

Opções em Waste-to-Energy na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos

Um Guia para Tomadores de Decisão em
Países Emergentes ou em Desenvolvimento

Como empresa federal de utilidade pública, a GIZ apoia o Governo Federal da Alemanha em seus objetivos na área de cooperação internacional para o desenvolvimento sustentável.

Publicado por:

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Escritórios em
Bonn e Eschborn, Alemanha

Friedrich-Ebert-Allee 36 + 40
53113 Bonn, Germany
T +49 228 44 60 - 0
F +49 228 44 60 - 17 66

E info@giz.de
I www.giz.de

Descrição do projeto:

Projeto consultivo: Conceitos para a gestão sustentável de resíduos

Autores:

Dieter Mutz, Dirk Hengevoss, Christoph Hugi, Thomas Gross da Universidade de Ciências Aplicadas do Noroeste da Suíça (FHNW).

Editado por:

Daniel Hinchliffe, Johannes Frommann e Ellen Gunsilius da GIZ.

Design/layout:

Jeanette Geppert pixelundpunkt kommunikation, Frankfurt

Fotografias/fontes:

© Doosan Lentjes GmbH: p. 8 e capa, 21, 24; © Fachverband BIOGAS e.V.: p. 7, 30, 31, 33; © Geocycle: p. 9 e capa, 26, 28; © GIZ: p. 6 e capa, 10, 13, 35; © Dieter Mutz: p. 11, 17, 38; © Johannes Frommann: 33 (esquerda) e capa.

Links URLs:

Esta publicação contém links para sites externos. O conteúdo destes sites é de responsabilidade exclusiva de seus respectivos editores. Quando os links para estes sites foram incluídos, a GIZ verificou seu conteúdo para determinar se poderia originar disputas civis ou criminais. Entretanto, a revisão permanente de links para conteúdo externo não pode ser garantida sem uma indicação concreta de violação de direitos. Caso a GIZ tome conhecimento ou seja notificada por terceiros de quaisquer violações de direitos em um site externo, o link será removido imediatamente. A GIZ dissocia-se de tal conteúdo.

A GIZ é responsável pelo conteúdo desta publicação.

Eschborn, maio de 2017

Opções em Waste-to-Energy na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos

Um Guia para Tomadores de Decisão em
Países Emergentes ou em Desenvolvimento

SUMÁRIO

Lista de Abreviaturas	5
Resumo Executivo	6
1 Introdução	10
1.1 Urbanização e os novos Desafios em Gestão de Resíduos	11
1.2 Waste-to-Energy: uma Tentação para os Municípios	12
1.3 Waste-to-Energy e a Economia Circular	13
1.4 Mitos sobre Waste-to-Energy	15
2 Requisitos para Waste-to-Energy	16
2.1 Características dos Resíduos Urbanos	16
2.2 Quadro Jurídico e Impacto Ambiental	17
2.3 Aspectos Financeiros e Institucionais de Plantas WtE	18
3 Opções de Tecnologia Waste-to-Energy	19
3.1 Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos	20
3.2 Coprocessamento	26
3.3 Digestão Anaeróbia para Produção de Biogás	30
3.4 Captação de Gás de Aterro	35
3.5 Tecnologias Alternativas: Pirólise e Gaseificação	36
4 Matriz de Apoio para Tomada de Decisão	42
4.1 Objetivo	42
4.2 Matriz para tomadores de decisão	44
4.3 Recomendações	48
Anexo A: Descrição dos parâmetros da matriz de decisão	50
Anexo B: Leitura adicional	55
Referências	57

Lista de Abreviaturas

AS	Aterro Sanitário
CDR	Combustível Derivado de Resíduos
CH₄	Metano
CHP	Cogeração de Energia e Calor
CMA	Combustíveis e matéria-prima alternativos
CO	Monóxido de Carbono
CO₂	Gás Carbônico
CSR	Combustível Sólido Recuperado
DA	Digestão anaeróbia
GA	Gás de Aterro
GRS	Gestão de Resíduos Sólidos
GRSU	Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos
GTC	Grupo de Trabalho Colaborativo
HCl	Ácido Clorídrico
HF	Ácido fluorídrico
IRSU	Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
NAMAs	Ações De Mitigação Nacionalmente Adequadas
NO_x	Óxidos De Nitrogênio
O&M	Operação e Manutenção
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
ONGs	Organizações Não Governamentais
PCI	Poder Calorífico Inferior
PET	Politereftalato de Etileno
PVC	Policloreto de Vinila
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SO₂	Dióxido de Enxofre
TA	Tecnologias Alternativas (Pirólise/Gaseificação)
TCO	Taxa De Carga Orgânica
TMB	Tratamento Mecânico Biológico
WBCSD	Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável
WtE	Waste-to-Energy

RESUMO EXECUTIVO



O aumento enorme dos resíduos sólidos urbanos (RSU) nas cidades em rápido crescimento de países emergentes ou em desenvolvimento provoca uma crescente preocupação pública quanto ao seu impacto na saúde e no meio ambiente. Hoje, cerca de 3 bilhões de pessoas eliminam seus resíduos de forma descontrolada [1]. À medida que a população e os tomadores de decisão têm se tornado mais sensíveis à poluição do meio ambiente e seu impacto na qualidade de vida, a gestão de resíduos sólidos urbanos (GRSU) vem ganhando importância na agenda política local. Em sua busca da modernização dos sistemas de gestão de resíduos, tomadores de decisão locais frequentemente consideram o investimento em tecnologia Waste-to-Energy (WtE). Estas tecnologias têm se tornado uma alternativa atraente para resolver não só os problemas urgentes de eliminação de resíduos, mas também diversos outros desafios concomitantes: carência na geração de energia, falta de espaço para aterros e a emissão de gases de efeito estufa através da eliminação inadequada de resíduos. Entretanto, a adoção de tecnologias WtE é frequentemente comprometida por obstáculos simples como falta de sistemas tarifários para financiar investimentos e custos operacionais, fiscalização ambiental deficiente e carência de mão de obra qualificada para operar os sistemas instalados de forma eficiente e eficaz. Caso estes fatores não sejam levados em consideração, projetos de WtE ficam ameaçados, prejudicando municípios e o meio ambiente local.

Por que este guia?

A discussão sobre Waste-to-Energy pode ser de difícil compreensão devido à grande complexidade das diversas tecnologias. Por vezes a WtE é apresentada como a "bala de prata" para resolver todos os problemas municipais com resíduos e energia. Entretanto, as condições estruturais na maioria dos países emergentes ou em desenvolvimento são fundamentalmente diferentes daquelas que deram origem a projetos de WtE em países industrializados, onde plantas de Waste-to-Energy de grandes proporções são cada vez mais comuns. Embora praticamente qualquer coisa seja possível do ponto de vista tecnológico, nem todas as tecnologias encaixam-se nas condições locais. O contexto geral deve ser analisado para decidir sobre a aplicabilidade e pertinência num determinado cenário. A orientação deve ir além dos aspectos técnicos.

Opções em Waste-to-Energy na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos: Um Guia para Tomadores de Decisão em Países Emergentes ou em Desenvolvimento descreve as diversas tecnologias WtE sendo utilizadas em nível municipal e sua potencial aplicação em um sistema integrado de gestão de resíduos. Este guia pretende auxiliar tomadores de decisão e seus assessores a avaliar as oportunidades, limites e riscos das diversas tecnologias WtE para o planejamento e investimento em gestão de resíduos de forma eficiente e eficaz. Suas metas são 1) tornar a discussão sobre WtE mais transparente; 2) oferecer uma perspectiva técnica, financeira, institucional, social, ambiental e jurídica das tecnologias WtE mais comuns; 3) destacar as implicações e limites para sua aplicação, levando-se em conta os padrões ambientais internacionalmente reconhecidos. Nomeadamente, esclarece a necessidade de analisar atenciosamente as condições locais de gestão de resíduos antes de contemplar uma opção de WtE. O guia não substitui a necessidade de um estudo de viabilidade especializado para o planejamento de um projeto de WtE.

Este guia foi desenvolvido pela Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) em nome do Ministério Federal Alemão para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (BMZ), em cooperação com a Universidade de Ciências Aplicadas do Noroeste da Suíça (FHNW).

O que é Waste-to-Energy?

WtE refere-se a um grupo de tecnologias para tratar resíduos visando a recuperação energética na forma de calor, eletricidade ou combustíveis alternativos, como o biogás. O escopo do termo 'Waste-to-Energy' (transformação de resíduos em energia) é amplo, englobando tecnologias de diversas escalas e complexidades. Estas incluem a produção de gás de cozinha a partir de resíduos orgânicos em biodigestores domésticos, a captação de gás metano de aterros sanitários, tratamento térmico de resíduos em plantas de dimensões industriais, coprocessamento de combustível derivado de resíduos (CDR) em usinas de cimento ou gaseificação. Este guia traz uma compreensão ampla do WtE, referindo-se a plantas de grande escala (p. ex. de dimensões industriais) usando tecnologia de incineração, coprocessamento, digestão anaeróbia, captação de gás de aterro e pirólise/gaseificação. Estas cinco tecnologias são aplicadas a diferentes fluxos de resíduos e têm características e papéis distintos. Cada aplicação deverá, portanto, ser avaliada com base no contexto local e no fluxo de resíduos em questão. O capítulo 3 oferece uma descrição detalhada destas cinco tecnologias.

Principais conclusões e recomendações

Ao avaliar a implementação de tecnologias WtE, tomadores de decisão deverão ponderar os aspectos a seguir:

- » **O desenvolvimento de sistemas de GSRU deve seguir a hierarquia dos resíduos:** A redução dos resíduos deverá ser prioridade, seguida da preparação para reutilização e da reciclagem dos resíduos. Projetos de WtE podem ser classificados como tecnologia complementar para recuperação de energia a partir das frações não recicláveis dos RSU e, portanto, não devem concorrer com medidas de redução, reutilização e reciclagem. Quando executado de forma controlada, WtE é preferível em relação a aterros sanitários, mas sempre tem baixa prioridade na hierarquia dos resíduos.

Avalie seu fluxo de resíduos e identifique potencial para reutilização e reciclagem de frações de resíduos específicas.

- » **WtE deverá cumprir normas de emissões rigorosas:** Um quadro jurídico completo para todos os tipos de WtE é raro. Onde não houver legislação ou a legislação existente não puder ser aplicada, as normas de emissões rigorosas não serão cumpridas. Normas de emissões pouco rigorosas não serão toleradas devido ao impacto irreversível na saúde.

Procure por experiências internacionais e utilize normas internacionais consagradas em processos licitatórios, sempre com mecanismos de monitoramento e controle para assegurar seu cumprimento.





- » **WtE requer conhecimento das características e quantidades de resíduos:** A quantidade de resíduos deve dobrar nos próximos 20 anos em muitas cidades, mas planos consistentes de gestão de resíduos, onde alterações sociais e demográficas são ponderadas, são raros.

Elabore um plano de gestão de resíduos para o município, levando em consideração a evolução da quantidade de resíduos a médio e longo prazo, e detalhando os fluxos de resíduos mais pertinentes, suas características e opções de tratamento. Deve-se ponderar, ainda, uma possível cooperação entre municípios para alcançar uma economia de escala viável.

- » **O WtE é baseado num sistema eficiente de GRSU:** Somente municípios com sistemas eficientes de coleta e transporte de resíduos, com descarte final de forma segura terão capacidade de gestão de sistemas de WtE com sucesso.

Comprove que o sistema atual de gestão de resíduos está consolidado técnica e financeiramente.

- » **WtE requer recursos financeiros significativos:** Financiamento seguro para operação e manutenção é uma peça chave para operação sustentável de plantas WtE.

Se o seu município não puder financiar os sistemas atuais de coleta e tratamento de resíduos de forma contínua, você deve reconsiderar a construção de uma planta WtE.

- » **A receita com venda de energia não cobre os custos do WtE:** Os altos custos de capital e operacionais de plantas WtE não costumam ser cobertos exclusivamente pela venda de energia no mercado.

Faça uma previsão realista da renda gerada pela venda de energia e procure dispositivos robustos de financiamento adicional.

- » **WtE requer pessoal qualificado:** Plantas WtE não são equipamentos de geração de energia, gás, calor ou vapor de manuseio simples. São tecnologias sofisticadas que requerem pessoal especializado e manutenção periódica.

Assegure-se que é possível contratar e manter pessoal qualificado e que funcionários existentes recebam qualificação regular. Para certas tarefas técnicas e de gestão, deve-se considerar a terceirização.

- » **WtE é somente uma potencial peça de um sistema de GRSU existente:** Plantas WtE nunca são elementos técnicos isolados e não irão resolver sozinhos os problemas de resíduos existentes.

Assegure-se que uma possível planta WtE seja parte integrante de um sistema existente de gestão de resíduos desde a fase de planejamento. Deve-se ponderar capacidades de reserva e de contingência.

» **A segurança jurídica para investidores de WtE deverá estar assegurada:** O setor privado tem um papel fundamental na construção e operação de plantas WtE. Entretanto, investidores privados só irão investir se estiverem confiantes de lucrar com o serviço oferecido. Em muitos países, o setor privado ainda reluta em investir devido aos riscos financeiros envolvidos.

Ofereça um ambiente que garanta a segurança jurídica, com base na transparência e confiança, pautado pela visão de oferecer um sistema de gestão de resíduos sustentável à população.

» **Tecnologias WtE adaptam-se a países em desenvolvimento:** Há pouca experiência com plantas WtE em países em desenvolvimento e os casos de sucesso costumam ser na captação de gás de aterro e no coprocessamento.

Desconfie de um vendedor que ofereça uma tecnologia avançada de WtE sem apresentar comprovação de operação efetiva em um contexto similar ao seu.

