

FUNDAMENTOS DA

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS



Daniel Colombari Filho
Isadora Alves Lovo Ismail
Julia Couri Trevizan
Michelle Carneiro Razanauskas Miele
Murilo Daniel de Mello Innocentini

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

AUTORES



Ma. Michelle Carneiro Razanauskas Miele

Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental UNAERP

michelle.miele@sou.unaerp.edu.br

<http://lattes.cnpq.br/7864997220646301>



Profª. Drª. Isadora Alves Lovo Ismail

Docente e pesquisadora do Núcleo de Sustentabilidade e Gestão de Resíduos Sólidos - SUGERS - do Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e do curso de Graduação em Engenharia Química UNAERP.

iismail@unaerp.br

<http://lattes.cnpq.br/2051414432093611>



Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini

Docente e pesquisador do Núcleo de Sustentabilidade e Gestão de Resíduos Sólidos - SUGERS - do Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e do curso de Graduação em Engenharia Química UNAERP.

minnocentini@unaerp.br

<http://lattes.cnpq.br/5681181471077426>



Daniel Colombari Filho

Graduando em Engenharia Química e aluno de Iniciação Científica UNAERP

daniel.colombarifilho@sou.unaerp.edu.br

<http://lattes.cnpq.br/8137384106909290>



Julia Couri Trevizan

Graduanda em Engenharia Química e aluna de Iniciação Científica UNAERP

julia.trevizan@sou.unaerp.edu.br

<http://lattes.cnpq.br/4728410824849001>

PREFÁCIO

É com grande satisfação que apresentamos este e-book, cujo propósito central é disseminar o conhecimento sobre a valorização energética de resíduos. Em um cenário global cada vez mais focado na sustentabilidade e na eficiência dos recursos, a busca por soluções inovadoras para a geração de energia tornou-se imperativa. Este material nasce da convicção de que a informação de qualidade é a base para a tomada de decisões conscientes e para o avanço em direção a um futuro mais resiliente.

A valorização energética, em suas diversas formas, representa uma ponte essencial entre a gestão de resíduos e a produção de energia limpa. Seja através da incineração com recuperação de calor, da digestão anaeróbica, da gaseificação ou de outras tecnologias emergentes, o potencial de transformar aquilo que antes era descartado em um recurso valioso é imenso. Este e-book busca explorar essas possibilidades, apresentando os conceitos fundamentais, as tecnologias aplicadas e os benefícios intrínsecos a cada abordagem.

Esperamos que este conteúdo sirva como um guia prático e informativo, tanto para aqueles que estão dando os primeiros passos no tema quanto para profissionais e pesquisadores que buscam aprofundar seus conhecimentos. Acreditamos que, ao compartilhar essa expertise, estamos contribuindo para a construção de um ambiente mais sustentável e para a promoção de uma economia circular, onde nenhum recurso é realmente perdido, mas sim transformado e valorizado.

Que esta leitura inspire novas ideias, fomente discussões produtivas e impulse ações concretas rumo a um futuro energético mais inteligente e responsável.

Aproveite a leitura!

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 - RESÍDUOS SÓLIDOS E RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA	4
CAPÍTULO 2 - BIOMASSA E BIOMETANIZAÇÃO	13
CAPÍTULO 3 - COMBUSTÃO E LIQUEFAÇÃO	17
CAPÍTULO 4 - GASEIFICAÇÃO	20
CAPÍTULO 5 - INCINERAÇÃO	22
CAPÍTULO 6 - PIRÓLISE	24
CONSIDERAÇÕES FINAIS	27
REFERÊNCIAS	30



INTRODUÇÃO

INTRODUÇÃO

O crescente desafio da gestão de resíduos sólidos e a busca por soluções energéticas sustentáveis colocam a valorização energética como uma das estratégias mais promissoras da atualidade. Em um contexto de aumento populacional, urbanização acelerada e consumo intensivo de recursos, o volume de resíduos gerados nas cidades cresce de forma contínua, pressionando sistemas públicos de coleta, tratamento e disposição final. Paralelamente, a demanda por energia limpa e eficiente impulsiona o desenvolvimento de tecnologias capazes de transformar resíduos em fontes úteis de energia térmica, elétrica ou combustível.

A valorização energética se insere nesse cenário como um elo fundamental entre a gestão ambientalmente adequada dos resíduos e a transição para uma matriz energética de baixo carbono. Ao converter materiais que seriam descartados — como resíduos urbanos, industriais, agrícolas e de saneamento — em energia, reduz-se o volume destinado a aterros sanitários e mitigam-se emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 7 (Energia Acessível e Limpa), 11 (Cidades Sustentáveis) e 12 (Consumo e Produção Responsáveis).

O presente e-book tem como objetivo principal apresentar, de forma clara e didática, os conceitos fundamentais, tecnologias e aplicações práticas associadas à valorização energética de resíduos. Busca-se oferecer uma visão abrangente das rotas tecnológicas disponíveis — como incineração com recuperação de calor, gaseificação, pirólise, combustão e digestão anaeróbia — destacando suas vantagens, limitações e potencial de aplicação no contexto brasileiro.

Este material foi elaborado com base em referências técnicas, legislações e normas nacionais e internacionais, incluindo documentos da ABNT, Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), CONAMA, ANVISA, e relatórios setoriais de entidades como ABREN, EPE, ABRELPE e ABIOGÁS. Além disso, contou com a colaboração de pesquisadores, docentes e alunos do Núcleo de Sustentabilidade e Gestão de Resíduos Sólidos (SUGERS), vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental da Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP), garantindo rigor técnico e atualização científica.

O e-book está estruturado em cinco capítulos principais:

- Capítulo 1 apresenta os fundamentos da gestão de resíduos sólidos e sua relação com a recuperação energética;
- Capítulo 2 aborda as alternativas sustentáveis de energia a partir da biomassa e da biometanização, discutindo a importância da digestão anaeróbia e do biogás;
- Capítulo 3 explora os processos de combustão e liquefação, com foco em suas etapas, condições operacionais e aplicações industriais;
- Capítulo 4 menciona as principais informações sobre gaseificação;
- Capítulo 5 detalha o processo de pirólise, destacando os tipos, parâmetros e produtos resultantes, além do panorama de pesquisa e inovação no Brasil.

Com uma linguagem acessível e conteúdo técnico sólido, este guia busca atender tanto a profissionais e pesquisadores da área ambiental e energética, quanto a estudantes e gestores públicos que desejam compreender o potencial da valorização energética como instrumento de sustentabilidade, inovação e desenvolvimento socioambiental.

CAPÍTULO 1

RESÍDUOS SÓLIDOS E RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA



Resíduos sólidos são materiais descartados em estado sólido ou semissólido, gerados a partir das atividades humanas em residências, indústrias, comércios, hospitais, agricultura, entre outros setores. Podem incluir lixo doméstico, restos de construção civil, resíduos industriais, hospitalares e eletrônicos e exigem uma gestão adequada para evitar impactos ambientais e riscos à saúde pública.



A **classificação dos resíduos sólidos** é fundamental para sua gestão eficiente. Os resíduos orgânicos, como restos de alimentos e matéria biodegradável, são aqueles que se decompõem naturalmente. Recicláveis como plásticos, papéis, vidros e metais, podem ser reaproveitados. Resíduos perigosos são as baterias, lâmpadas fluorescentes, produtos químicos e hospitalares. Resíduos não recicláveis são aqueles contaminados ou misturados, sem possibilidade de reaproveitamento.

