma vazão média diária (Q) de 600 m³/dia (18 mil m³/mês dividido por 30 dias), um tempo médio de detenção hidráulica (TDH) no tanque igual a um dia (24 horas), e uma forma cilíndrica com fundo plano. A fórmula usada foi:

$$VT = Q \times TDH \quad (\text{Equação 01})$$

$$VT = 600 \times 1 = 600 \text{ m}^3$$

O diâmetro (D) e a altura (H) do tanque foram estimados considerando uma relação H/D igual a 1,25 (valor típico para tanques cilíndricos com fundo plano), e uma forma circular para a base. As fórmulas usadas foram:

$$H = 1,25 \times D \quad (\text{Equação 02})$$

$$VT = \pi \times (D/2)^2 \times H \quad (\text{Equação 03})$$

Substituindo a Equação 02 na Equação 03, temos:

$$VT = \pi \times (D/2)^2 \times 1,25 \times D$$

Substituindo VT pelo valor calculado, temos:

$$600 = \pi \times (D/2)^2 \times 1,25 \times D$$

Isolando D, temos: D = 8,48 m

Substituindo D na Equação 02, temos:

$$H = 1,25 \times 8,48 = 10,6 \text{ m}$$

B.2 VÁLVULA

O diâmetro da válvula foi estimado considerando uma vazão média horária (QH) de 25 m³/h (600 m³/dia dividido por 24 horas), uma velocidade média do escoamento (V) de 1 m/s (valor usual para tubulações de esgoto), e uma forma circular para a seção transversal. A fórmula usada foi:

$$QH = A \times V \quad (\text{Equação 04})$$

Sendo A a área da seção transversal, dada por:

$$A = \pi \times (D/2)^2 \quad (\text{Equação 05})$$

Substituindo a Equação 5 na Equação 4, temos:

$$QH = \pi \times (D/2)^2 \times V$$

Substituindo QH e V (em m/h) pelos valores estimados, temos:

$$25 = \pi \times (D/2)^2 \times 3600$$

Isolando D, temos: $D = 0,09 \text{ m}$

B.3 REATOR

O Volume do Reator (VR) foi calculado considerando uma vazão média diária (Q) de 600 m³/dia, um Tempo Médio de Contato (TC) no reator igual a 12 horas, conforme sugerido por Cacuro e Waldman (2015), e uma forma cilíndrica com fundo plano. A fórmula usada foi:

$$VR = Q \text{ (m}^3\text{/h)} \times TC \quad (\text{Equação 06})$$

$$VR = 25 \times 12 = 300 \text{ m}^3\text{/h}$$

O diâmetro (D) e a altura (H) do reator foram estimados considerando uma relação H/D igual a 3 (valor típico para reatores cilíndricos com fundo plano), e uma forma circular para a base. As fórmulas usadas foram:

$$H = 3 \times D \quad (\text{Equação 07})$$

$$VR = \pi \times (D/2)^2 \times H \quad (\text{Equação 08})$$

Substituindo a Equação 07 na Equação 08, temos:

$$VR = \pi \times (D/2)^2 \times 3 \times D$$

Substituindo VR pelo valor calculado, temos:

$$300 = \pi \times (D/2)^2 \times 3 \times D$$

Isolando D, temos: $D = 5,03 \text{ m}$

Substituindo D na Equação 07, temos:

$$H = 3 \times 5,03 = 15,09 \text{ m}$$

B.4 FILTRO

A área superficial do filtro (AF) foi calculada considerando uma vazão média diária (Q) de 600 m³/dia (18 mil m³/mês dividido por 30 dias), uma velocidade média de filtração (VF) de 5 m/h como sugerido por Cacuro e Waldman (2015), e uma forma circular para a base. A fórmula usada foi:

$$AF = Q / VF \quad (\text{Equação 09})$$

$$AF = 600 / 5 = 120 \text{ m}^2$$

O diâmetro (D) e a altura da camada filtrante (H) do filtro foram estimados considerando uma relação H/D igual a 0,09, como sugerido por Cacuro e Waldman (2015), e uma forma circular para a base. As fórmulas usadas foram:

$$H = 0,09 \times D \quad (\text{Equação 10})$$

$$AF = \pi \times (D/2)^2 \quad (\text{Equação 11})$$

Substituindo a Equação 10 na Equação 11, temos:

$$AF = \pi \times (D/2)^2 \times 0,09 \times D$$

Substituindo AF pelo valor calculado, temos:

$$120 = \pi \times (D/2)^2 \times 0,09 \times D$$

Isolando D, temos: $D = 11,93 \text{ m}$

Substituindo D na Equação 10, temos:

$$H = 0,09 \times 11,93 = 1,07 \text{ m}$$

B.5 ACUMULADOR

O volume do acumulador (VA) foi calculado considerando um volume de lodo (VL) igual a 10% do volume do reator (VR), que foi estimado em 300 m^3 , conforme o cálculo anterior.

A fórmula usada foi:

$$VA = 0,1 \times VR \quad (\text{Equação 12})$$

$$VA = 0,1 \times 300 = 30 \text{ m}^3$$

O diâmetro (D) e a altura (H) do acumulador foram estimados considerando uma relação H/D igual a 2 (valor típico para tanques cilíndricos com fundo plano), e uma forma circular para a base. As fórmulas usadas foram:

$$H = 2 \times D \quad (\text{Equação 13})$$

$$VA = \pi \times (D/2)^2 \times H \quad (\text{Equação 14})$$

Substituindo a Equação 13 na Equação 14, temos:

$$VA = \pi \times (D/2)^2 \times 2 \times D$$

Substituindo VA pelo valor calculado, temos:

$$30 = \pi \times (D/2)^2 \times 2 \times D$$

Isolando D, temos: $D = 2,67 \text{ m}$

Substituindo D na Equação 13, temos:

$$H = 2 \times 2,67 = 5,3 \text{ m.}$$