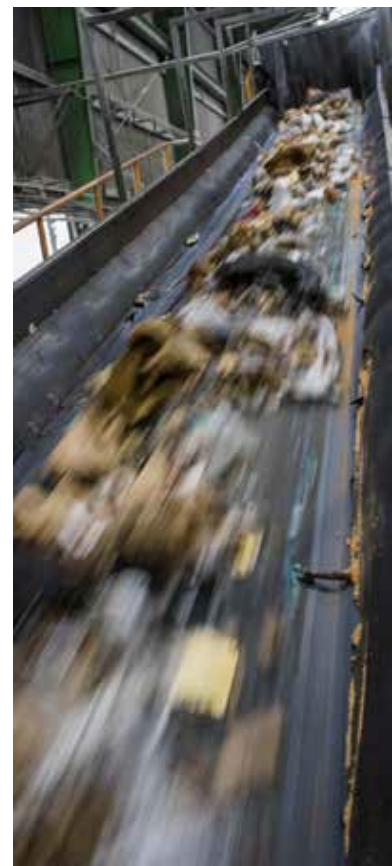
Abordagem e Estrutura deste Guia

Este guia tem como base o conhecimento de agências de desenvolvimento bi- e multilaterais, experiências práticas de operadores de plantas e empresas privadas do setor de GRSU, além de informação da literatura. **Ele é destinado a um público amplo:** políticos, tomadores de decisão e assessores a nível nacional, regional e local, bem como especialistas ambientais ou membros de Organizações Não Governamentais (ONGs) engajadas na promoção do desenvolvimento urbano sustentável em países emergentes ou em desenvolvimento. Este documento poderá também interessar a empresas de engenharia, operadores de plantas e ao público em geral.

O capítulo 1, Introdução, apresenta um panorama geral da gestão de resíduos sólidos urbanos e, mais especificamente, de Waste-to-Energy. O capítulo 2 descreve os requisitos para utilização de WtE como opção para o tratamento de RSU. Cinco tecnologias WtE são apresentadas no capítulo 3: (a) incineração, (b) coprocessamento, (c) digestão anaeróbia, (d) gás de aterro e (e) tecnologias alternativas (pirólise/gaseificação).

Agradecimentos

Este documento representa uma consolidação de informações coletadas de diversas fontes, nomeadamente o conhecimento de profissionais (organismos de desenvolvimento, consultorias, fornecedores de equipamentos, operadores de plantas WtE, etc.) em países industrializados, emergentes ou em desenvolvimento. Agradecemos por todas as contribuições. Agradecemos em especial aos especialistas que fizeram comentários valiosos durante a etapa de revisão técnica.



1. INTRODUÇÃO

Em diversos países, a gestão de resíduos sólidos urbanos (GRSU) tem sido considerada um serviço público de baixa prioridade: um incômodo e um fardo. Entretanto, a gestão de resíduos sólidos (GRS) deficiente aparece cada vez mais na agenda política devido ao aumento de problemas de saúde e ambientais, e ao descontentamento de uma parcela crescente da população com a diminuição da qualidade de vida provocada pelo acúmulo de lixo em espaços públicos. A importância da GRS como serviço público vem sendo negligenciada e sua complexidade é subestimada. Tanto os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável¹ (ODSs) das Nações Unidas, quanto a Nova Agenda Urbana² da ONU-Habitat pedem melhorias nas práticas de gestão de resíduos como serviço básico para a população.

Gestores de resíduos e tomadores de decisão em países emergentes ou em desenvolvimento devem responder a estes desafios. Recentemente o Waste-to-Energy (WtE) vem sendo visto como uma solução para os problemas causados pelo aumento da quantidade de resíduos em cidades em expansão, bem como a crescente demanda por energia. Entretanto, o WtE não poderá resolver o problema de forma isolada. Deverá fazer parte de um sistema integrado de gestão de resíduos sólidos adaptado às condições locais específicas em relação à composição, coleta e reciclagem dos resíduos, ao setor informal, desafios ambientais, financiamento, custo de recursos e outros aspectos.

Este capítulo destaca o porquê da urgência na melhoria da gestão de resíduos em cidades, como a GRSU está embutida no conceito da economia circular, e quais são os equívocos e desafios mais comuns ao tratar de WtE.

¹ A Assembleia Geral adotou 17 ODSs em 25 de setembro de 2015, veja em <https://sustainabledevelopment.un.org/>

² A Nova Agenda Urbana foi adotada na Conferência das Nações Unidas sobre Habitação e Desenvolvimento Urbano Sustentável (Habitat III), realizada de 17 a 20 de outubro de 2016 em Quito, no Equador, veja em <https://habitat3.org/the-new-urban-agenda>





1.1 Urbanização e os novos Desafios em Gestão de Resíduos

MENSAGEM: O século XXI será o século das cidades.

O século XXI será o século das cidades. A população urbana mundial vem crescendo rapidamente desde 1950, de 746 milhões para 3,9 bilhões em 2014[2]. De acordo com dados da ONU, deverá atingir 9,7 bilhões em 2050, sendo que quase 90% deste aumento deverá ocorrer em áreas urbanas da África e Ásia.

Hoje em dia, estima-se um total global de 2 bilhões de toneladas anuais de resíduos sólidos urbanos. Ao contrário das tendências de população e urbanização, não há estimativa da geração futura de resíduos per capita [1]. Entretanto, há um entendimento comum que a quantidade de resíduos deverá aumentas significativamente. Os maiores fatores são o aumento do consumo de bens nas crescentes populações urbanas, mudanças no estilo de vida, e o aumento da riqueza na classe média. A Figura 1 demonstra o aumento acentuado na quantidade de resíduos em áreas urbanas até 2050.

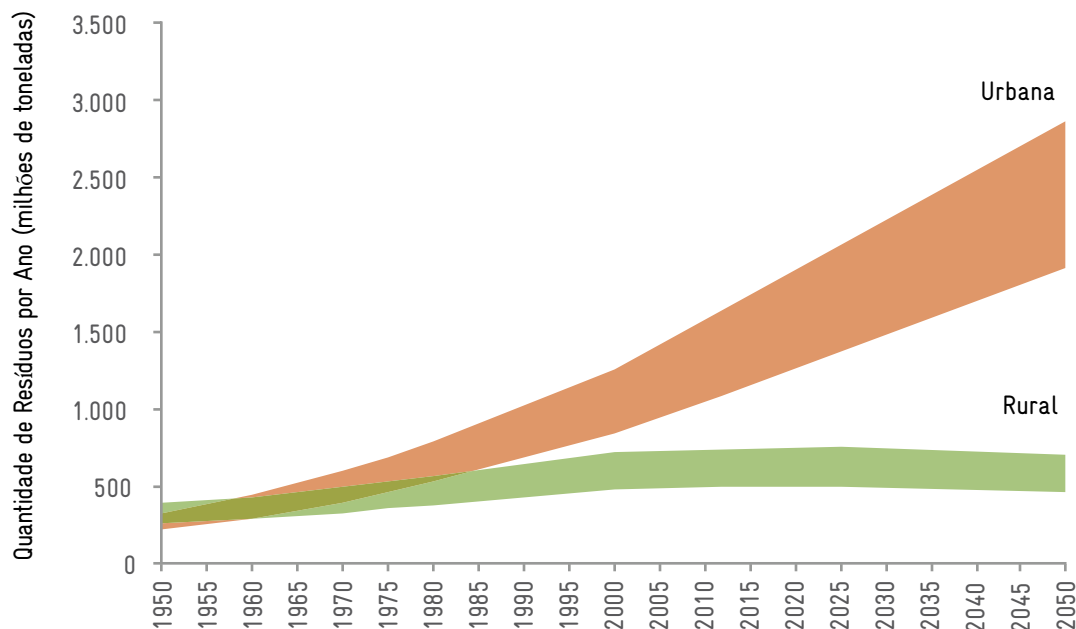


Figura 1: Projeção da evolução da quantidade de resíduos urbanos e rurais no mundo, 1950-2050. Com base em dados da ONU [3] [4] [5] [6] e uma geração diária de resíduos per capita entre 0,8 e 1,2kg em áreas urbanas e 0,4 e 0,6kg em áreas rurais.

De acordo com a Agência Internacional de Energia, as taxas de geração de resíduos deverão mais que dobrar ao longo dos próximos vinte anos em países de baixa renda [7]. Independentemente da precisão dessas previsões, este imenso volume de resíduos será um desafio extraordinário para a maioria das autoridades urbanas que lutam para gerir as quantidades atuais de resíduos.

MENSAGEM: Aterros sanitários são uma solução intermediária ou transitória, mas ainda uma necessidade para o descarte de resíduos. Não são a meta final da gestão sustentável de resíduos. Sistemas de GRSU devem seguir dando prioridade à reciclagem.

Atualmente, cerca de 70% dos RSU acabam em aterros ou lixões de forma descontrolada, muitas vezes contaminando as águas de superfície e subterrâneas ou o solo, e emitindo gases de efeito estufa [8]. O descarte de resíduos próximo à costa ou margens de rios oferece um risco de poluição marinha. Aterros sanitários deixaram de ser o estado da arte. Embora haja ótimos exemplos da gestão de Aterros Sanitários (AS) com impacto ambiental significativamente reduzido, a busca por novos locais para AS costuma estar acompanhada de protestos públicos. Estes locais dificilmente estão disponíveis em áreas metropolitanas ou centros urbanos devido à escassez de terrenos, conflitos de terras e o rápido aumento do custo da terra. O tratamento e descarte adequado de resíduos continua sendo um grande desafio para muitos municípios. É preciso incentivar uma redução na geração de resíduos e um aumento na reciclagem. A separação, coleta, transporte, tratamento e descarte de RSU vem sendo um dos principais objetivos legais de muitos países emergentes ou em desenvolvimento. Entretanto, apesar do progresso recente na reciclagem de materiais “clássicos”, como papel, metal, vidro ou plásticos, os níveis de reciclagem ainda são insuficientes.

MENSAGEM: Para alguns fluxos de resíduos não recicláveis, o WtE poderá ser uma alternativa viável para atender o futuro aumento na quantidade de resíduos, desde que normas ambientais sejam cumpridas e aspectos sociais devidamente ponderados.

1.2 Waste-to-Energy: uma Tentação para os Municípios

MENSAGEM: Lidar com a questão do waste-to-energy significa alcançar um novo patamar de complexidade numa situação desafiadora de gestão de resíduos.

Crescentes preocupações com escassez de recursos naturais, a contribuição da gestão inadequada de resíduos para o aquecimento global e a carência de geração de energia provocaram discussões sobre resíduos como um recurso e os conceitos de WtE, mais especificamente. Tomadores de decisão a nível local e nacional em países emergentes ou em desenvolvimento podem ser atraídos por fornecedores de tecnologia com a promessa de que o WtE irá resolver os seus problemas de resíduos, criar uma oportunidade de negócios lucrativos, e ainda contribuir para o fornecimento de energia. Desta forma, o resíduo aparenta ser a matéria-prima ideal para recuperação de energia. Todavia, somente um número limitado de projetos realizados em países emergentes ou em desenvolvimento tem sido exitoso a longo prazo.

Algumas experiências positivas estão no campo do estado da arte do coprocessamento em fornos de cimento e captação de gás em aterros sanitários. Entretanto não há, ainda, digestores anaeróbios alimentados por RSU orgânico segregado em funcionamento com sucesso em larga escala em países em desenvolvimento. Além disso, há somente um punhado de incineradores de resíduos em operação continuada em países em desenvolvimento na África ou na Ásia. Tecnologias alternativas como pirólise e gaseificação não passaram da escala piloto (mesmo em países industrializados) para frações misturadas de RSU.

As condições estruturais na maioria dos países emergentes ou em desenvolvimento são essencialmente diferentes daquelas que viram o surgimento e aplicação exitosa de diversos projetos de WtE na Europa, América do Norte, Japão e China, onde plantas WtE em escala industrial são cada vez mais comuns. Uma mera transferência de tecnologia não costuma ser exitosa porque não atende às condições dos países emergentes ou em desenvolvimento, especialmente em termos de requisitos financeiros, composição da matéria prima e das capacidades locais. Contudo, tecnologias WtE podem aprimorar a gestão de resíduos nas cidades em rápido crescimento dos países emergentes ou em desenvolvimento, mas sua aplicação é complexa e deverá abordar, entre outros, as seguintes especificidades:

- » RSU com poder calorífico mais baixo que em países industrializados devido ao maior teor de umidade (alto teor orgânico) e ao conteúdo mineral nos resíduos (p. ex. cinza, resíduos de construção e demolição);
- » Alterações sazonais na composição dos resíduos (p. ex. mudanças nos padrões de consumo em épocas festivas, colheitas sazonais);
- » Pouca segregação de resíduos na fonte, um requisito para digestão anaeróbia;
- » Modelos de negócios e operacionais frágeis;
- » Falta de conhecimentos sobre a operação e manutenção de plantas WtE;
- » Investimentos e custos operacionais altos que não podem ser recuperados pelas tarifas de resíduos atuais e pela receita com venda de energia;
- » Negligência das questões de subsistência da população marginalizada e trabalhadores informais que dependem da disponibilidade de recicláveis nos resíduos;
- » Falta de monitoramento e pouca fiscalização das normas ambientais, levando a questões de saúde pública.

1.3 Waste-to-Energy e a Economia Circular

A ponto principal da transição para uma economia circular visa substituir a atual economia linear do ‘pegar, fazer e eliminar’ por um modelo onde os recursos circulam com alto valor, evitando ou reduzindo a demanda por recursos primários e minimizando os resíduos poluentes e emissões. Os principais fatores que promovem a economia circular são o aumento na volatilidade de preços e as restrições no fornecimento de recursos primários, as políticas ambientais como os regulamentos de responsabilidade do produtor, e, seguramente, uma alteração na cultura do consumo. A Figura 2 demonstra o princípio da economia circular, tal como desenvolvido pela Fundação Ellen MacArthur [9]. A economia linear passa pelo centro, enquanto os círculos internos representam as ações que podem ser tomadas para tornar os fluxos de materiais biológicos e tecnológicos mais circulares.

MENSAGEM: O objetivo de um sistema moderno de gestão de resíduos não é descartar os resíduos, mas abastecer a economia com matéria prima secundária e energia a partir de resíduos.