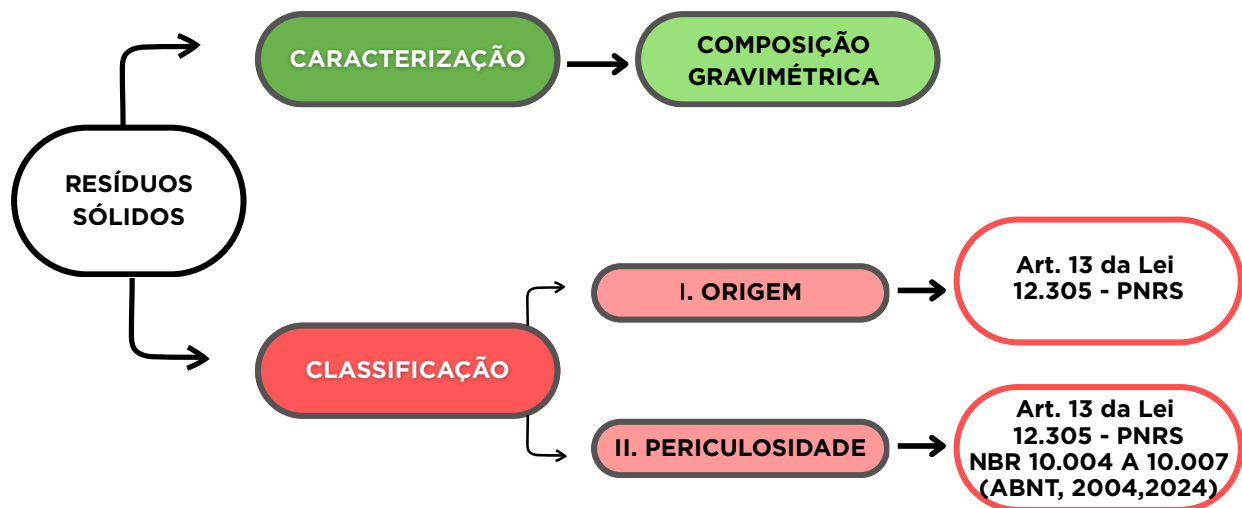
É importante distinguir os conceitos de **resíduo** e **rejeito**. Enquanto o resíduo pode ser reaproveitado por meio da reciclagem ou de outros tratamentos, o rejeito é um tipo específico de resíduo que não possui viabilidade de reaproveitamento e, portanto, deve ser descartado de forma adequada, como em aterros sanitários.

Outro aspecto relevante na gestão de resíduos está na diferença entre:

- **destinação:** refere-se ao processo de reaproveitamento do resíduo, como reciclagem, compostagem ou geração de energia;
- **disposição:** corresponde ao descarte final e irreversível, utilizado quando não há possibilidade de reaproveitamento.

No Brasil, a **Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**, estabelecida pela Lei nº 12.305/2010, define as diretrizes para o gerenciamento dos resíduos. A PNRS prioriza ações como redução, reutilização, reciclagem e a logística reversa de determinados produtos.

A **caracterização dos resíduos** envolve a identificação de suas propriedades físicas, químicas e biológicas, como origem, composição, quantidade gerada e potencial de reaproveitamento ou periculosidade.



A **classificação**, segundo a norma ABNT NBR 10.004/2024, distingue resíduos perigosos (Classe I) e resíduos não perigosos (Classe II).



Essa caracterização é essencial para determinar as formas corretas de coleta, transporte, armazenamento, tratamento e destinação final.

A **classificação** também pode ser feita conforme a origem dos resíduos, o que facilita o gerenciamento adequado. Entre os principais tipos estão:



URBANOS

São os domiciliares e os de limpeza urbana.



DOMICILIAR

São os originários de atividades domésticas em residências urbanas.



LIMPEZA URBANA

São os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas.



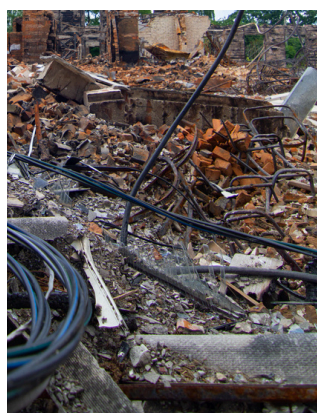
COMERCIAIS

São os gerados nessas atividades, exceto nas atividades de limpeza urbana, construção civil, saneamento, saúde e transporte.



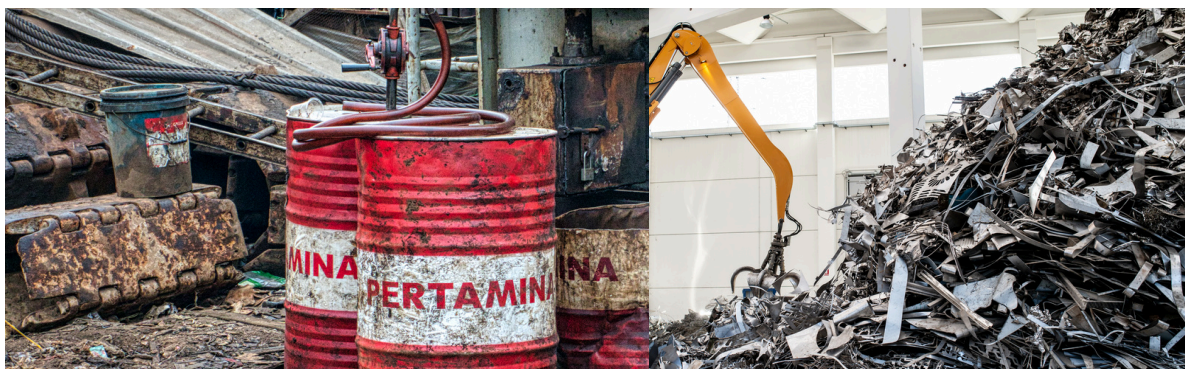
RESÍDUOS DOS SERVIÇOS PÚBLICOS DE SANEAMENTO BÁSICO

São aqueles gerados nessas atividades, com exceção dos referidos como resíduos domiciliares e os de limpeza urbana.



RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

São aqueles gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis.



RESÍDUOS INDUSTRIAIS

São aqueles gerados nos processos produtivos e instalações industriais.



RESÍDUOS DE SERVIÇOS DE SAÚDE

São aqueles gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS.



RESÍDUOS AGROSSILVOPASTORIS

São aqueles gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades.



RESÍDUOS DE SERVIÇOS DE TRANSPORTES

São aqueles originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira.



RESÍDUOS DE MINERAÇÃO

São aqueles gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

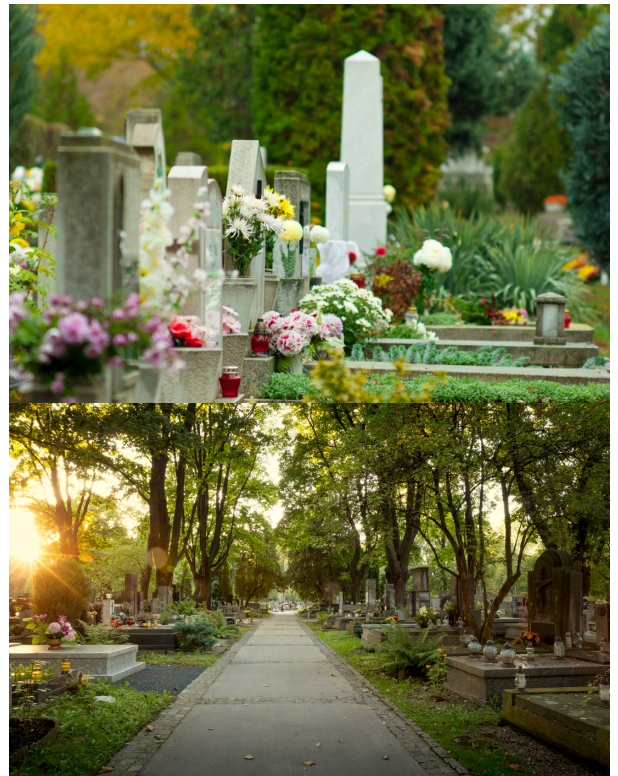
RESÍDUOS CEMITERIAIS

Grupo I: provenientes da decomposição de corpos sepultados e que apresentam potencial de geração de necrochorume;

Grupo II: não degradáveis como os do grupo I, tais como roupas, restos de caixões, que podem apresentar potencial de contaminação na área do aterro onde são dispostos;

Grupo III: equiparáveis a resíduos sólidos urbanos, como resíduos recicláveis ou compostáveis, gerados nas atividades de limpeza urbana, como varrição e poda de árvores;

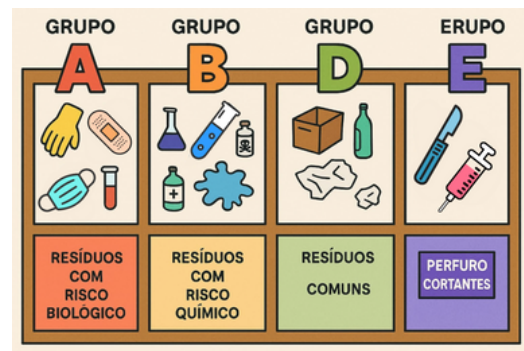
Grupo IV: equiparáveis aos resíduos de construção civil, resultantes de obras em sepulturas, jazigos e estruturas semelhantes.



REJEITOS RADIOATIVOS

São aqueles que contêm elementos químicos radioativos e que não têm mais um propósito prático. Eles são gerados em áreas como usinas nucleares, hospitais e centros de pesquisa. Por serem perigosos e radioativos, devem ser manuseados, tratados e armazenados de forma segura e regulamentada pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

Os resíduos provenientes de **serviços de saúde** são regulados pela RDC nº 222 de 2018 e pela Resolução CONAMA nº 358 de 2005. Eles são divididos em grupos:



As Resoluções de Diretoria Colegiada da ANVISA RDC nº 306 de 2004 e do CONAMA nº 358 de 2005 classificam os Resíduos dos Serviços de Saúde em cinco grupos, conforme as características biológicas, físicas e químicas:

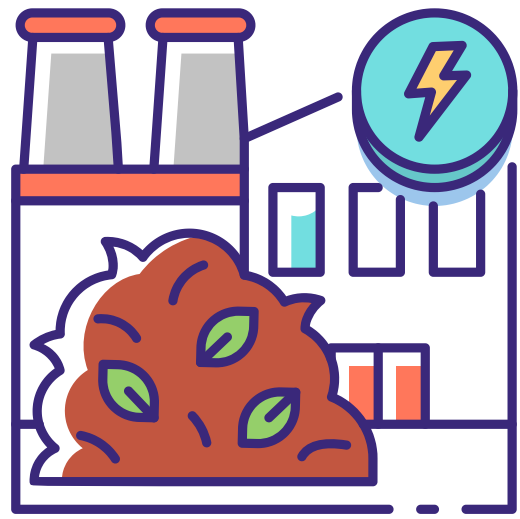


O tratamento desses resíduos pode incluir incineração, pirólise, autoclavagem, desinfecção química ou uso de micro-ondas. Sua disposição final deve ocorrer em aterros sanitários apropriados.

Dados recentes de 2022 e 2023 mostram que grande parte dos resíduos sólidos urbanos no Brasil ainda recebe destinação inadequada. Apesar dos avanços na reciclagem, como o aumento da coleta seletiva, desafios como a eliminação de lixões e a ampliação da destinação ambientalmente correta permanecem.



A **recuperação energética** surge como uma alternativa importante para o **tratamento de resíduos**. Trata-se de um processo que transforma resíduos em energia utilizável, contribuindo para sua **redução** em aterros e diminuindo a dependência de combustíveis fósseis.



A principal forma de recuperação energética é a **incineração** com reaproveitamento do calor gerado, que pode ser convertido em eletricidade ou utilizado para aquecimento urbano e industrial.



Existem, também, a **gaseificação** e a **pirólise**, que transformam resíduos em gases combustíveis, a captura de **biogás** em aterros sanitários e o uso de **biodigestores**, que processam resíduos orgânicos como restos de alimentos e esterco para gerar biogás e biofertilizantes.



As **energias renováveis** são aquelas provenientes de recursos naturais que se renovam continuamente, como a energia solar, eólica, hidráulica, maremotriz e biomassa. Destacam-se por seu baixo impacto ambiental e por emitirem quantidades menores de gases de efeito estufa quando comparadas às fontes fósseis.



Essas práticas promovem a mitigação dos impactos ambientais e possibilitam a construção de **um futuro mais equilibrado** do ponto de vista ecológico e energético.

A Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (ABREN)

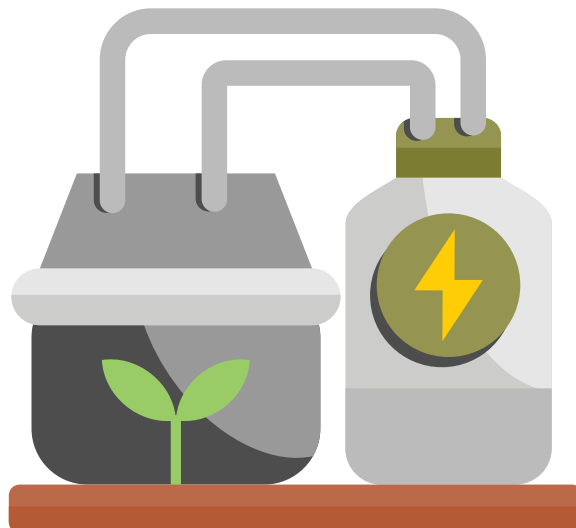
exerce um papel essencial na promoção dessa prática no Brasil, atuando na formulação de políticas públicas, no desenvolvimento tecnológico, na capacitação de profissionais e na conscientização da população.



A **química verde** visa criar produtos e tecnologias que reduzam os danos ao meio ambiente, promovendo a substituição de matérias-primas não renováveis e o uso de energia limpa.

CAPÍTULO 2

BIOMASSA E BIOMETANIZAÇÃO



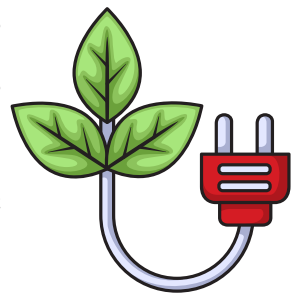
A **biomassa**, recurso energético proveniente de matéria orgânica, destaca-se como uma das principais alternativas na transição para um modelo energético mais **sustentável**. Sua versatilidade permite a conversão em diferentes formas de energia por meio de processos termoquímicos e biológicos.

As **principais fontes de biomassa** incluem resíduos florestais, agrícolas, urbanos e de animais, cada uma com características específicas que influenciam suas aplicações e métodos de conversão.



Entre os processos mais utilizados para a conversão da biomassa, destacam-se a **pirólise**, **gaseificação**, **combustão**, **biodigestão anaeróbica** e **fermentação**.

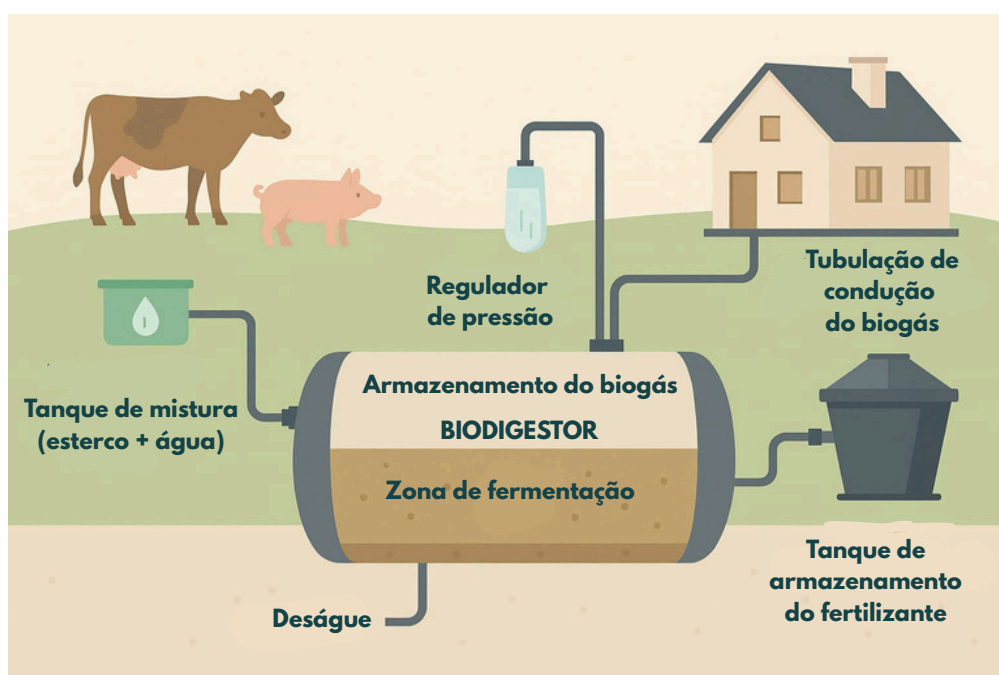
As **vantagens** da biomassa são notáveis: renovabilidade, redução das emissões de gases de efeito estufa, aproveitamento de resíduos e diversificação da matriz energética. Essas rotas possibilitam a produção de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, bem como energia elétrica e térmica.



Para viabilizar e otimizar o uso da biomassa, é essencial realizar sua **análise físico-química** detalhada. Essa análise envolve a determinação da composição química (teores de celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e minerais), bem como propriedades físicas como umidade, densidade e granulometria.

No contexto da valorização de resíduos orgânicos, a **digestão anaeróbia** — também chamada de **biometanização** — surge como uma solução sustentável e eficiente.