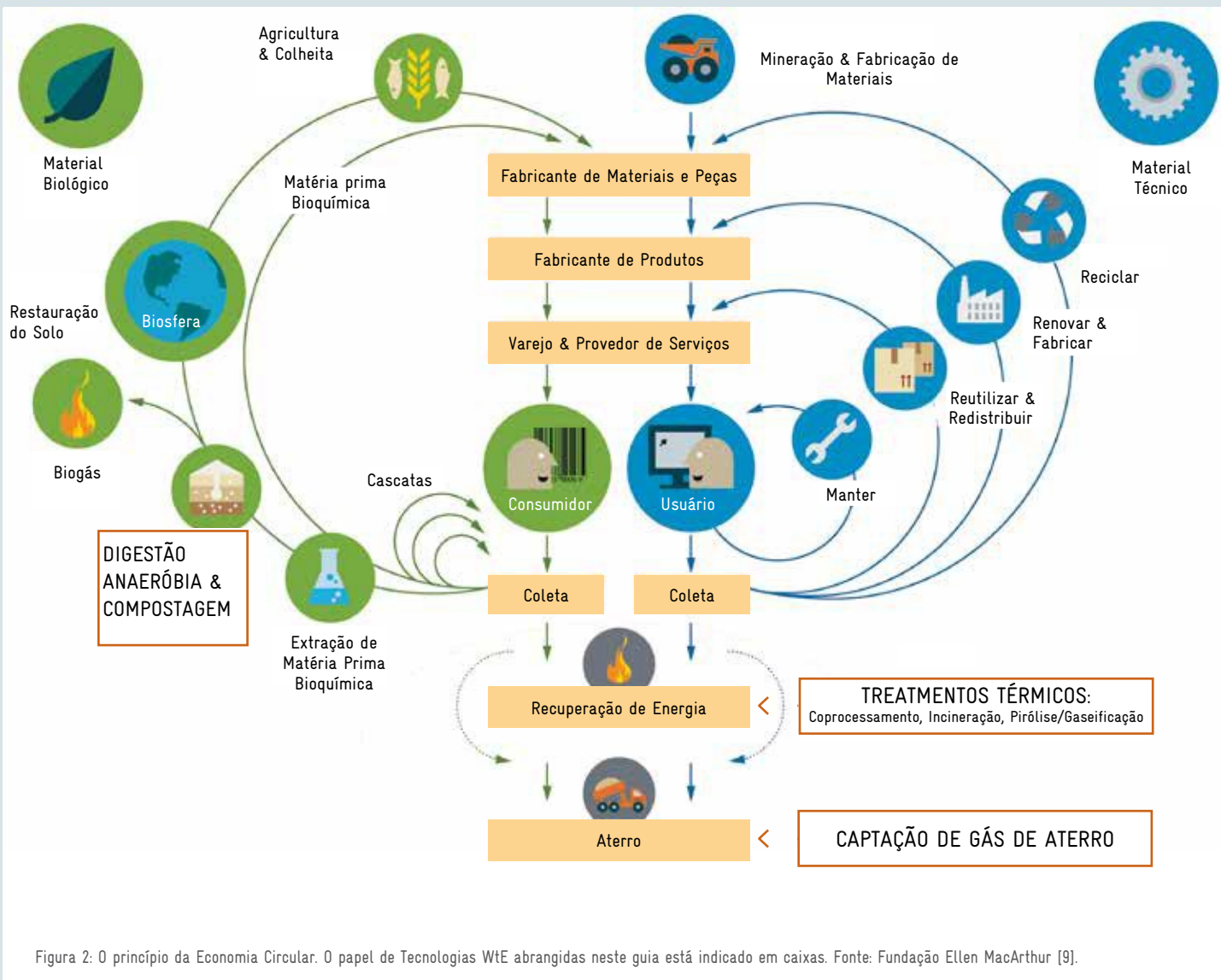


Figura 2: O princípio da Economia Circular. O papel de Tecnologias WtE abrangidas neste guia está indicado em caixas. Fonte: Fundação Ellen MacArthur [9].

Atualmente, muitos países pretendem desenvolver suas estratégias nacionais de gestão integrada de resíduos com base no conceito dos 3 Rs (como parte integrante da economia circular), “reduzir, reutilizar e reciclar”:

1. Reduzir:

A primeira prioridade deverá ser a redução na quantidade de resíduos sólidos, p. ex. desperdício de alimentos, embalagens, desperdício desnecessário de matéria prima e energia no processo produtivo. A redução de resíduos também reduz o custo de sua coleta e tratamento.

2. Reutilizar:

A segunda prioridade deverá ser para a reutilização de material, i.e., um produto descartado é limpo e reparado para ser usado novamente.

3. Reciclar:

A terceira prioridade no conceito dos 3 Rs é de reciclar material, i.e., colher resíduos e transformá-los em matéria prima secundária. A reciclagem de plásticos ou papel costuma economizar mais energia na produção de produtos que a energia que poderia ser produzida em plantas waste-to-energy a partir destes materiais.

As diversas tecnologias WtE têm diferentes papéis na economia circular, que estão indicados na Figura 2. Mesmo com reciclagem intensa, há sempre um residual sem valor material ou comercial, que em muitos casos pode ser classificado com perigoso. Este residual com algum poder calorífico poderá ser utilizado para recuperar energia e substituir o uso de combustíveis fósseis. Um tratamento térmico como incineração ou coprocessamento, em conformidade com as normas ambientais para emissões, também poderá contribuir para a destruição de substâncias orgânicas tóxicas e removê-las do fluxo circular do material. Alguns materiais valiosos, como metais, podem vir a ser

recuperados da escória e das cinzas da incineração; entretanto, o restante deverá ser tratado separadamente e descartado em local de aterro seguro. Caso materiais biológicos sejam devidamente separados de materiais técnicos, a digestão anaeróbia poderá ter um papel importante na recuperação de biogás e adubo no ciclo biológico. A captação de gás de aterro possibilita a mitigação do metano liberado de materiais biológicos enviados ao aterro sanitário.

MENSAGEM: Projetos WtE não devem competir com a redução de resíduos e com medidas para reutilização eficiente e reciclagem de materiais. O WtE é uma tecnologia complementar para o tratamento das frações residuais não recicláveis de RSU.

1.4 Mitos sobre Waste-to-Energy

A recuperação de energia de RSU tem seu papel na economia circular quando utilizado em frações não recicláveis e perigosas de resíduos, respeitando normas ambientais e levando em conta aspectos sociais. Entretanto, sua inserção em países emergentes ou em desenvolvimento ainda está em estágio inicial. Algumas empresas podem oferecer opções responsáveis, porém muitas discussões sobre este assunto podem ser tendenciosas e pouco transparentes. Há empresas inexperientes visando tirar proveito de municípios, portanto é importante estar atento aos diversos mitos mais comuns sobre Waste-to-Energy:

Mito 1: “WtE é uma solução flexível que resolve todos os problemas de resíduos da cidade”

A situação é muito mais complexa e WtE exige planejamento, construção e operação profissionais. Infelizmente, há diversas empresas no mercado que têm pouca experiência nas condições encontradas em países emergentes ou em desenvolvimento. Tomadores de decisão devem estar atentos, pois seu objetivo primário é de “vender” seu produto ao invés de resolver os problemas locais.

Mito 2: “Uma planta WtE poderá cobrir seus custos somente pela venda de energia recuperada”

Na Europa, onde o poder calorífico dos resíduos e os preços da energia são mais altos, a receita proveniente da venda não subsidiada de energia (em forma de calor e energia) poderá cobrir os custos operacionais, mas nunca os investimentos e os custos de capital.

Mito 3: “Com uma planta WtE em operação, uma grande parte da demanda de energia de uma cidade poderá ser atendida”

Na realidade, energia oriunda dos resíduos domésticos só é capaz de suprir uma pequena parcela da demanda de energia de uma cidade (~ 5%). A geração de calor é a aplicação mais eficiente na Europa, mas quase nunca utilizada em países em desenvolvimento.

Mito 4: “É possível transformar lixo em ouro; mesmo resíduos não separados podem ser vendidos para serem usados na recuperação de energia e de materiais”

Na realidade, WtE não é um modelo de negócios onde a receita cobre os custos. Receita com venda de energia ajuda a cobrir parte dos custos globais do tratamento térmico, mas tarifas adicionais ou outras formas de receita são necessárias para cobrir os custos totais. Em todos os países, a gestão de resíduos tem seus custos e não pode ser considerada um negócio lucrativo que depende exclusivamente da venda de energia, de combustível sólido recuperado (CSR) e de material reciclado, considerando os preços atuais destes produtos.

Mito 5: “Empresas internacionais qualificadas e experientes estão interessadas em investir e operar grandes plantas WtE em países emergentes ou em desenvolvimento por sua própria conta e risco”

Isto é uma meia verdade, uma vez que empresas internacionais experientes ainda estão relutantes em investir em WtE em países emergentes ou em desenvolvimento. Os riscos jurídicos, financeiros e reputacionais são altos e qualquer projeto do setor privado precisa ser rentável.

Estes mitos seguem vivos e poderão obstruir uma discussão informada. Este guia visa fornecer orientações abrangentes para que tomadores de decisão possam debater os mitos acima. Adicionalmente, uma ferramenta útil para auxiliar planejadores a avaliar a qualidade de uma proposta técnica e financeira de uma planta WtE foi desenvolvida pelo Grupo de Trabalho Colaborativo em Gestão de Resíduos Sólidos em Países de Baixa e Média Renda, chamada de Ferramenta de Avaliação Rápida do GTC Waste-to-Energy, 2016 [10]. Esta ferramenta está disponível *online*.

2. REQUISITOS PARA WASTE-TO-ENERGY

Este capítulo trata das condições básicas necessárias para considerar WtE como uma opção viável para complementar um sistema de GRSU existente. WtE não deverá ser visto como uma alternativa tecnológica isolada, mas como parte de um conceito integrado de GRS onde a prevenção de resíduos e reciclagem de materiais são prioridade. Os diversos tópicos abordam a situação atual, descrevem os requisitos técnicos e operacionais mínimos e oferecem um panorama das condições estruturais ambientais, jurídicas e econômicas.

2.1 Características dos Resíduos Urbanos

Um cidadão urbano em um país emergente ou em desenvolvimento gera entre 100 e 400kg de RSU por ano (ver Figura 3). As razões desta grande variedade e incerteza são os diferentes níveis de desenvolvimento econômico e consumo, bem como a definição da quantidade de resíduos gerados. Algumas estatísticas baseiam-se no total estimado de resíduos gerados per capita, incluindo todos os materiais reciclados. Outras só consideram os resíduos geridos pelos órgãos competentes locais e, portanto, excluem materiais valiosos coletados e segregados na fonte pelo setor informal, por exemplo. Em muitos casos, a coleta seletiva de recicláveis como garrafas de vidro ou PET, jornais ou latas é realizada antes de atingir o fluxo formal de resíduos, de responsabilidade do município. Consequentemente, os municípios lidam com uma fração “restante” de resíduos altamente heterogênea, de alto teor orgânico e baixo poder calorífico. Estas incertezas em termos de quantidade e qualidade devem ser cuidadosamente analisadas no planejamento de soluções WtE, bem como o impacto social no setor informal devido à alteração pretendida no sistema primário de coleta e reciclagem.

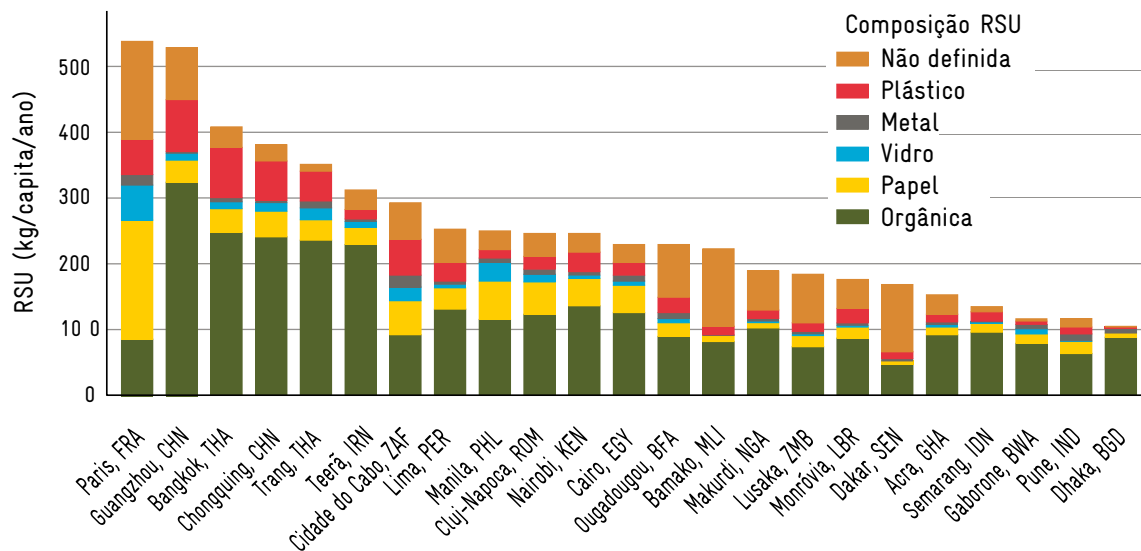


Figura 3: Composição dos RSU per capita (kg/capita/ano) em diversas cidades do mundo [11].

Na maioria dos países em desenvolvimento, os resíduos orgânicos com alto teor de humidade compõem a fração mais significativa do fluxo formal de resíduos e devem ser tratados. Em cidades com elevada atividade de construção e sem segregação de resíduos de construção e demolição, os RSU ainda contêm uma fração significativa de material inerte.

MENSAGEM: Resíduos sólidos urbanos misturados de países em desenvolvimento são, por natureza, diferentes daqueles de países industrializados e têm características específicas em cada cidade. Esta diversidade deve ser levada em conta durante qualquer avaliação tecnológica.



2.2 Quadro Jurídico e Impacto Ambiental

A gestão de resíduos, e particularmente o WtE, devem estar regidos por um quadro jurídico e regulatório implementado e aplicado de forma eficaz. O quadro jurídico se faz necessário por diversas razões: em primeiro lugar, a lei garante segurança jurídica. As partes interessadas - órgãos administrativos, produtores de resíduos, empresas de tratamento de descarte, cidadãos, etc. - precisam saber exatamente seus papéis e obrigações. Somente uma regulamentação juridicamente vinculativa poderá oferecer um quadro jurídico para atingir estes objetivos. A legitimidade de ações administrativas também depende das normas jurídicas. Além disso, normas de emissões e outros requisitos ambientais do WtE exigem uma base jurídica sólida e um controle permanente por órgãos públicos qualificados e bem equipados.

O quadro jurídico ambiental e uma lei nacional de resíduos deverão estabelecer as metas e normas fundamentais para as atividades WtE para RSU, incluindo princípios de controle de emissões. Nomeadamente, devem conter:

- » **Planejamento e licitação:** Em geral, as normas nacionais são contempladas no planejamento de infraestrutura nova. Entretanto, ao analisar opções de WtE, é recomendável utilizar normas internacionais de emissões e segurança durante qualquer processo licitatório para minimizar os riscos para tomadores de decisão.
- » **Obrigações dos operadores:** A legislação deve exigir que instalações de WtE estejam sujeitas a uma avaliação de impacto e licenciamento ambiental conforme legislação nacional de controle de emissões ou resíduos.
- » **Pré-requisitos para licenciamento:** Em termos gerais, a lei deve estabelecer as obrigações dos operadores de plantas de forma que não possam causar efeitos nocivos ao meio ambiente ou outros perigos, desvantagens ou incômodos significativos para o público em geral ou para a vizinhança, por causa de suas instalações ou dependências.
- » **Normas de segurança e ambientais:** Os limites de emissões e requisitos de segurança precisam ser controlados por normas juridicamente vinculativas. Os limites de emissões impostos a WtE devem atender a normas reconhecidas e aplicadas internacionalmente. A aplicação de normas ambientais inadequadas ou de baixo padrão irá acarretar riscos adicionais para a saúde pública, além de custos ambientais.
- » **Monitoramento do cumprimento das normas de segurança e ambientais:** O monitoramento é a responsabilidade fundamental de um órgão regulatório competente e independente. A legislação nacional deverá estabelecer padrões de qualidade do ar e assegurar seu cumprimento próximo a instalações WtE.

MENSAGEM: Em muitos países, o quadro jurídico para projetos, homologação, operação e monitoramento de WtE é deficiente ou até inexistente. Um quadro jurídico aplicável deverá ser assegurado e sua aplicação deverá estar em processo de elaboração antes de qualquer estudo para construir e operar uma planta WtE.

A maioria dos países emergentes ou em desenvolvimento têm uma legislação ambiental. Entretanto, em muitos casos, disposições específicas para plantas WtE inexistem ou são muito genéricas e não oferecem um enquadramento jurídico para projetos, homologação, operação ou monitoramento. Isto também se aplica ao processo de implementação, onde não costuma haver pessoal capacitado nem recursos financeiros para realização do processo. Se não houver um quadro jurídico, experiências de países industrializados podem servir de referência para a sua elaboração. A Diretiva Europeia de Emissões Industriais (2010/75/EU) [12]) poderá servir de exemplo para definir limites de emissões de incineração.

2.3 Aspectos Financeiros e Institucionais de Plantas WtE

MENSAGEM: Projetos de WtE são dispendiosos e representam um risco financeiro substancial para um município. Uma análise dos custos e um conhecimento profundo das implicações financeiras são fundamentais para o processo decisório.

Projetos de WtE requerem altos investimentos não somente pelo processo de tratamento propriamente dito, mas também para a mitigação dos riscos operacionais (acidentes, incêndios, etc.). Os custos de operação e manutenção (O&M) de plantas WtE são consideravelmente mais altos que em aterros sanitários. O financiamento seguro e permanente é um fator chave para qualquer sistema de GRSU. O município deverá certificar-se que os requisitos financeiros serão atendidos. Uma vez que isto não costuma ser possível através de tarifas sobre resíduos, deve-se avaliar as possibilidades de financiamento adicional. Exemplos de fontes de geração de recursos são:

- » Taxas de resíduos direta à população;
- » Financiamento cruzado dos serviços de GRS através de outras taxas ou tarifas locais;
- » Contrapartida financeira quando resíduos forem entregues diretamente à planta;
- » Receita com a venda de material reciclado e energia recuperada (energia elétrica, calor ou vapor);
- » Subsídios locais ou nacionais;
- » Receita com fundos de carbono nacionais ou internacionais (p. ex. Fundo Verde para o Clima);
- » Reembolso fiscal e aplicação de uma tarifa de alimentação especial para energia gerada a partir de fontes não convencionais, como de resíduos.

Especialmente as duas últimas opções devem ser analisadas cuidadosamente, uma vez que têm o potencial de oferecer uma garantia de longo prazo para o município ou investidor privado.

MENSAGEM: Uma concepção sólida do ponto de vista técnico, social e financeiro, que permite cobrir os custos operacionais de um WtE e uma estrutura institucional adequada, são pré-requisitos para a gestão sustentável de qualquer sistema integrado de GRS.

3. OPÇÕES DE TECNOLOGIA WASTE-TO-ENERGY

Este capítulo apresenta um resumo de cinco tecnologias WtE em escala municipal (ver Figura 4): incineração, coprocessamento, digestão anaeróbia (DA), gás de aterro (GA) e pirólise/gaseificação (também chamadas de tecnologias alternativas). Enquanto os princípios gerais dos últimos dois capítulos se aplicam, estas cinco tecnologias têm funções e aplicações distintas no sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos. A ordem das tecnologias baseia-se na demanda por assistência observada e não sugere qualquer prioridade ou validade.

Para cada tecnologia, é apresentada alguma informação técnica básica, seguida de uma lista dos tipos de resíduos adequados e um resumo das questões operacionais, ambientais, jurídicas e financeiras aplicáveis. O leitor deverá obter um conhecimento básico sobre qual tecnologia se adequa melhor ao fluxo de resíduos e suas implicações jurídicas e financeiras.

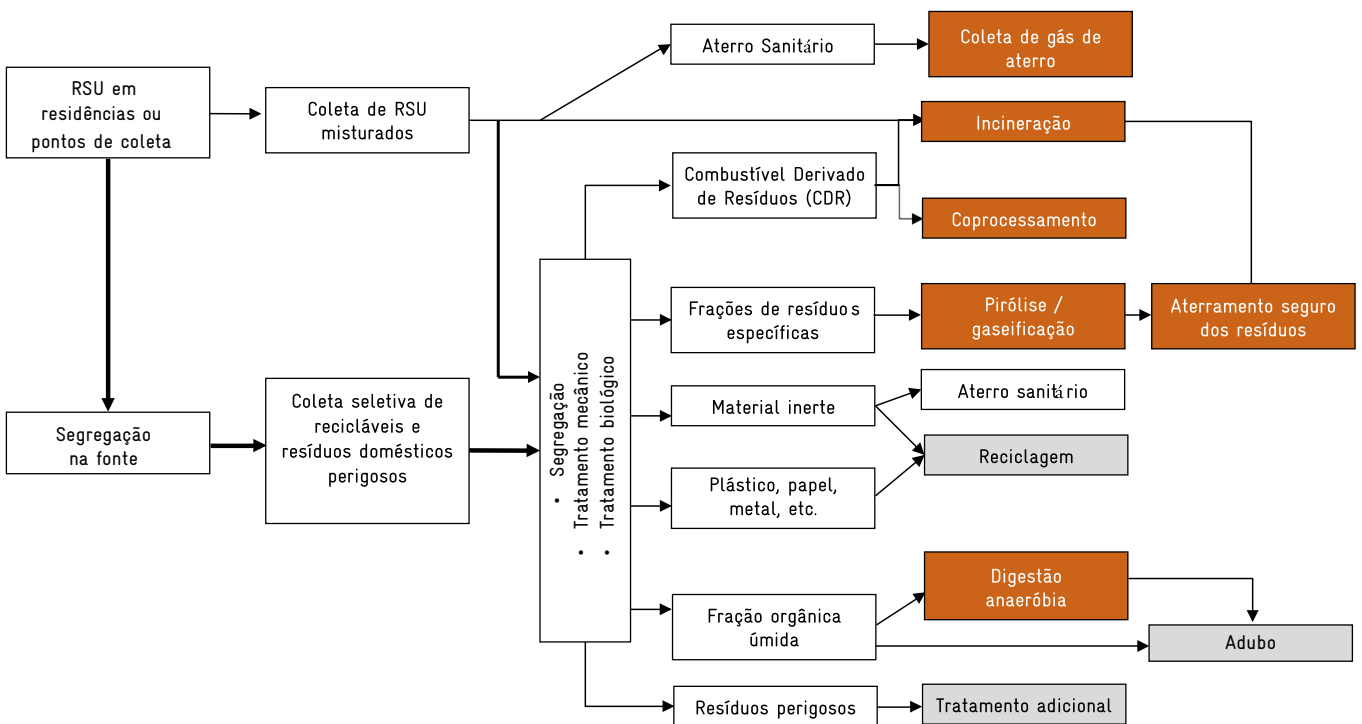


Figura 4: Resumo do fluxo de materiais de RSU e suas diferentes opções de utilização e tratamento. A coleta seletiva de fluxos de resíduos torna o uso de tratamentos diferentes mais viável.

Diversas publicações que descrevem detalhadamente as diferenças fundamentais e especificidades das tecnologias WtE estão disponíveis nos principais atores (veja as seções de referências e leituras adicionais). Alguns incluem uma análise dos requisitos necessários, como questões de mercado, políticas, regulatórias, financeiras e de sustentabilidade. Estes documentos são uma fonte preciosa de informações, especialmente para especialistas técnicos e agentes de implementação. Entretanto, muitos destes documentos partem do princípio de que os pré-requisitos podem ser facilmente cumpridos (p. ex. exigir pagamento de tarifas de resíduos, segregação de resíduos orgânicos na fonte próxima de 100% ou a existência de um quadro jurídico aplicável), mas os riscos de implementação em contextos locais nem sempre recebem a atenção necessária.

3.1 Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos

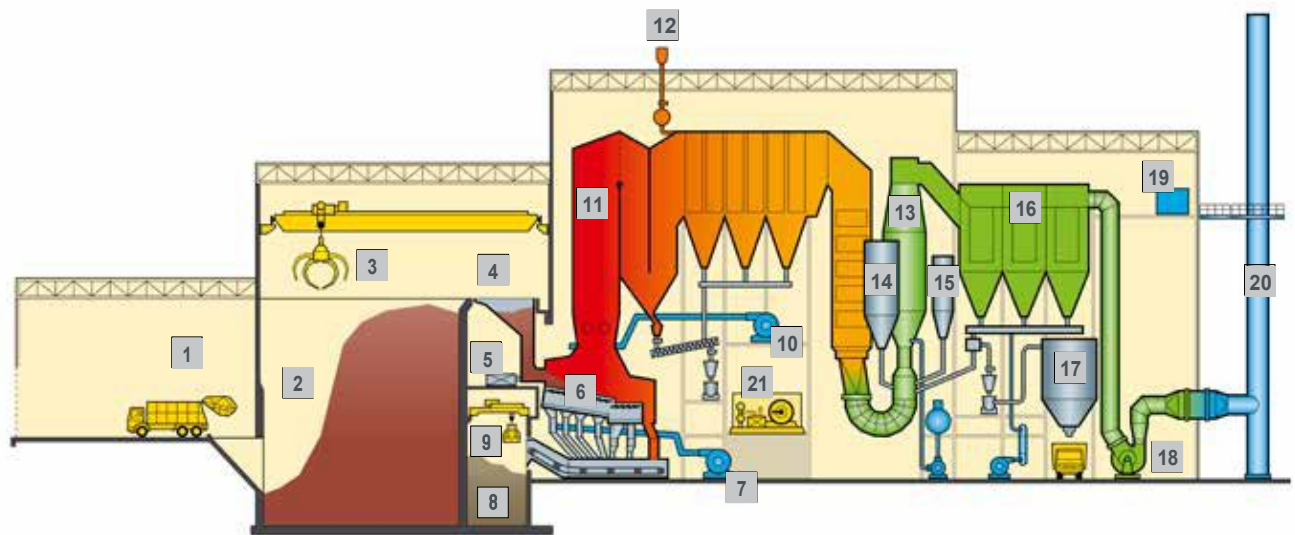
A incineração de resíduos sólidos urbanos (IRSU) consiste na queima dos resíduos em processo controlado no interior de instalações construídas especificamente para tal. A meta principal da IRSU é reduzir o volume e massa, além de tornar os resíduos inertes quimicamente, num processo de combustão sem a necessidade de combustível adicional (combustão autotérmica). Como efeito colateral, possibilita a recuperação de energia, minerais e metal do fluxo de resíduos [13]. Há sempre cerca de 25% de resíduo da incineração, na forma de escória (cinzas de fundo) e cinzas em suspensão. A cinza de fundo é composta de partículas finas que atingem o fundo do incinerador durante a combustão, enquanto a cinza em suspensão se refere a partículas finas nos gases de combustão que devem ser removidas através de tratamento do gás. Estes resíduos exigem maior atenção, e no caso das cinzas em suspensão perigosas, um local para descarte final seguro.

3.1.1 DESCRIÇÃO DA TECNOLOGIA

Ao entrar em contato com oxigênio, a matéria combustível contida nos resíduos começa a queimar quando a temperatura de ignição é atingida, numa reação de oxidação. A temperatura de reação é entre 850 e 1450°C, e o processo de combustão ocorre nas fases sólida e líquida simultaneamente, liberando energia na forma de calor. É necessário um poder calorífico mínimo dos resíduos para tornar possível uma reação térmica em cadeia e a combustão autossuficiente (a chamada combustão autotérmica), i.e., não há necessidade de outros combustíveis.

Durante a incineração, são criados gases de combustão que, após tratamento, são liberados para a atmosfera através de um tubo chamado de duto de exaustão. Estes gases de combustão contêm a maior parte da energia disponível na forma de calor, bem como poeira e poluentes gasosos que precisam ser removidos através de um processo de purificação. O excesso de calor da combustão poderá ser utilizado para gerar vapor para geração de energia, para sistemas de aquecimento/refrigeração distrital ou para fornecer vapor para processos industriais próximos (os componentes da IRSU são ilustrados na figura 5). Plantas que utilizam cogeração de energia térmica (aquecimento e refrigeração) juntamente com geração de energia elétrica podem atingir uma eficiência máxima de 80%, enquanto a geração isolada de energia elétrica irá atingir uma eficiência máxima de aproximadamente 20%.