A digestão anaeróbia, realizada em biodigestores, permite o tratamento de resíduos urbanos, agrícolas e de esgoto, promovendo a economia circular ao transformar resíduos em energia limpa e insumos para a agricultura. Esse **processo biológico** ocorre na ausência de oxigênio, por meio da ação de microrganismos que decompõem a matéria orgânica, gerando biogás e um subproduto conhecido como digestato, rico em nutrientes e utilizado como biofertilizante.



Entre as **principais aplicações da digestão anaeróbia**, destacam-se o tratamento de resíduos com redução da carga orgânica e de patógenos, a geração de energia por meio do biogás e a fertilização do solo com o digestato.

O **biogás** pode ser convertido em eletricidade e calor, utilizado como combustível veicular (biometano) ou injetado na rede de gás natural. Além disso, a atividade microbiana envolvida no processo apresenta potencial para biorremediação de áreas contaminadas. Esses benefícios, no entanto, dependem de um controle rigoroso das condições do processo, da escolha adequada dos biodigestores e da viabilidade econômica de cada projeto.

A escolha do sistema ideal depende do tipo de matéria orgânica, da escala da aplicação e dos objetivos específicos de cada projeto.

Em comparação ao aterro energético — onde o biogás é captado passivamente a partir da decomposição natural de resíduos em aterros sanitários — a **biometanização** se destaca pela maior eficiência e menor impacto ambiental.

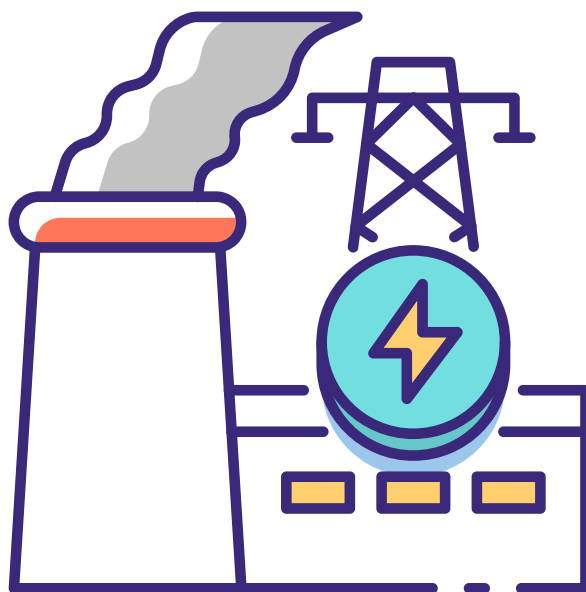


Fonte: EPE (Empresa de Pesquisa Energética) e Abiogás
(Associação Brasileira do Biogás)

Com a adoção de tecnologias eficientes, análise adequada da matéria-prima e políticas públicas de incentivo, é possível consolidar essas alternativas como pilares de uma matriz energética mais limpa, resiliente e alinhada aos princípios do desenvolvimento sustentável.

CAPÍTULO 3

COMBUSTÃO E LIQUEFAÇÃO



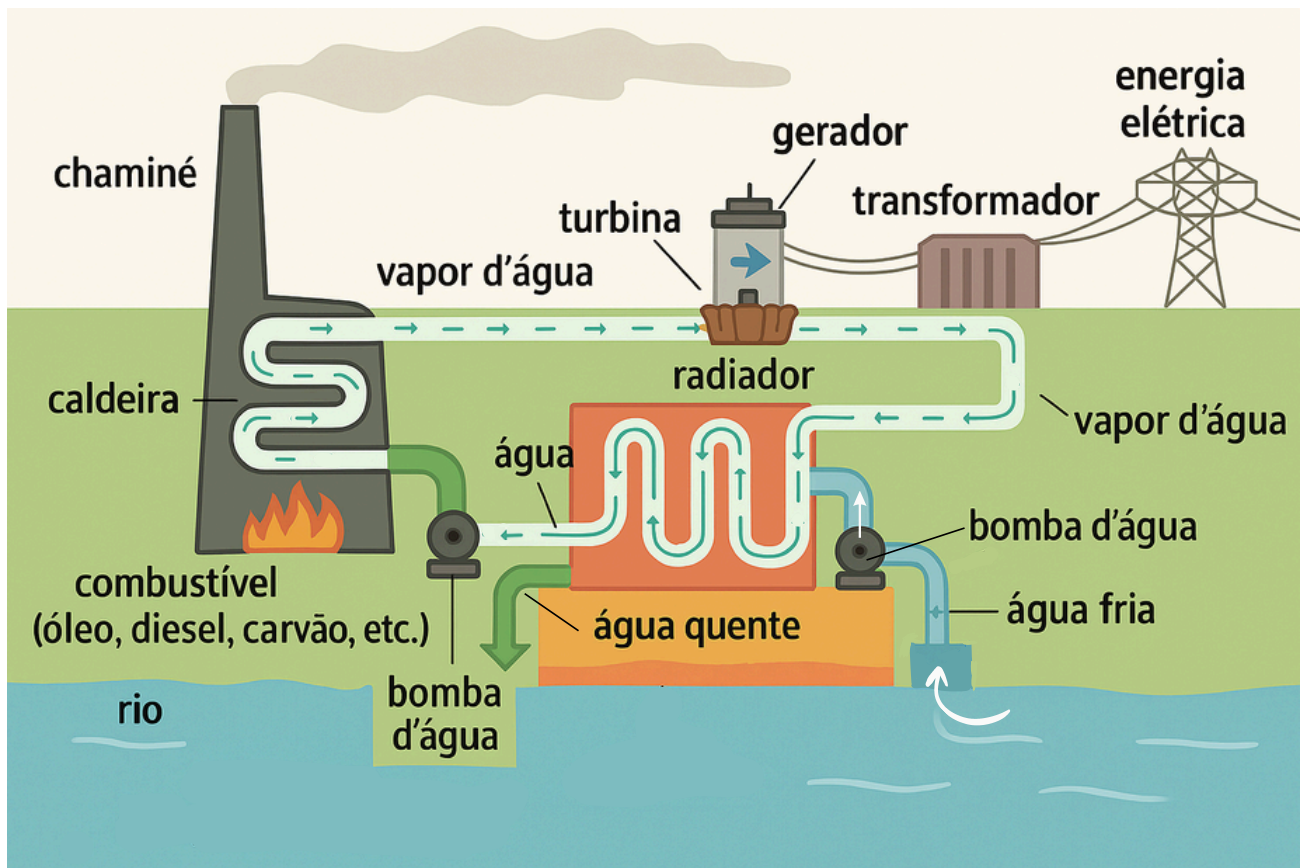
A **combustão** é um processo químico exotérmico que libera energia na forma de calor e luz.

Para ocorrer, precisa de três elementos:

- combustível,
- comburente (geralmente oxigênio)
- calor para ignição.

A reação pode ser:

- completa, produzindo dióxido de carbono e água, ou
- incompleta, gerando monóxido de carbono e fuligem quando o oxigênio é insuficiente.



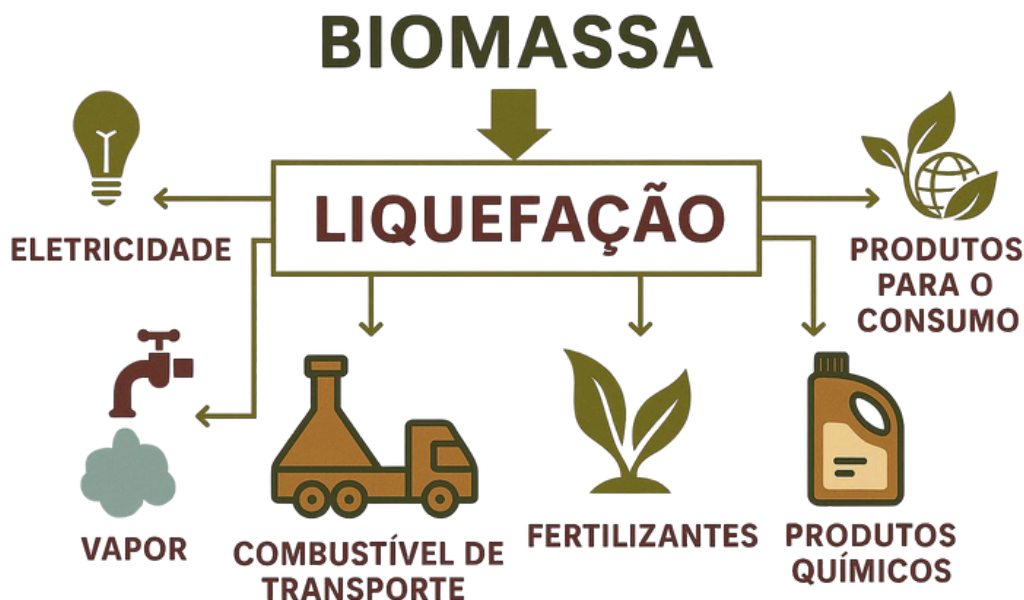
Após iniciada, a combustão se mantém por reações em cadeia até que o combustível acabe ou as condições mudem.