ENTRGA DE RESÍDUOS

- 1 Área de tombamento
- 2 Silo de resíduos
- 3 Guindaste de resíduos
- 4 Rampa de alimentação

INCINERAÇÃO

- 5 Alimentador
- 6 Grelha de incineração
- 7 Ventilador primário
- 8 Silo de cinza de fundo
- 9 Grua de cinza de fundo
- 10 Ventilado secundário
- 11 Caldeira de vapor
- 12 Válvula de segurança

TRATAMENTO DO GÁS

- 13 Reator de gás
- 14 Cal hidratada
- 15 Carvão ativado
- 16 Filtro de saco
- 17 Silo de cinza de suspensão
- 18 Ventilador ID
- 19 Sistema de Monitoramento de Emissões (CEMS)
- 20 Chaminé

RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

- 21 Turbina de vapor / gerador

Figura 5: Componentes de uma planta de incineração de resíduos sólidos urbanos com sistema de tratamento do gás de combustão [14].

3.1.2 FRAÇÕES DE RESÍDUOS ADEQUADAS

A IRSU é projetada para tratar resíduos domésticos tipicamente misturados e crus, além de certos resíduos industriais e comerciais. A parâmetro chave é o teor energético, o poder calorífico inferior (PDI) em MJ/kg. Para assegurar a combustão autotérmica dos resíduos, o PDI não poderá ter uma média anual inferior a 7 MJ/kg [15] (para efeito de comparação, o PDI de óleo combustível é de aproximadamente 40 MJ/kg). Em países em desenvolvimento, o PDI de RSU não segregado costuma ser inferior a este limite devido ao conteúdo predominantemente orgânico com muita umidade e um nível significativo de frações inertes, como cinza ou areia.

A separação prévia de recicláveis afeta as características dos resíduos conforme apresentado na Tabela 1, a seguir.

Fração removida	Impacto principal da remoção nos resíduos
Vidro, metais, cinza, minerais de resíduos de construção e demolição	Aumento no poder calorífico Menor quantidade de escória e metais recuperáveis
Papel, cartão e plástico	Diminuição do poder calorífico Diminuição da carga de cloro (p. ex. do PVC) nas emissões
Resíduos orgânicos de cozinha e jardim	Diminuição da carga de umidade Aumento do poder calorífico
Resíduos volumosos	Esforço reduzido para fragmentar resíduos
Resíduos perigosos (p. ex. baterias, eletrônicos)	Esforço reduzido para remover metais pesados tóxicos voláteis das emissões atmosféricas (p. ex. mercúrio) Menor concentração de poluentes tóxicos na escória e na cinza em suspensão (e.g. cádmio, chumbo, zinco)

Tabela 1: Influência da separação prévia de recicláveis na incineração.

3.1.3 ASPECTOS OPERACIONAIS

A operação altamente complexa de IRSU exige conhecimentos técnicos e administrativos bem desenvolvidos. É muito mais complexo que a operação de um aterro sanitário. Os requisitos são: uma cadeia de fornecimento constante de RSU, uma mistura homogênea de resíduos alimentada continuamente na câmara de combustão, controle e ajuste dos parâmetros do processo e de emissões, manutenção programada, aquisição de materiais auxiliares e peças de reposição, fornecimento de energia garantido para clientes diretos, gestão do descarte de resíduos do processo, etc. A saúde e segurança operacionais devem ser bem desenvolvidas e deverá haver contato frequente com órgãos ambientais, prefeitura, comunidades locais, sociedade civil e outros atores. A localização da IRSU onde o fornecimento constante de energia térmica (aquecimento/refrigeração) ou de energia elétrica possa ser garantido é um fator importante, aumentando a probabilidade de uma receita confiável. Por isso, a IRSU deve ser localizada em parques industriais próximo a fontes de resíduos.

Somente gestores, engenheiros e técnicos com experiência e capacidade comprovada devem ser designados para cargos principais. Se não houver qualificação local, especialistas internacionais devem ser contratados por longo prazo e um programa de capacitação deverá ser implementado.

3.1.4 ASPECTOS AMBIENTAIS

Um dos objetivos da IRSU é contribuir para a redução do impacto ambiental global que poderia ocorrer devido ao descarte descontrolado, queima aberta ou aterramento dos resíduos. A redução de volume causada pela incineração auxilia na economia de espaço para aterros e protege o meio ambiente. Uma parte da energia recuperada ainda pode ser considerada carbono neutro devido ao conteúdo de biomassa no RSU. Entretanto, instalações de IRSU podem gerar grandes quantidades de gases de combustão que precisam ser tratados, mesmo quando a incineração ocorre em condições ideais de combustão. Para evitar riscos irreversíveis à saúde da população local e ao meio ambiente, é essencial cumprir normas internacionais de emissões e o monitoramento e registro das emissões deve ser assegurado. Poluentes nos gases de combustão tomam forma de pó e de gases como ácido clorídrico (HCl), ácido fluorídrico (HF) e dióxido de enxofre (SO₂). Diversos componentes contendo mercúrio, dioxinas ou dióxido de nitrogênio (NO₂) só podem ser removidos através de processos químicos extremamente avançados, o que aumenta significativamente os custos do projeto. Os principais aspectos ambientais a serem tratados são [13]:

- » Controle e monitoramento das emissões atmosféricas e para a água (incluindo odores);
- » Qualidade de potencial de uso da produção de escória (p. ex. níveis de contaminação por metais pesados);
- » Descarte seguro ou reciclagem dos resíduos perigosos de cinza em suspensão;
- » Ruído e vibração do processo;
- » Consumo de água e outras matérias primas (reagentes);
- » Emissão fugitiva, principalmente do armazenamento de resíduos;
- » Riscos de armazenamento/manuseio/processamento de resíduos perigosos.

3.1.5 ASPECTOS LEGAIS

Deve-se assumir que a legislação ambiental da maioria dos países em desenvolvimento não trata especificamente da aplicação da tecnologia de incineração de RSU. Isto torna o processo de avaliação de impacto e licenciamento operacional mais complicado e demorado. Na falta de normas abrangentes e juridicamente vinculativas, estas devem ser desenvolvidas e devem seguir a aplicação de normas internacionalmente reconhecidas. Um exemplo para orientação poderá ser a Diretiva Europeia de Emissões Industriais (2010/75/EU) [12]). Também deve haver uma boa capacidade de monitoramento e aplicação dentro das instituições públicas.

3.1.6 ASPECTOS ECONÔMICOS

A IRSU requer um grande investimento de capital e deve ser apoiado por planejamento financeiro de longo prazo e recursos suficientes para operação e manutenção contínua da planta. Em países em desenvolvimento, poderá haver recursos para investimento inicial, entretanto, os recursos financeiros para a fase operacional não costumam ser apreciados adequadamente. Para comparar e avaliar a viabilidade financeira global da operação de uma IRSU, as estimativas de custos operacionais e de investimento inicial devem ser atualizadas. Para o cálculo do custo líquido, as receitas com venda de energia e materiais podem ser descontadas do investimento capital e custos operacionais atualizados para obter o custo global por tonelada de resíduos com base nos resíduos tratados anualmente. Esta estimativa é apresentada na Tabela 2, para uma IRSU com capacidade para tratar 150,000 toneladas de resíduos por ano. A tabela demonstra que somente as receitas de mercado com vendas de energia e materiais não cobrem os custos anuais da planta, portanto o custo líquido estimado entre 40 e 80 Euros por tonelada de resíduos deverá ser coberto por outra forma de financiamento. Serão necessárias receitas adicionais de taxas, subsídios públicos ou de outras fontes para garantir que a operação possa ser financiada de forma sustentável a longo prazo.

Deve-se compreender que as soluções de incineração resultam em um aumento no custo de tratamento de resíduos comparado com o aterramento sanitário, o que poderá levar produtores de resíduos a preferir a opção atual de descarte. Enquanto as estimativas de custos estão relativamente bem estabelecidas em países industrializados, é difícil fornecer informações precisas de custos para o contexto de países em desenvolvimento. Os custos de investimento e operação apresentados na tabela 2 oferecem uma estimativa baseada em várias fontes mundiais e deve ser considerada somente como orientação.

Riscos de plantas IRSU de baixo custo: Os altos custos de investimento inicial tendem a ser uma barreira importante para o desenvolvimento de projetos IRSU em países em desenvolvimento. Há esforços para comercializar projetos IRSU de menor custo com padrão técnico básico em países de baixa renda, porém estas soluções são novas e não se sabe se estas plantas conseguirão atender plenamente as normas técnicas e de emissões a longo prazo. Modelos de baixo custo podem ser significativamente diferentes daqueles em países desenvolvidos, p. ex. omitindo sistemas técnicos importantes como bombas, tubulação, sistemas de controle eletrônicos, caldeiras secundárias ou sistemas de tratamento de gases de combustão. Outras opções de corte de custos de investimento podem ser a utilização de aço de menor qualidade para componentes da planta sujeitos a grandes cargas, como o forno ou a estrutura da planta.

Por conta disso, aumenta o risco de quebras inesperadas e maior tempo ocioso devido à falta de sistemas de apoio, enquanto componentes críticos podem sofrer com corrosão e levar à diminuição da vida útil operacional da planta. Isto pode aumentar significativamente os custos de operação e manutenção, bem como reduzir a taxa de utilização e receitas com venda de energia e resíduos tratados. O fornecimento contínuo de energia não será garantido (p. ex. fornecimento de vapor para indústria) e, na pior das hipóteses, a planta poderá tornar-se inoperante em poucos anos. Portanto, é fundamental avaliar de forma crítica a base financeira e de custos, bem como assegurar acordos contratuais claros e providenciar garantias que deixem claro quais atores devem suportar os riscos do projeto. A experiência também demonstra a necessidade de implementação em sistemas avançados de gestão de resíduos. Se a composição dos resíduos de entrada diferir daquela para a qual a planta foi projetada (p. ex. PCI inferior), os componentes da planta sofrerão desgaste e poderá ser difícil atender normas internacionais de emissões.



Vista externa (esquerda) e interna (direita) da grelha de incineração.

Custos de capital anuais: Os custos de capital anuais são calculados com base no investimento inicial, a taxa de juros estipulada para o investimento (p. ex. 6% ao ano) e a expectativa de vida útil das instalações (p. ex. 15-20 anos). Plantas grandes exigem um investimento inicial total mais alto em comparação com plantas menores, mas têm custos anuais por tonelada de resíduos tratados mais baixos devido à economia de escala. Este desenvolvimento de custos não tem uma relação direta com a quantidade de resíduos tratados. Uma segunda linha de forno tem custos somente 35% superiores a um forno simples. Se a planta IRSU fornecer energia e calor para a indústria, um segundo forno aumenta a segurança no fornecimento e reduz o tempo ocioso. Os investimentos também dependem da tecnologia de tratamento de gases de combustão e incineração utilizada, da quantidade de sistemas técnicos, da estrutura física das instalações e prédios, etc. Processos de aquecimento ou refrigeração distrital exigem investimentos adicionais mas aumentam a eficiência energética total da planta IRSU. Em muitos casos, os custos de terra não são levados em conta, uma vez que podemos assumir que os municípios poderão fornecer o terreno de graça. Isto pode levar a questões jurídicas e entraves financeiros se não for definido adequadamente desde o início.

Custos operacionais anuais: Os custos operacionais incluem principalmente os custos com pessoal, materiais auxiliares (p. ex. produtos químicos para tratamento do gás de combustão), manutenção e peças de reposição, seguros e impostos, energia elétrica, além dos custos para descarte dos resíduos como escória ou cinza em suspensão (em alguns casos a escória pode ser utilizada para construção viária). Possíveis custos adicionais incluem a manipulação de resíduos (p. ex. segregação de frações de resíduos indesejadas como material inerte). A coleta de resíduos não é abordada aqui, mas deverá ser organizada e financiada de forma a obter taxas de utilização altas. Os custos operacionais e investimentos específicos por tonelada de resíduos diminuem à medida que a capacidade da planta aumenta. Portanto a capacidade da planta seria preferencialmente acima de 100,000 toneladas por ano para otimizar a economia de escala juntamente com as distâncias médias de coleta.

Receitas: As receitas provenientes de venda de energia dependem dos preços da energia elétrica e do calor do processo, da eficiência da planta e do PCI dos resíduos. Outras receitas com materiais recuperados geralmente podem ser desconsideradas. Uma vez que estas receitas não serão suficientes, taxas adicionais ou subsídios são necessários para cobrir os custos totais.

Estimativa de custos de IRSU em países industrializados e emergentes – valores meramente indicativos						
Capacidade de Incineração: 150,000 t/a	Investimento Inicial	Custos de capital por ton. de resíduos	Custos de O&M por ton.	Custo total por ton.	Receitas com venda de energia por ton.	Custo a ser coberto por ton. de resíduos
Custo base na UE (instalação tecnicamente avançada, 2 linhas de forno)	135 – 185 milhões de EUR	80 – 115 EUR/t	180 EUR/t	260 – 295 EUR/t	60 EUR/t (calor e energia elétrica) 27 EUR/t (energia elétrica)	200 – 235 EUR/t
Custo base em países emergentes (instalação básica, 1 linha de forno)	30 – 75 milhões de EUR	22 – 55 EUR/t	20 – 35 EUR/t	42 – 90 EUR/t	2 – 10 EUR/t (energia elétrica)	40 – 80 EUR/t

Tabela 2: Exemplo de estimativas bases de custo individuais para IRSU em países industrializados e emergentes. Os custos são provenientes de uma IRSU Suíça de alto padrão técnico e foram ajustados para uma IRSU com instalações básicas para países emergentes.

P. ex. Custos de investimento são estimados em 20 – 40% dos custos suíços, manutenção e materiais auxiliares 20 – 50%, pessoal e descarte de escória 10 – 20% e custos com seguros em torno de 50%. Ambos modelos devem atender normas nacionais e internacionais de emissões. As diferenças principais são o projeto arquitetônico, o número de linhas de forno, o nível de automação e a qualidade dos materiais utilizados na planta. Dados usados para estimativas: taxa de utilização 100% com vida útil de 15 – 20 anos, taxa juros de 6% ao ano.

3.1.7 CONCLUSÕES E REQUISITOS

Em geral, a incineração só deve ser considerada uma opção viável onde for possível assegurar os aspectos a seguir:

- » Um sistema de gestão de resíduos eficiente em funcionamento há vários anos e a escassez de terras requer uma solução alternativa ao aterro para frações de resíduos onde reciclagem não é viável;
- » Existe base para um sistema de monitoramento ambiental adequado;
- » As normas de emissões e outras disposições ambientais são cumpridas;
- » Recursos financeiros para cobrir os custos adicionais em relação a aterro sanitário;
- » O fornecimento de combustível RSU deverá ser de no mínimo 100,000 t/ano;
- » O PDI deverá ser, em média, ao menos 7 MJ/kg e nunca abaixo de 6 MJ/kg;
- » A escória poderá ser utilizada para construção viária. Para o descarte seguro e ambientalmente saudável da cinza em suspensão, deverá haver um aterro seguro;
- » Pessoal capacitado poderá ser contratado e mantido;
- » Há um diálogo com a comunidade vizinha ao local proposto para a IRSU e seu interesses são levados em consideração desde o início do projeto. Comunicação transparente e diálogo adequado são essenciais.

3.2 Coprocessamento

Coprocessamento é a utilização de materiais derivados de resíduos para substituir recursos naturais minerais (reciclagem de materiais) e/ou combustíveis fósseis tradicionais como carvão, óleo combustível e gás natural (recuperação de energia) em processos industriais. O coprocessamento é aplicado principalmente na indústria de cimento e em usinas termelétricas no mundo todo. Em alguns casos também é aplicado na indústria de aço e cal. Em usinas termelétricas onde ocorre somente a recuperação de energia usa-se o termo *coincineração*. Na indústria de cimento europeia, a taxa de substituição térmica de combustíveis tradicionais por resíduos chega até 80% em determinadas instalações (média anual), enquanto a taxa de substituição média na UE é em torno de 39% [16]. Coprocessamento em usinas de cimento também tem se difundido amplamente como parte de sistemas de gestão de resíduos em diversos países emergentes ou em desenvolvimento. Entretanto, a parcela de RSU utilizada em coprocessamento ainda é baixa em comparação com fluxos de resíduos específicos como pneus usados, resíduos industriais perigosos, terra contaminada, resíduos de biomassa ou lodo de estações de tratamento de águas residuais.



3.2.1 DESCRIÇÃO DA TECNOLOGIA

Coprocessamento requer um fluxo de resíduos relativamente homogêneo com uma característica definida para assegurar a combustão controlada. Diversos processos de pré-tratamento (pré-processamento) estão disponíveis para transformar resíduos em combustível derivado de resíduos (CDR); os acrônimos AFR (*alternative fuel and raw materials*, matérias primas e combustíveis alternativos) e SRF (*solid recovery fuel*, combustível sólido recuperado) também são empregados. A Figura 6 apresenta um fluxograma de uma planta de Tratamento Mecânico Biológico (TMB), como exemplo de pré-processamento de resíduos sólidos urbanos em CDR.

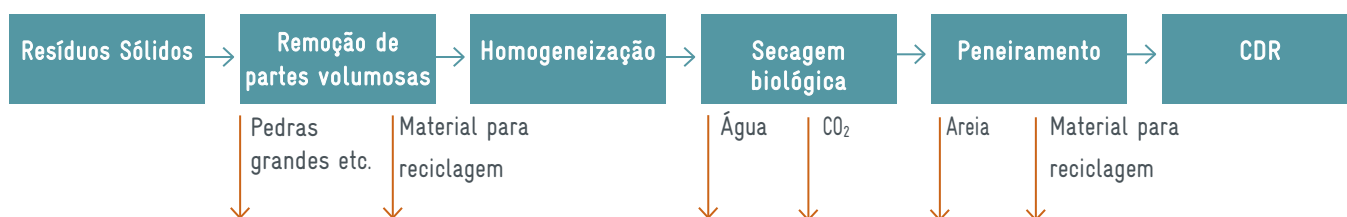


Figura 6: Fluxograma genérico de TMB para geração de CDR [17]

O CDR é alimentado para o processo de combustão através de um sistema de dosagem. O coprocessamento em fornos de cimento tem a vantagem de que a clinquerização a 1,450°C permite a incorporação total das cinzas e a ligação química dos metais ao material do clínquer. Os compostos orgânicos tóxicos são totalmente destruídos nas chamas com uma temperatura acima de 2,000°C. A substituição direta do combustível primário no processo produtivo representa uma recuperação de energia significativamente mais eficiente que em outras tecnologias WtE, atingindo 85 - 95%, a depender das características dos resíduos.

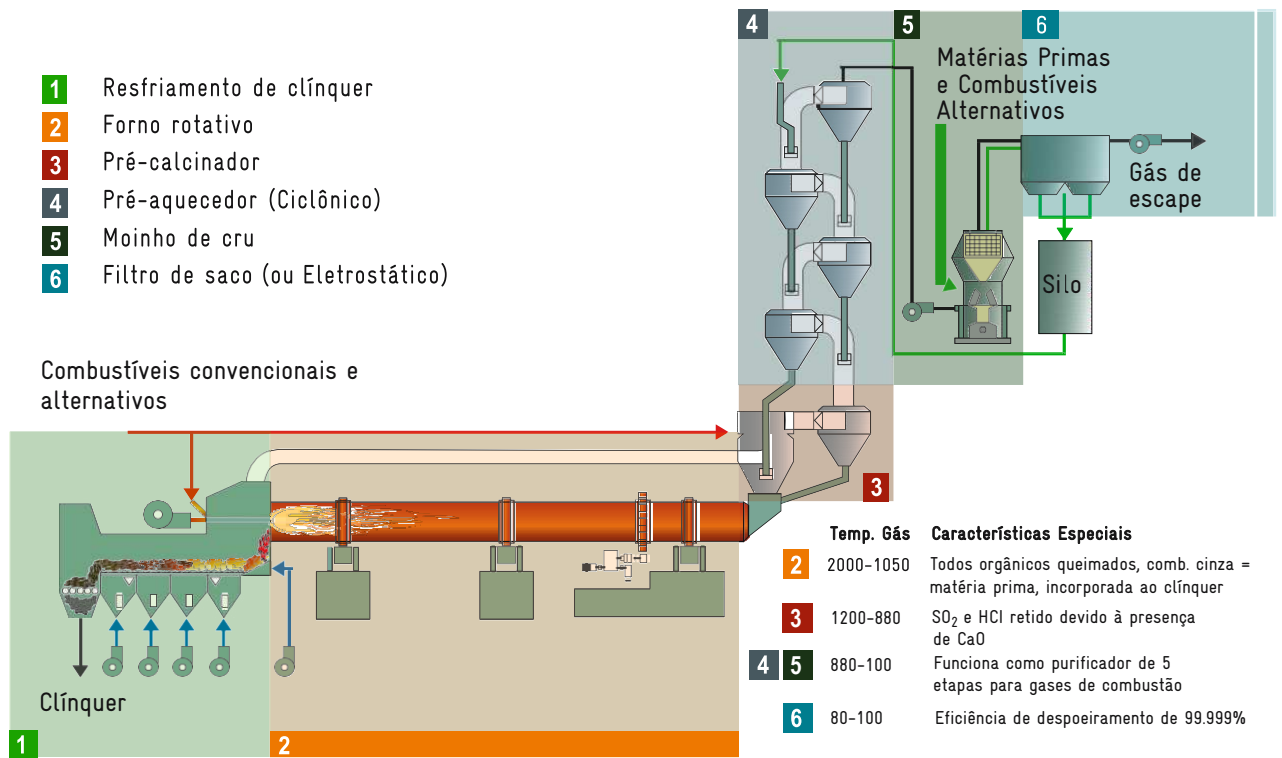


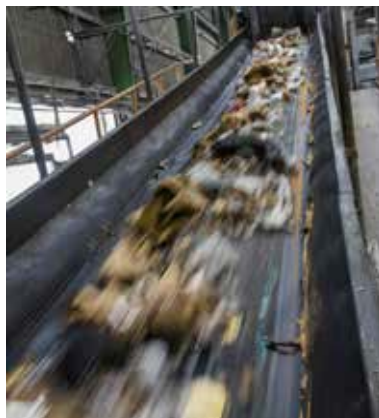
Figura 7: Componentes de um forno de cimento com pré-calcinador e suas características especiais

3.2.2 FRAÇÕES DE RESÍDUOS ADEQUADAS

A adequação de resíduos para coprocessamento depende das suas características e do tipo de indústria onde serão aplicados. CDR normalmente se refere à fração segregada de RSU, resíduos comerciais ou industriais, com alto poder calorífico. Um alto teor de cloro ou mercúrio nos resíduos poderá causar problemas operacionais, portanto resíduos de PVC, por exemplo, não são adequados para coprocessamento. Padrões de qualidade definem as características do CDR, como o teor de vestígios metálicos, cloro e enxofre. O poder calorífico do CDR em torno de 10 - 15 MJ/kg é desejável para operação economicamente viável [19].

3.2.3 ASPECTOS OPERACIONAIS

O uso seguro e responsável de resíduos requer uma escolha criteriosa dos pontos de alimentação no sistema de forno, bem como um amplo controle operacional de acordo com as características específicas dos resíduos e seus volumes. Sua aplicação não deverá interferir no funcionamento contínuo do forno, na qualidade do produto ou na performance ambiental da instalação. É necessário, portanto, assegurar estabilidade na qualidade dos resíduos e sua taxa de alimentação. Controles de entrega devem ser realizados com frequência em operações de rotina para pré-processamento de resíduos ou produção de CDR. A saúde e segurança operacionais devem ser bem desenvolvidas e deverá haver articulação frequente com autoridades ambientais, município, comunidades vizinhas e outros atores. Usinas de cimento costumam pertencer a grupos internacionais, que podem fornecer conhecimentos internos e especialistas para operação da planta. Para co-incineração em usinas termelétricas recomenda-se utilizar CDR com características e composição bem definidas.



3.2.4 ASPECTOS AMBIENTAIS

Através da recuperação de energia e materiais, o coprocessamento pode contribuir para a redução do impacto ambiental da produção de cimento, que tem um consumo intensivo de recursos e causa uma série de emissões atmosféricas que precisam ser monitoradas e mantidas abaixo dos limites legais através de técnicas apropriadas. As emissões potenciais de usinas de cimento incluem poeiras, óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO_2), bem como dioxinas e furanos, óxidos de carbono (CO , CO_2), compostos orgânicos voláteis, ácido clorídrico (HCl), ácido fluorídrico (HF) e metais pesados. Para garantir o coprocessamento ambientalmente seguro de CDR em usinas de cimento, os operadores devem cumprir determinados procedimentos descritos na Convenção de Basel (2012) [20], na WBSCD (2014) [21], ou GTZ/Holcim (2006) [18]. Ao utilizar CDR, as emissões devem ser menores ou iguais que sem o uso de CDR. Para tal, é obrigatório utilizar procedimentos e tecnologia de ponta como a alimentação direta do CDR nas zonas de alta temperatura do forno. O projeto de usinas de cimento modernas costuma estar em conformidade com os padrões internacionais. Quando isso for caso, os requisitos de atualização do controle de emissões são baixos. Além disso, a seleção de resíduos adequados, seu transporte e armazenamento, bem como a preparação do CDR são essenciais para minimizar o impacto ambiental. Os produtos finais de cimento devem ser testados por lixiviação de metais pesados antes de serem utilizados em edifícios, estradas ou outras construções.

3.2.5 ASPECTOS LEGAIS

Muitos países já implementaram um quadro jurídico para coprocessamento. A existência de regulação é um pré-requisito para a aplicação satisfatória de coprocessamento em usinas de cimento. As normas para coprocessamento devem fazer parte da legislação ambiental e de resíduos. Normas de emissões, especificações técnicas para coprocessamento e um processo de habilitação devem ser definidos. Devido à grande complexidade técnica do coprocessamento, a fiscalização efetiva e inspeções pelos órgãos públicos exige pessoal devidamente qualificado e equipado. Orientações adicionais sobre os requisitos jurídicos e o papel dos órgãos públicos poderão ser obtidas nos documentos supracitados, a Convenção de Basel (2012) [20] ou GTZ/Holcim (2006) [18].

3.2.6 ASPECTOS ECONÔMICOS

O objetivo principal quando um operador de usina de cimento investe em coprocessamento é a redução de custos com combustível e matéria prima. Isto significa que a decisão pelo investimento depende de preços de mercado voláteis de carvão, gás natural e matéria prima ou outros incentivos econômicos. Quanto mais alto o custo de combustível primário ou matéria prima, mais interessante será o investimento.

Os custos de pré-processamento, produção de CDR e coprocessamento são influenciados por:

- » Custos de planejamento e licenciamento do projeto;
- » Capacidade das instalações para manuseio de resíduos, preparação e dosagem de resíduos ao forno de cimento;
- » Medidas de saúde e segurança operacionais e controle de emissões;
- » Custos de capital, impostos, seguros;
- » Taxa de utilização da planta;
- » Peças de reposição, materiais auxiliares e de manutenção;
- » Análise laboratorial para determinar a composição dos resíduos e CDR;
- » Administração, pessoal, salários.

A Tabela 3 apresenta estimativas de custo para os itens principais dos coprocessamento.

Estimativa de custos para planta de coprocessamento de cimento em países em desenvolvimento - valores meramente indicativos						
Investimento Inicial	Custos de capital por ton. anual de resíduos	Custos de O&M por ton.	Custo total por ton.	Receitas* por ton.	Custo** por ton. de resíduos	Obs.
5 – 25 milhões de EUR incluindo pré-processamento	10 – 25 EUR/t	10 – 20 EUR/t	20 – 45 EUR/t	1 – 5 EUR/t	19 – 40 EUR/t	PDI 10 MJ/kg, pré-selecionado e capacidade de 50,000 t/a, 20 anos operação, tx. juros 6% ao ano

* Receitas na forma de substituição de combustíveis fósseis. Sem subsídios.