A energia liberada é amplamente usada para geração elétrica em usinas termoeletricas e outros equipamentos, sendo a principal **fonte global de energia elétrica**.

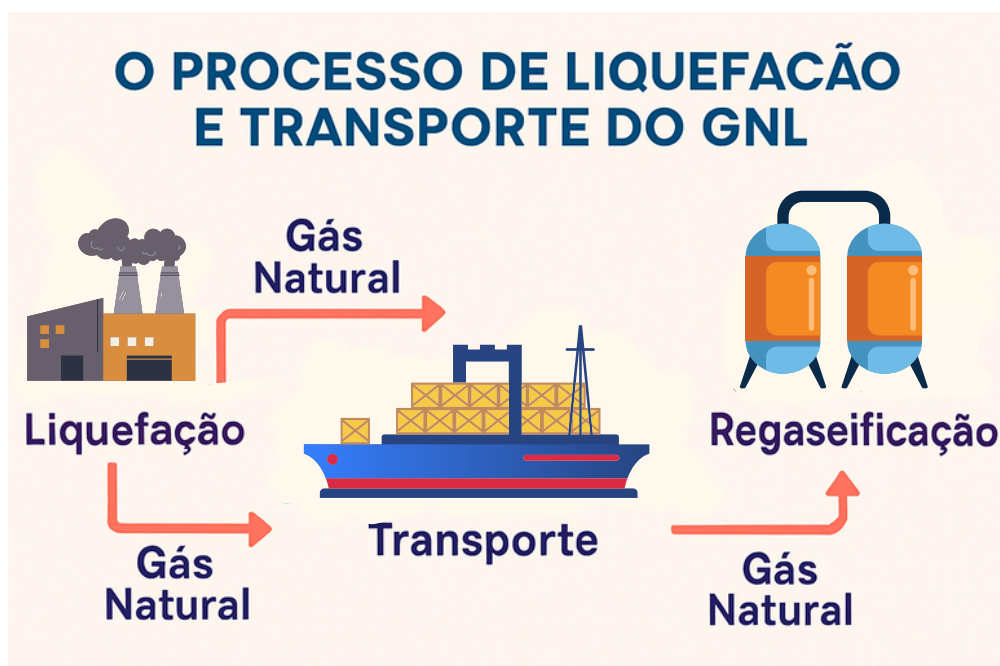
O **calor** gerado só pode ser aproveitado no momento da combustão, salvo em sistemas com recuperação de calor (cogeração), que permitem melhor aproveitamento energético.

A **liquefação** consiste na transformação de um gás em líquido pela redução da energia cinética das moléculas, normalmente via resfriamento e/ou compressão.

Essa redução permite que as forças intermoleculares se tornem dominantes, promovendo a condensação.



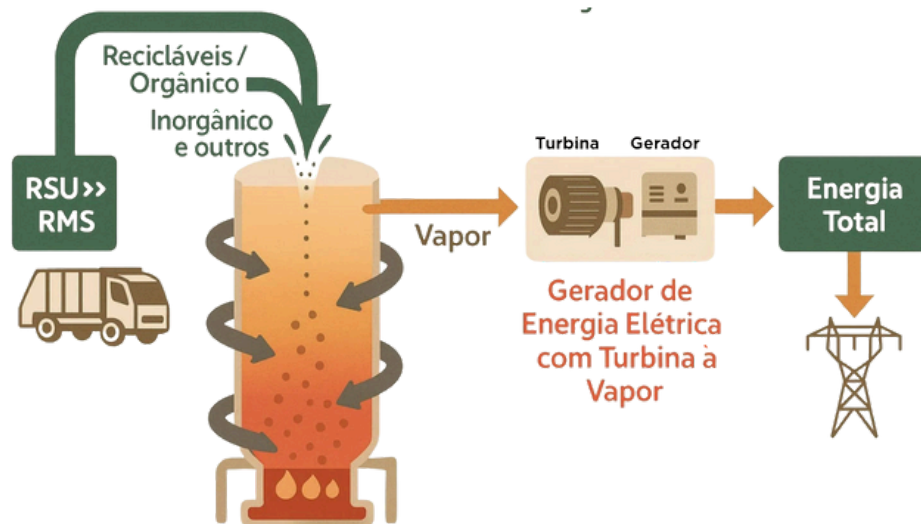
Na indústria, a liquefação é feita por ciclos de compressão, resfriamento e expansão (efeito Joule-Thomson) para alcançar as condições adequadas.



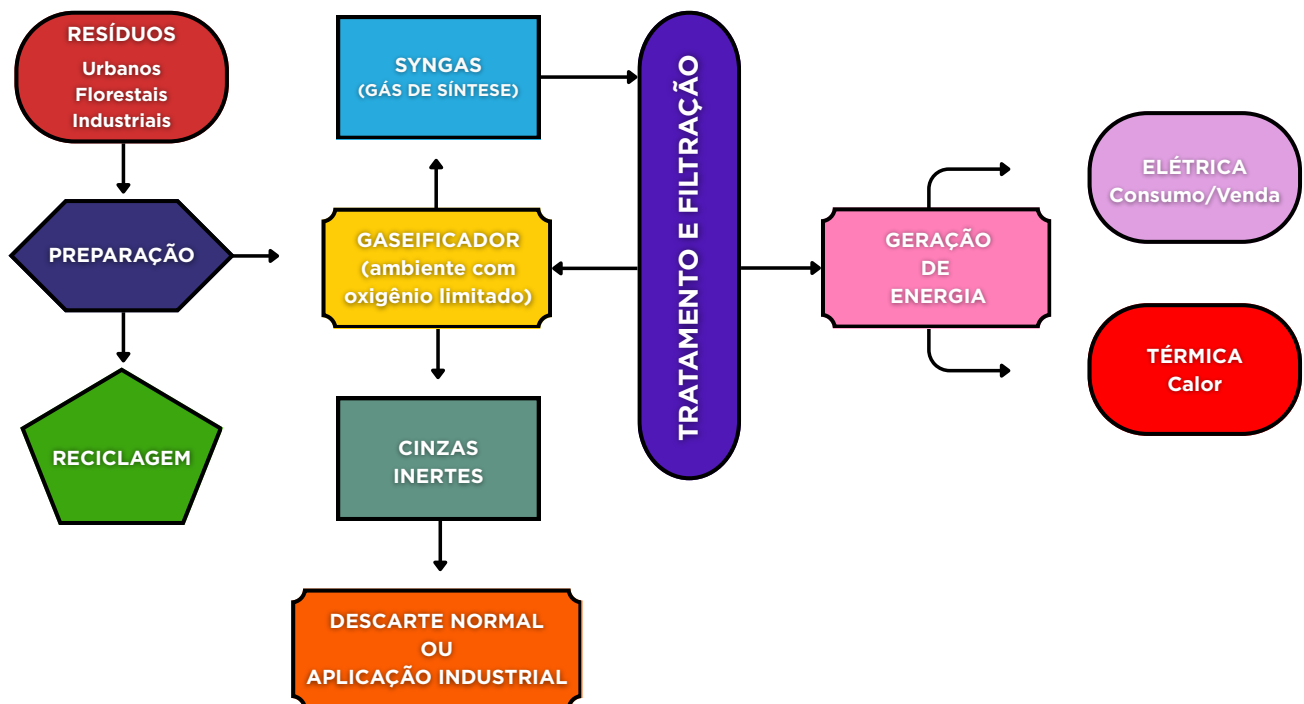
Gases como GLP, GNL, oxigênio, nitrogênio e hélio são liquefeitos para armazenamento e transporte eficiente, com aplicações em setores industriais e científicos.

CAPÍTULO 4

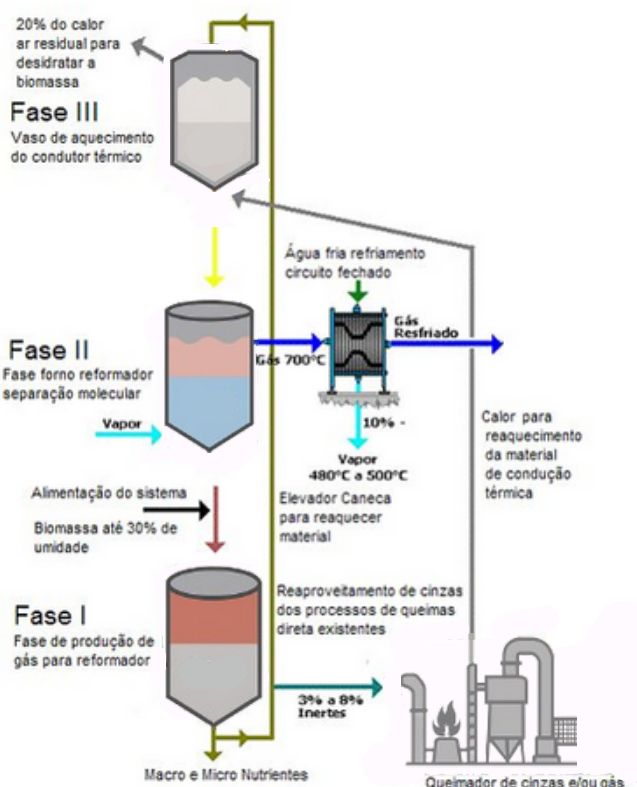
GASEIFICAÇÃO



A **gaseificação** é um processo termoquímico que converte materiais carbonáceos, como biomassa e carvão, em gás combustível (*syngas*), por meio da reação com agentes como ar, oxigênio ou vapor, em altas temperaturas (700 - 1400°C).



O processo envolve etapas de secagem, pirólise, combustão parcial para gerar calor e redução para formar o *syngas*, que é uma mistura de monóxido de carbono, hidrogênio e outros gases.

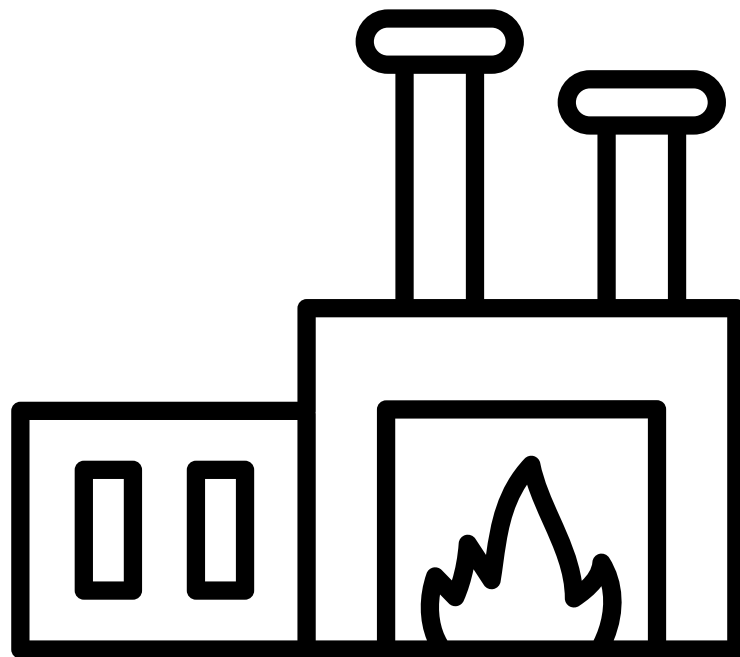


O *syngas* é usado para geração de energia, produção de combustíveis líquidos e químicos.

Existem vários tipos de gaseificadores (leito fixo, fluidizado, fluxo arrastado), e a escolha do agente gaseificante e pressão afeta a qualidade do gás gerado. Essa mistura gasosa tem características energéticas e não-energéticas (pode ser considerado gás de síntese).

CAPÍTULO 5

INCINERAÇÃO

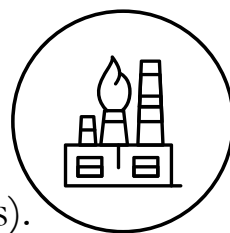




A **incineração** é a queima controlada de resíduos orgânicos a altas temperaturas (850 - 1100°C) para reduzir volume, destruir patógenos e, em alguns casos, gerar energia.

Desafios a serem superados:

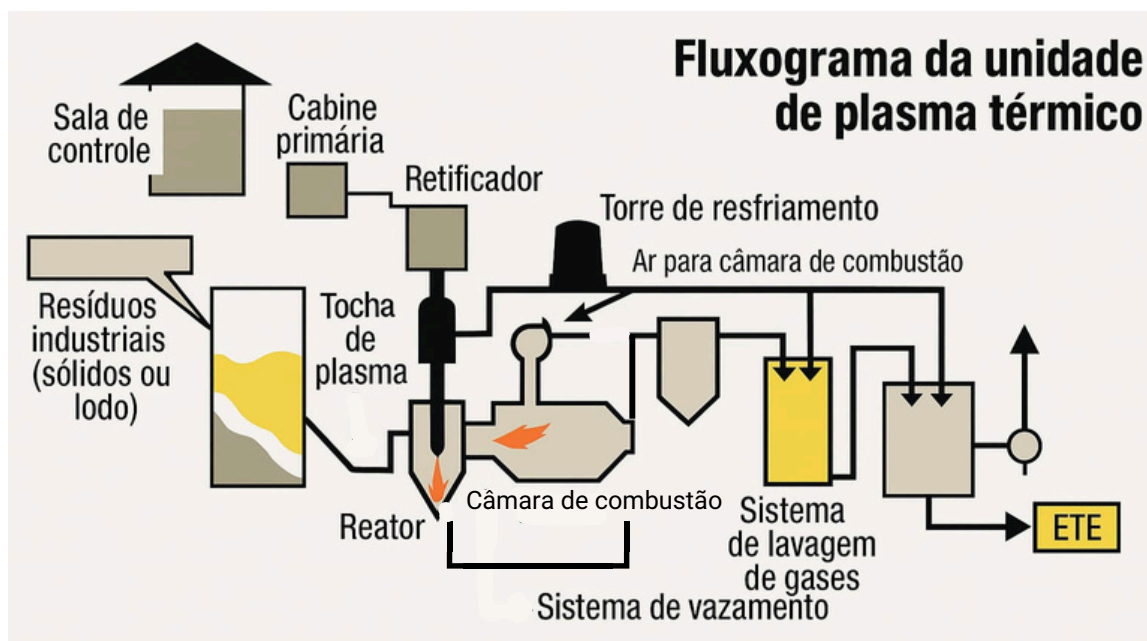
- alto custo,
- emissão de poluentes,
- necessidade de tratamento dos resíduos gerados (cinzas).



Apresenta **vantagens** como:

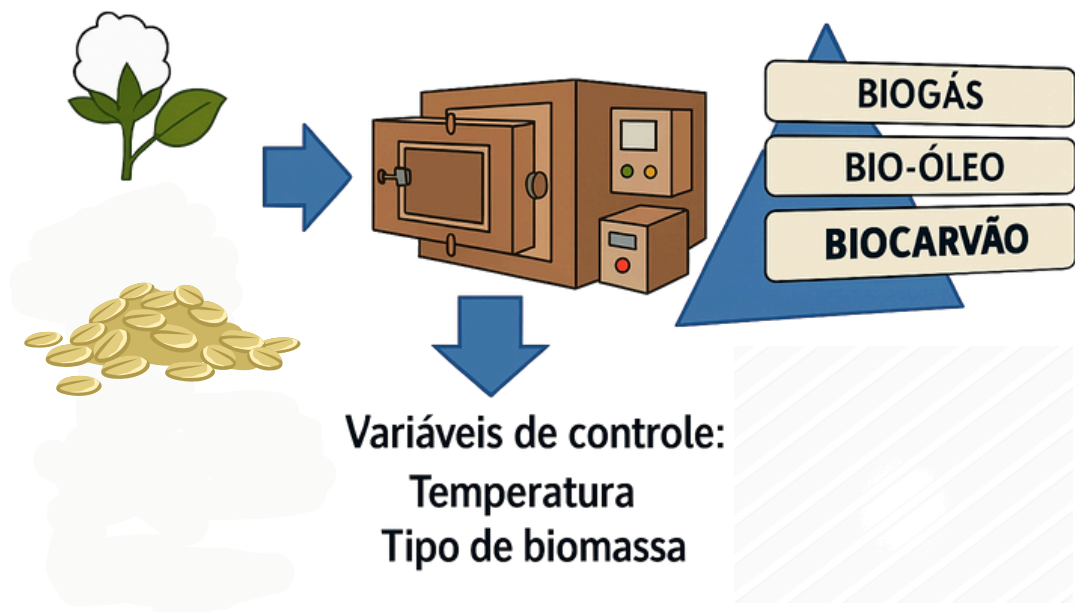
- redução significativa de volume,
- potencial recuperação energética.