** Custos a serem cobertos por taxas adicionais, subsídios, etc.

Tabela 3: Exemplo de elementos de custo individuais para coprocessamento, derivados de experiências da parceria GIZ-Holcim

Os custos indicados dependem da situação local e é difícil tirar conclusões amplas a partir das informações disponíveis sobre requisitos financeiros, uma vez que estes diferem substancialmente e são baseados nos casos de negócios específicos de diferentes empresas. Os investimentos iniciais incluem o pré-processamento para gerar um CDR misturado homogêneo, a introdução de correias transportadoras e novas funções técnicas para permitir adicionar CDR ao processo de combustão, bem como espaço para armazenamento e medidas de segurança, p. ex. para reduzir o risco de incêndio. Usinas de cimento mais recentes podem exigir menos modificações se tiverem sido construídas considerando a possibilidade de coprocessamento. Um exemplo de projeto de coprocessamento para indústria de cimento, pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)³, estima um custo de investimento de 3 milhões de euros para uso de até 60,000 toneladas anuais de resíduos de fontes variadas substituindo aproximadamente 25% da entrada de energia primária. 50,000 toneladas (83%) dos resíduos são RSU. O projeto é baseado no custo de 45 euros por tonelada de RSU tratado [22]. Um dos maiores produtores mundiais de cimento estima que uma taxa adicional de 20 a 30 euros por tonelada de RSU é necessária para viabilizar os investimentos em instalações de pré-processamento e coprocessamento final em usinas de cimento.

³ O MDL ainda é um instrumento legal reconhecido internacionalmente, mas perdeu relevância devido a uma saturação de créditos de CO₂ no mercado global. Entretanto, estão surgindo novos planos para créditos de carbono a nível bi- ou multilateral (p. ex. Fundo Verde para o Clima) ou no mercado internacional (p. ex. ações de mitigação nacionalmente adequadas, NAMAs)

3.2.7 CONCLUSÕES

Muitos países emergentes e em desenvolvimento têm obtido experiências - em grande parte positivas - com o estado da arte de coprocessamento nos últimos 10 anos. É uma tecnologia WtE que já obteve ampla aceitação entre a comunidade empresarial e elaboradores de políticas. Apesar da sua aplicação atual estar focada especificamente nos resíduos industriais e perigosos de alto teor calórico, existem exemplos de sucesso para a fração não reciclável de resíduos sólidos urbanos. Distâncias acima de 200 km tornam a operação financeira e ambientalmente desinteressante. Outro fator limitador é o interesse econômico de combustíveis alternativos devido à volatilidade de preços e à baixa receita com taxas de eliminação de resíduos em muitos municípios em países emergentes ou em desenvolvimento.

3.3 Digestão Anaeróbia para Produção de Biogás

Digestão anaeróbia (DA) é a degradação de matéria orgânica por microrganismos sem a presença de oxigênio livre. A DA ocorre naturalmente em condições sem oxigênio, como em sedimentos de lagos, e de forma controlada pode ser utilizada para a produção de biogás. Neste caso, um reator estanque chamado de biodigestor anaeróbio é utilizado para oferecer as condições necessárias para que microrganismos tornem a matéria orgânica, a matéria prima, em biogás e em material digerido. Este material digerido pode ser utilizado como fertilizante orgânico quando a matéria prima for segregada na fonte e não contiver resíduos orgânicos contaminados. O biogás é uma mistura de diversos gases que podem ser convertidos em energia térmica ou elétrica. O principal portador de energia é o metano (CH_4), um gás inflamável que compõe de 50 - 75% do biogás, a depender do tipo de matéria prima e condições operacionais [23]. Devido ao teor de metano inferior, o poder calorífico do biogás é cerca de dois terços do de gás natural (5,5 a 75, kWh/m^3).

A DA em biodigestores de pequeno porte são tradicionais em países desenvolvidos para utilização do conteúdo energético dos resíduos orgânicos em contextos rurais. A matéria prima principal vem da agricultura, mais especificamente estrume animal, que é de fácil manuseio e bem adaptável em pequena escala. Em escala municipal, a DA vem despertando o interesse como possível opção para recuperação de energia de resíduos no contexto urbano. Entretanto, a operação segura de plantas de biogás a partir de RSU heterogêneo é um grande desafio em termos dos requisitos operacionais, de segurança e financeiros. Consequentemente, há poucos casos de sucesso de biogás a partir de RSU em países em desenvolvimento. Um dos principais desafios para a operação de DA em larga escala é assegurar o fornecimento regular da fração orgânica de resíduos bem segregados. Em muitos países, os resíduos orgânicos são misturados com matéria inorgânica como plásticos, metais e outros contaminantes que tendem a prejudicar o funcionamento da DA em larga escala. Ao contrário de outras plantas WtE, pode-se afirmar que plantas de biogás de pequena escala são uma boa opção e podem ser bem aplicadas em países em desenvolvimento.

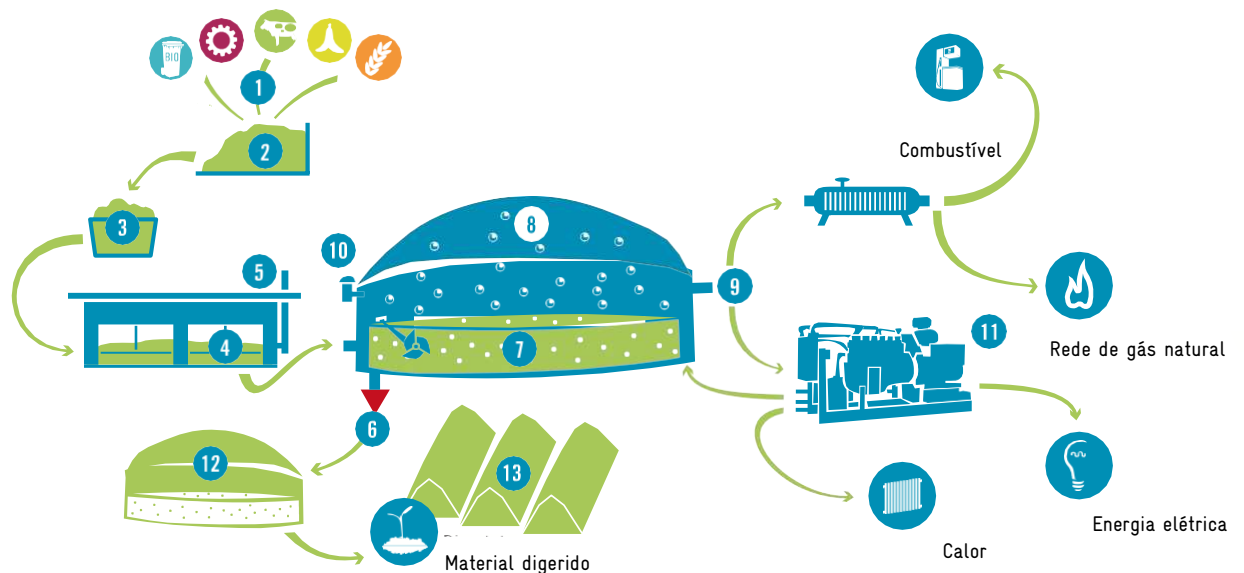


3.3.1 DESCRIÇÃO DA TECNOLOGIA

Mundialmente, existem diversos modelos de biodigestores anaeróbios de complexidade variada. Conforme [23], [24], a DA pode ser classificada quanto a:

- » **Frequência de operação:** Alimentação em batelada ou contínua
- » **Faixa de temperatura:** Condições psicrófilas, (< 25°C), mesofílicas (35-48°C) e termofílicas (>50°C), sendo que somente as duas últimas são consideradas economicamente viáveis. As condições termofílicas são recomendadas quando há risco de patógenos. Alternativamente, a pasteurização a 70°C por uma hora ou a compostagem termofílica podem ser usadas para neutralizar patógenos em sistemas mesofílicos.
- » **Tipo de biodigestor:** Biodigestores de fluxo contínuo são comuns para matéria prima líquida como resíduos alimentares ou águas residuais, ou lodo industrial de processamento de alimentos, enquanto biodigestores de batelada ou de fluxo não contínuo são usados para matéria prima sólida. Apesar disso, matéria prima sólida pode ser diluída para ser usada em biodigestores de fluxo contínuo.
- » **Número de estágios:** A digestão pode ser de um a múltiplos estágios.

O biogás pode ser utilizado diretamente para produzir calor, ou ser convertido em calor e energia elétrica por meio de uma unidade de cogeração de energia e calor após dessulfurização e secagem. Uma alternativa é purificar o biogás gerando biometano, com teor de metano de aproximadamente 98% e que pode ser usado como substituto do gás natural [23]. A Figura 8 demonstra o processo de produção do biogás através da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos e estrumes. O biogás gerado pode ser utilizado, por exemplo, para cogeração de energia e potência (CHP).



- | | |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 Matéria prima diversa | 8 Armazenamento de gás |
| 2 Recepção e armazenamento de resíduos | 9 Sistema de tratamento de gás |
| 3 Preparação da matéria prima, processamento, separação e higienização | 10 Equipamento de segurança (dispositivos de proteção contra pressão, válvulas de segurança, queimadores, etc.) |
| 4 Edifício fechado para preparação de resíduos putrescíveis | 11 Unidade de cogeração de energia e calor |
| 5 Biofiltro para reduzir odores e compostos orgânicos | 12 Armazenamento de material digerido |
| 6 Unidade de saneamento | 13 Tratamento de material digerido |
| 7 Biodigestor | |

Figura 8: Componentes e aplicação final de um biodigestor anaeróbio. Fonte da imagem: Fachverband Biogas [25].

3.3.2 FRAÇÕES DE RESÍDUOS ADEQUADAS

A DA é adequada somente para processamento de matéria orgânica, i.e., biomassa. O conteúdo de material fibroso como hemicelulose e lignina de palha e plantas lenhosas deverá ser relativamente baixo, uma vez que estas são digeridas lentamente através da DA. Além de utilizar biomassa de resíduos orgânicos como resíduos agrícolas ou frações orgânicas de RSU, é possível utilizar culturas energéticas como milho cultivadas especificamente para produção de biogás. Entretanto, isto pode levar a um conflito com a produção de alimentos e não é, portanto, o foco desta publicação, que trata da DA somente de matéria orgânica de resíduos urbanos. A inclusão de material inorgânico ou perigoso no processo não é desejável e poderá reduzir a degradação microbiológica, obstruir a operação p. ex. pelo entupimento de canos por plásticos, ou limitar a possibilidade de utilizar o material digerido como biofertilizante.

Resíduos urbanos orgânicos separados na fonte, como resíduos domésticos, de mercado ou de jardins podem ser considerados matéria prima adequada para DA. Além disso, a codigestão com resíduos agrícolas, lodo de estações de tratamento de águas residuais ou resíduos orgânicos industriais ou comerciais podem aumentar a disponibilidade de matéria prima e, portanto, a viabilidade econômica. O uso de resíduos biológicos domésticos é mais sofisticado que o uso de outras matérias primas como culturas energéticas, resíduos industriais ou comerciais, ou derivados animais ou vegetais [26]. Isto se deve à variação da composição da matéria prima ao longo do ano e à possibilidade de grande quantidade impurezas. O rendimento de metano e energia de DA varia consideravelmente a depender da matéria prima (valores indicativos na Tabela 4).

Matéria prima	Rendimento de metano [Nm ³ CH ₄ per t _{úmido}]	Rendimento energético [MJ per t _{úmido}]
Urbana		
Águas residuais	15	570
Resíduos de cozinha ou jardim	40-100	1,510-3,780
Industrial		
Resíduos de frutas	60	2,270
Resíduos de matadouros	50	1,890
Agrícola		
Estrume de gado	32	1,210
Pasto	90	3,400

Tabela 4: Valores indicativos de rendimento de metano e energético de diversos tipos de matéria prima em DA (adaptado de [23] e [27]) com rendimento de metano em m³ (Nm³, a 0°C, 1.01325 bar e humidade relativa de 0%) por tonelada (t) de matéria prima e 37,8 MJ por Nm³ CH₄ (poder calorífico superior).

3.3.3 ASPECTOS OPERACIONAIS

Aspectos operacionais importantes incluem:

- » **Disponibilidade e composição da matéria prima orgânica:** A composição e quantidade de resíduos orgânicos pode variar significativamente ao longo do ano, principalmente por conta da disponibilidade de produtos agrícolas e seus resíduos. Isto deve ser levado em consideração ao planejar um biodigestor anaeróbio e deverá incluir o dimensionamento e a possibilidade de armazenamento de matéria prima quando a oferta for superior à capacidade da planta.
- » **Temperatura:** O crescimento e reprodução de microrganismos é maior em temperaturas mais altas, desde que não haja outros fatores limitantes. Na maioria dos casos, a faixa de mesofílica, entre 35-48°C, é considerada a mais estável. A operação com temperatura mais alta, na faixa termofílica > 50°C pode eliminar patógenos e auxiliar a diminuir o volume do reator, mas geralmente requer aquecimento e isolamento. Em climas mais frios, a DA psicofílica é utilizada com sucesso em digestores de pequena escala (p. ex. [24]), entretanto pode não ser economicamente viável para digestores de grande escala devido à necessidade de aquecimento e isolamento.

» **Taxa de carregamento orgânico (TCO):** A TCO indica a quantidade de matéria prima que um biodigestor pode digerir por unidade de tempo.

» **Relação carbono / nitrogênio (C:N):** A relativa abundância de carbono e nitrogênio é um parâmetro essencial para o crescimento microbial e deve estar na faixa de 12-25 para biodigestores anaeróbios.

3.3.4 ASPECTOS AMBIENTAIS

A conversão de resíduos orgânicos em biogás poder trazer uma série de benefícios ambientais. O biogás geralmente substitui outra forma de energia, em muitos casos um combustível fóssil ou madeira. Quando um combustível fóssil é substituído, o biogás de resíduos orgânicos reduz a emissão adicional de gases de efeito estufa para a atmosfera, uma vez que o carbono contido na biomassa é derivado do CO₂ atmosférico. Ao substituir a lenha, como é o caso em muitas residências rurais, o uso do biogás pode reduzir o desmatamento para coleta de lenha. Material digerido usado como fertilizante orgânico poderá substituir fertilizantes minerais intensivos em energia. Entretanto, o uso do material digerido como biofertilizante depende da qualidade da matéria prima, sem contaminação de metais ou patógenos, por exemplo.