Existem diversos tipos de incineradores, desde fornos de grelha até tecnologias avançadas como incineradores a plasma, adaptados a diferentes tipos de resíduos. O dimensionamento desses sistemas depende do tipo e volume de resíduos, poder calorífico, eficiência desejada, regulamentações ambientais e infraestrutura disponível.



CAPÍTULO 6

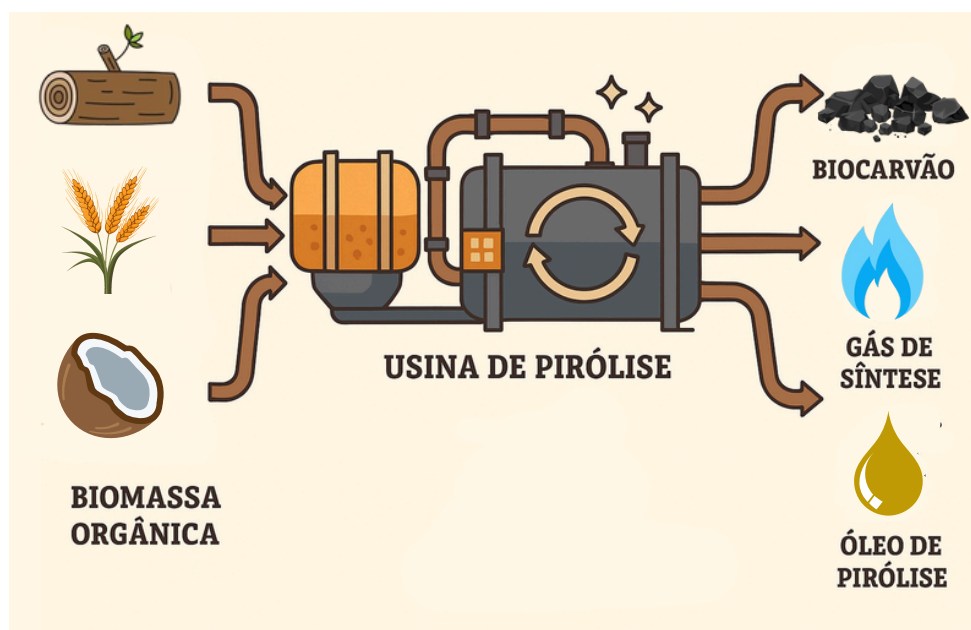
PIRÓLISE



A **pirólise** é a decomposição térmica de materiais orgânicos na ausência ou quase ausência de oxigênio, que promove a quebra do material em substâncias diversas, sem ocorrer combustão.

Tipos de pirólise:

- **Pirólise Lenta:** aquecimento gradual a temperaturas baixas, favorecendo a produção de carvão (biochar).
- **Pirólise Rápida:** aquecimento rápido a temperaturas mais altas, maximizando a geração de bio-óleo (líquidos).
- **Pirólise Flash:** processo ainda mais rápido, com tempos de residência muito curtos, também focado em líquidos.



Tipos de matéria-prima:

- Biomassa (resíduos agrícolas, florestais, culturas energéticas).
- Plásticos (PE, PP, PS, com ressalvas para PVC).
- Borracha (pneus, gerando óleo e negro de fumo).
- Outros resíduos orgânicos (lodos, resíduos de animais).

Influência da matéria-prima e parâmetros do processo:

- Composição química, umidade, cinzas e tamanho das partículas influenciam o rendimento e a qualidade dos produtos.
- Parâmetros operacionais como temperatura, taxa de aquecimento, tempo de residência e pressão determinam a produção preferencial de carvão, líquidos ou gases.
- Catalisadores podem ser usados para otimizar os produtos, tais como zeólitas, sílica, alumina.

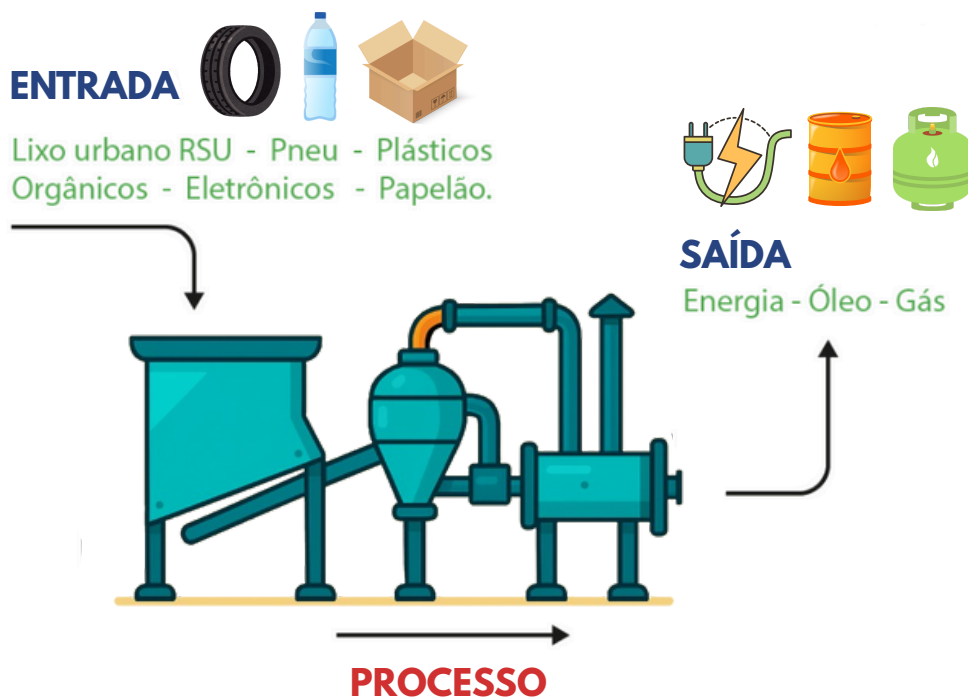
Componentes da biomassa se decompõem em diferentes temperaturas, produzindo bio-óleo, gases e carvão, variando conforme as condições do processo.



A cinética química estuda a velocidade e mecanismos das reações durante a pirólise, essencial para projetar reatores que otimizem a eficiência térmica, controle dos produtos formados e qualidade final dos materiais gerados.



Embora o Brasil tenha grande potencial de biomassa, a pirólise ainda está em fase de pesquisa e pilotos, especialmente para bio-óleo, enquanto o biochar ganha espaço para uso agrícola.



A **carbonização** é um tipo de pirólise voltado para a produção de carvão sólido, enquanto a pirólise em sentido amplo pode ser otimizada para líquidos e gases.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A valorização energética de resíduos consolida-se como uma estratégia fundamental para a transição rumo a um modelo de desenvolvimento mais sustentável, eficiente e de baixo carbono. Em um contexto global de escassez de recursos e aumento da geração de resíduos, essa abordagem promove a integração entre gestão ambiental e geração de energia, transformando passivos ambientais em ativos energéticos de alto valor.

Os capítulos deste e-book demonstraram que a aplicação de tecnologias como incineração com recuperação de calor, digestão anaeróbia, combustão, liquefação, gaseificação e pirólise oferece múltiplas possibilidades para o aproveitamento energético de resíduos urbanos, industriais, agrícolas e de saneamento. Cada tecnologia apresenta particularidades operacionais, rendimentos energéticos e desafios técnicos, mas todas compartilham o mesmo princípio: reduzir a quantidade de resíduos destinados a aterros e aproveitar seu potencial energético.

A digestão anaeróbia, por exemplo, destaca-se como rota biotecnológica promissora, capaz de gerar biogás e biofertilizantes a partir de resíduos orgânicos, integrando-se perfeitamente aos conceitos de economia circular e agricultura regenerativa. Já os processos termoquímicos — como a pirólise e a gaseificação — representam soluções tecnológicas versáteis, aptas a converter resíduos complexos em gases, óleos e carvão com valor energético e comercial.

A adoção da valorização energética demanda, contudo, o fortalecimento de políticas públicas, marcos regulatórios claros e incentivos econômicos que tornem esses processos viáveis em escala industrial. No Brasil, o avanço depende da articulação entre universidades, setor produtivo e poder público, além da conscientização da sociedade quanto à importância do manejo adequado dos resíduos.

Do ponto de vista ambiental, os benefícios são expressivos: redução das emissões de gases de efeito estufa, diminuição da pressão sobre os aterros sanitários, substituição parcial de combustíveis fósseis e estímulo à inovação tecnológica no setor energético. Esses resultados contribuem diretamente para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 7 (Energia Acessível e Limpa), 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e 12 (Consumo e Produção Responsáveis).

Portanto, a valorização energética não deve ser vista apenas como uma alternativa técnica de tratamento de resíduos, mas como um instrumento estratégico para o desenvolvimento sustentável, capaz de integrar a gestão ambiental, a segurança energética e a inovação tecnológica. A continuidade das pesquisas, o aprimoramento das legislações e o incentivo à formação de profissionais especializados são caminhos essenciais para que o Brasil consolide seu protagonismo na transição energética e na construção de uma economia verdadeiramente circular e de baixo impacto ambiental.

REFERÊNCIAS

- ABREN – Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos. Relatório técnico e panorama da recuperação energética no Brasil. São Paulo: ABREN, 2025.
- ABIOGÁS – Associação Brasileira de Biogás. Panorama do Biogás no Brasil 2023. São Paulo: ABIOGÁS, 2025.
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023. São Paulo: ABRELPE, 2025.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária. RDC nº 222, de 28 de março de 2018. Dispõe sobre o gerenciamento de resíduos de serviços de saúde. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 29 mar. 2018.
- ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária. RDC nº 306, de 7 de dezembro de 2004. Dispõe sobre o gerenciamento de resíduos de serviços de saúde. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 10 dez. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO (ABIPLAST). Perfil 2019. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil2019/>. Acesso em: 8 maio 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. São Paulo: ABRELPE, 2019. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 6 abr. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 13 abr. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004: resíduos sólidos urbanos – classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (ABAL). Sustentabilidade: reciclagem. Disponível em: <https://abal.org.br/sustentabilidade/reciclagem/>. Acesso em: 8 maio 2021.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE CATADORES DE MATERIAIS RECICLÁVEIS (ANCAT). Anuário da Reciclagem 2020. Disponível em: https://uploadsssl.webflow.com/5ebc1f5c7d4b534f7f022f62/5fcaa0d469d1141fbdaf040a_Anu%C3%A1rio%20da%20Reciclagem%202020.pdf. Acesso em: 7 maio 2021.
- BERNARDO, L. R.; LIMA, F. M. Gestão e Valorização Energética de Resíduos. Rio de Janeiro: Elsevier, 2022.
- BIMBATI, T. A. V. Por que os recicláveis não são reciclados? Uma abordagem da reciclabilidade de materiais na cadeia produtiva. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/325535>. Acesso em: 14 maio 2021.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 313, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=335>. Acesso em: 18 jun. 2021.
- BRASIL. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm. Acesso em: 5 abr. 2021.
- BRASIL. Lei nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 20 fev. 1998.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 8 abr. 2021.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 5 abr. 2021.
- BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm#art6. Acesso em: 29 abr. 2021.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos – 2019. Brasília: SNS/MDR, 2020. 244 p. Disponível em: <http://snis.gov.br/diagnosticos>. Acesso em: 6 abr. 2021.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Agenda Nacional de Qualidade Ambiental Urbana: Programa Nacional Lixão Zero. Brasília, DF: MMA, 2019.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos – SINIR: logística reversa. Última atualização em 2 fev. 2021. Disponível em: <https://sinir.gov.br/logistica-reversa>. Acesso em: 12 abr. 2021.
- BRASIL. Tecnologia de produção de biogás e biofertilizante: digestores e fatores de controle operacional. GEF Biogás Brasil, 2020.
- CASTRO, A. M. R. C. Avaliação da prioridade na gestão e no gerenciamento de resíduos domiciliares em um consórcio intermunicipal em Minas Gerais. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.
- CASTRO, M. A. S.; SCHALCH, V. Resíduos gerados em cemitérios na ótica dos Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. In: CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE, 12., 2015, Poços de Caldas. Anais... Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/280386066_Os_residuos_gerados_em_cemiterios_na_otica_dos_Planos_Municipais_de_Gestao_Integrada_de_Residuos_Solidos. Acesso em: 18 jun. 2021.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 358, de 29 de abril de 2005. Dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos dos serviços de saúde. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 4 maio 2005.
- DEMIRBAS, A. Biomass and Waste-to-Energy Conversion. London: Springer, 2011.
- EL-HALWAGI, M. M. Sustainable Design through Process Integration. Oxford: Elsevier, 2017.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2024. Rio de Janeiro: EPE, 2024.
- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Pesquisa sobre pagamento por serviços ambientais urbanos para a gestão de resíduos sólidos. Brasília: IPEA, 2010. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/7968>. Acesso em: 12 abr. 2021.
- ISMAIL, I. A. L. Análise da recuperação energética de resíduos sólidos. Disciplina de Valorização Energética de Resíduos. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, Ribeirão Preto, 2021.
- ISMAIL, I. A. L. Biomassa. Disciplina de Valorização Energética de Resíduos. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, Ribeirão Preto, 2025.
- ISMAIL, I. A. L. Biometanização (Digestão Anaeróbia). Disciplina de Valorização Energética de Resíduos. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, Ribeirão Preto, 2025.

REFERÊNCIAS

- ISMAIL, I. A. L. Combustão e liquefação. Disciplina de Valorização Energética de Resíduos. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, Ribeirão Preto, 2025.
- ISMAIL, I. A. L. Conceitos básicos sobre resíduos sólidos. Disciplina de Valorização Energética de Resíduos. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, Ribeirão Preto, 2025.
- ISMAIL, I. A. L. Gaseificação. Disciplina de Valorização Energética de Resíduos. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, Ribeirão Preto, 2025.
- ISMAIL, I. A. L. Incineração. Disciplina de Valorização Energética de Resíduos. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, Ribeirão Preto, 2025.
- ISMAIL, I. A. L. Pirólise. Disciplina de Valorização Energética de Resíduos. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, Ribeirão Preto, 2025.
- ISMAIL, I. A. L. Tecnologias de conversão termoquímica. Disciplina de Valorização Energética de Resíduos. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, Ribeirão Preto, 2025.
- LIMA, N. S. Estudo do tratamento mecânico-biológico de resíduos sólidos urbanos. 2014. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2014.
- MESSAGE, L. B. Diagnóstico e avaliação do gerenciamento dos resíduos de serviços de saúde: estudo comparativo entre hospitais do município de São Carlos-SP. 2019. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. DOI: 10.11606/D.18.2019.tde-24052019-090405. Acesso em: 18 jun. 2021.
- MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, v. 83, p. 37–46, 2002.
- PUGLIESE, E. Estudo da evolução da composição dos resíduos de serviços de saúde (RSS) e dos procedimentos adotados para o seu gerenciamento integrado no Hospital Irmandade Santa Casa de Misericórdia de São Carlos – SP. 2010. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- SCHALCH, V.; CASTRO, M. A. S. de; CÓRDOBA, R. E. Gestão sustentável de resíduos sólidos. In: PHILIPPI JR., A.; SAMPAIO, C. A. C.; FERNANDES, V. Gestão empresarial e sustentabilidade. Barueri, SP: Manole, 2017.
- SCHALCH, V.; LEITE, W. C. A.; CASTRO, M. C. A. A.; CÓRDOBA, R. E.; CASTRO, M. A. S. Resíduos sólidos: conceito, gestão e gerenciamento. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.
- SCHALCH, V.; MELO, D. O. S.; CASTRO, A. M. R. C.; LIMA, T. Q. Tratamento de resíduos sólidos urbanos. Núcleo de Estudo e Pesquisa em Resíduos Sólidos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.
- SOUZA, P. S. Análise comparativa das usinas de tratamento mecânico-biológico brasileiras. 2018. 135 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.
- TEIXEIRA, N. A. R. Recuperação de resíduos de embalagem através do tratamento mecânico e biológico em Portugal Continental. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.



unaerp