Um possível perigo ambiental é o vazamento de biogás em biodigestores operados de forma inadequada. Uma vez que o potencial de aquecimento global do metano é aproximadamente 21 vezes maior que o do CO₂, quaisquer vazamentos devem ser evitados e a operação correta deve ser assegurada. O vazamento de material digerido para corpos d'água também deve ser evitado para não prejudicar ecossistemas locais.

3.3.5 ASPECTOS LEGAIS

A DA é amplamente utilizada em pequena escala em muitos países em desenvolvimento e normalmente pode ser incorporada a quadros políticos e jurídicos nacionais. Entretanto, a implementação de DA de grande escala em contextos urbanos requer regulamentação suplementar incluindo normas de segurança e considerações sobre odores. Infelizmente, tal regulamentação é pouco comum e/ou fiscalizada em países em desenvolvimento, o que poderá interferir negativamente na implementação imediata desta tecnologia WtE. Deverá haver, também, regulamentação para estabelecer padrões mínimos de qualidade do material digerido para evitar riscos no uso agrícola. Para diretrizes sobre aspectos de segurança do biogás veja a publicação: Biogas Safety First!, disponível em www.biogas-safety.com.



Resíduos orgânicos devem ser bem separados na fonte.



Queimadores liberam o excesso de pressão de forma segura.

3.3.6 ASPECTOS ECONÔMICOS

A receitas com DA dependem muito da qualidade da matéria prima. Contaminação com substâncias inorgânicas aumenta os custos de separação e diminui os possíveis benefícios do uso do material digerido como fertilizante agrícola. O uso direto do biogás requer investimentos adicionais mínimos. Com novos investimentos o biogás pode ser purificado, transformando-o em biometano, ou convertido em energia e calor. A Tabela 5 traz um exemplo dos elementos de custo da digestão anaeróbia de RSU pré-selecionado com capacidade entre 50,000 e 150,000 toneladas anuais de resíduos orgânicos. Os dados foram extraídos de [28] e [29], e ajustados às condições de países em desenvolvimento (salários mais baixos). O custo líquido estimado entre 14 e 18 euros por tonelada de resíduos orgânicos indica que o custo global não poderá ser coberto somente pela venda de energia.

Estimativa de custo de uma planta de digestão anaeróbia em países em desenvolvimento - valores meramente indicativos						
Investimento Inicial	Custos de capital anuais por ton. de resíduos	Custos de O&M por ton.	Custo total por ton.	Receita* por ton.	Custo** por ton. de resíduos	Observações
12 – 20 milhões de EUR	12 – 19 EUR/t	10 – 15 EUR/t	22 – 34 EUR/t	8 – 16 EUR/t	14 – 18 EUR/t	capacidade 50,000 – 150,000 t/a, 20 anos operação, tx. juros 6% ao ano

* Receitas na forma de substituição de combustíveis fósseis. Sem subsídios.

** Custos a serem cobertos por taxas adicionais, subsídios, etc.

Tabela 5: Exemplo dos elementos de custos de digestão anaeróbia derivados de [28] e [29], ajustados para as condições de países em desenvolvimento.

Os benefícios da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos podem decorrer do uso do biogás como fonte de energia e do material digerido como fertilizante. Benefícios com produção de biogás dependem principalmente do custo da energia que será substituída. A possibilidade de usar material digerido como fertilizante e seu valor monetário dependem, entre outras coisas, da qualidade da matéria prima, da demanda local ou regional, e da aceitação por parte de agricultores [24]. Os benefícios indiretos são a redução significativa de material a ser depositado em aterros sanitários, especialmente em países em desenvolvimento.

3.3.7 CONCLUSÃO

A fração de resíduos orgânicos dos RSU em países em desenvolvimento costuma ser bem maior do que em países industrializados e resíduos agrícolas costumam estar disponíveis para uso como co-substrato. Além disso, muitos países em desenvolvimento têm clima quente, o que torna a DA particularmente interessante.

As práticas atuais de gestão de resíduos, em especial a falta de separação na fonte, prejudicam a adoção e operação estável da tecnologia de DA. O quadro jurídico requer atenção especial em termos de normas de segurança, principalmente no contexto urbano. Por ser considerada uma solução de baixa tecnologia, os requisitos operacionais e de recursos humanos são muitas vezes subestimados, levando a falhas na operação, rendimento abaixo do previsto e material digerido com qualidade inferior para aplicação agrícola. Por último, as receitas financeiras com biogás (energia elétrica, calor ou biometano) e com produção de material digerido a partir de resíduos orgânicos não deve superar os custos de produção quando os custos de investimento são levados em conta, especialmente sem uma tarifa de injeção específica para a venda de energia elétrica ou biometano à rede. Se for integrada ao planejamento da gestão de RSU, que inclua a segregação residencial de resíduos, a DA poderá complementar outras tecnologias e práticas de GRSU.

3.4 Captação de Gás de Aterro

A captação de gás de aterro (GA) representa um tipo de tecnologia WtE diferente das demais apresentadas neste guia. Dever ser visto como componente essencial para mitigar parcialmente o impacto ambiental negativo dos aterros sanitários (AS). Os aterros sanitários são uma prática adotada e aceita internacionalmente em países em desenvolvimento e muitas vezes são a única opção para tratar e descartar de forma controlada os resíduos coletados. Apesar de ser um avanço em relação ao descarte descontrolado e despejo de resíduos a céu aberto, os aterros sanitários têm impacto ambiental de longo prazo, como a emissão atmosférica de gás metano com alto potencial de aquecimento global. Outros impactos incluem a perda de valiosos recursos de terra, bem como a presença de compostos odoríferos e tóxicos. O metano do GA é formado pela digestão anaeróbia da matéria orgânica no aterro, que poderia ser visto como um enorme biodigestor. Para reduzir as emissões dos gases de efeito estufa, é essencial captar o gás metano. Isto é possível através da captação do GA, entretanto podem ocorrer perdas significativas durante a fase inicial de um aterro, antes da instalação e entrada em operação do sistema de captação de metano. Mesmo em operação plena, não é possível extrair todo o gás emitido pelo aterro. Mais de 200 projetos de captação de GA já foram implementados sob o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Kyoto para mitigação das emissões dos gases de efeito estufa [30].



3.4.1 DESCRIÇÃO DA TECNOLOGIA

O GA é composto por 45 - 55% de gás metano, sendo apropriado para uso como combustível para geração de calor ou energia, cogeração de calor e energia ou combustível para transportes. O restante é principalmente CO₂. O rendimento do GA depende de diversos fatores:

- » Composição dos resíduos;
- » A forma de colocação e compactação de resíduos novos;
- » Nível de compactação e altura das camadas individuais;
- » Teor de umidade no aterro;
- » Clima;
- » Características técnicas para captação de gás metano no AS.

Uma análise da captação de GA na Tailândia demonstrou que em diversos aterros, a produção de GA aumenta de 1,9 a 5,5 vezes na estação chuvosa em relação à estação seca [31].

Diversas tecnologias para captação de GA estão disponíveis e podem ser acrescentadas a AS em operação ou fechados. Todas captam GA a partir dos resíduos enquanto evitam a penetração de água e ar no sistema. Para captar o GA, tubos perfurados são instalados nos resíduos. Estes tubos podem ser instalados verticalmente ou horizontalmente. O gás entra na tubulação e é transferido para um sistema de purificação para retirada do gás sulfídrico. Após a purificação, o gás pode ser utilizado (veja Figura 9).

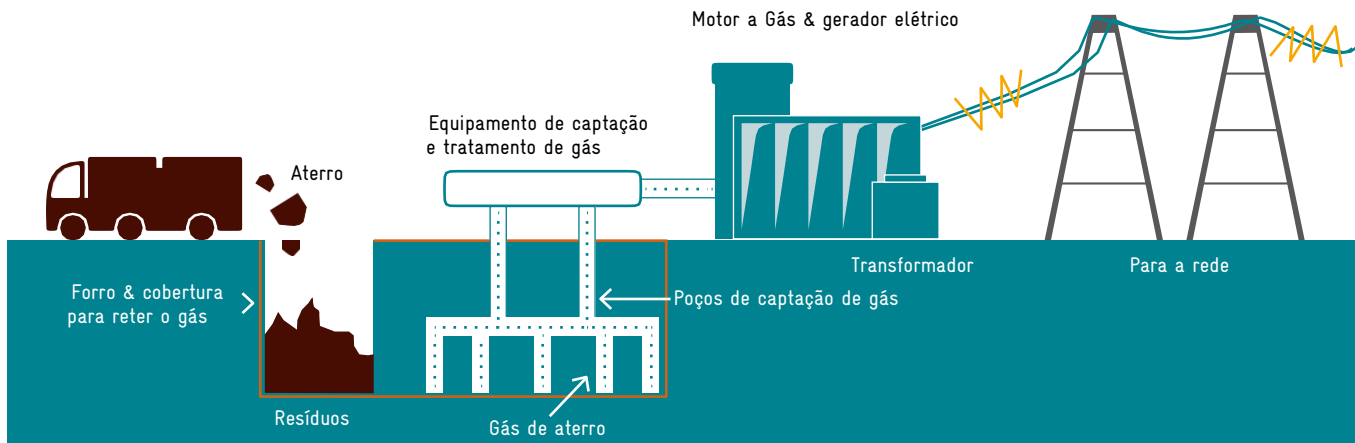


Figura 9: Componentes de um sistema de captação de gás de aterro com produção de energia elétrica [32].

3.4.2 FRAÇÕES DE RESÍDUOS ADEQUADAS

Projetos de captação de GA exigem um alto teor de resíduos orgânicos reativos no aterro. Um alto teor de resíduos minerais ou de orgânicos de digestão lenta (p. ex. madeira) reduzem o rendimento.

3.4.3 ASPECTOS OPERACIONAIS

Operadores de aterros devem assegurar que não há risco de fuga de gás pela superfície inferior do aterro ou de acúmulo ao redor do aterro de forma que possa se tornar explosivo ou causar asfixia. Devem garantir que a captação, tratamento e utilização do GA minimize a liberação de gases. Deve-se realizar verificações anuais do sistema de captação de gás para avaliar a eficiência do sistema.

3.4.4 ASPECTOS AMBIENTAIS

A captação de combustão de metano de GA contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e outras emissões tóxicas. Quando o GA for utilizado para substituir combustíveis fósseis como carvão ou óleo no processo de combustão ou como alternativa ao óleo diesel em transportes, contribui para melhorar a qualidade do ar. Entretanto, experiências internacionais demonstram algumas desvantagens do GA além dos riscos existentes em aterros sanitários:

- » A produção teórica de gás e a captação efetiva de gás não coincidem. Em muitos casos, o rendimento efetivo de gás é bem abaixo das expectativas, o que significa que parte do metano escapa para o meio ambiente. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos estima uma eficiência de captação de 60 a 85% [33]. Entretanto, muitos AS em países em desenvolvimento alcançam uma eficiência de captação abaixo de 50% devido a padrões técnicos deficientes e limitações de custos. Ao comparar a quantidade de gás captado com o total de gás emitido por um AS ao longo de toda a sua vida útil, a taxa de eficiência cai para menos de 20-30%.
- » O GA é gerado por um período de 30 - 50 anos, um período além do tempo de operação de um AS, portanto surge a questão de quem irá operar e manter o sistema de coleta de gás.
- » Vazamentos no sistema de GA são um risco de segurança, uma vez que a fuga de gás poderá acumular em edifícios próximos e causar explosões.

3.4.5 ASPECTOS LEGAIS

Na maioria dos casos, não há legislação específica para captação de gás de aterro. As condições legais que apoiam seu desenvolvimento encontram-se na legislação ambiental sobre o planejamento e operação de aterros sanitários.

3.4.6 ASPECTOS ECONÔMICOS

Foram realizados muitos projetos de captação de GA com geração de energia em países em desenvolvimento sob o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Sem a receita adicional das reduções certificadas de emissões de CO₂, muitos projetos de GA provavelmente não teriam sido implementados por razões econômicas. A Tabela 6 apresenta uma estimativa de custos para captação de GA baseada em dados de projetos do MDL no Brasil [34] e na China [35]. Os custos dependem fortemente da topografia e plano do AS. As estimativas não incluem os custos de construção e operação do AS propriamente dito.

Estimativa de custos de captação de gás de aterros sanitários em projetos de MDL no Brasil e na China						
Investimento Inicial	Custos de capital anuais por ton. de resíduos	Custos de O&M por ton.	Custo total por ton.	Receita* por ton.	Custo por ton. de resíduos	Observações
6 milhões EUR (MDL-Brasil)	0.8 EUR/t	0.8 EUR/t	1.6 EUR/t	2.4 EUR/t	- 0.8 EUR/t	Capacidade aprox. 390,000 - 850,000 t/a,
5.3 milhões EUR (MDL-China)	1.4 EUR/t	0.3 EUR/t	1.7 EUR/t	3.4 EUR/t	- 1.7 EUR/t	20 anos operação, tx. juros 6% e 8% ao ano

* Com a venda de gás/energia, incluindo receitas de créditos do MDL dos respectivos projetos

Tabela 6: Exemplo comparativo de elementos de custo de projetos de captação de GA com geração de energia em projetos do MDL no Brasil [34] e na China [35]. Em cada caso, os custos de investimento são para uma planta completa com geradores. Não incluem os custos de construção e operação do AS.

3.4.7 CONCLUSÕES

A captação de GA não é a razão principal para operação de um aterro sanitário, mas o GA deve ser considerado como um subproduto da operação de um AS. Sabe-se que AS têm diversas desvantagens, como a contaminação de águas subterrâneas e do ar, a geração de lixiviado para ser tratado e fortes odores. Portanto, o gás de aterro não deve ser considerado como uma tecnologia WtE primária, mas como uma tarefa compulsória para aquelas cidades que operam AS por não ter outras alternativas. A captação de GA é vista como uma oportunidade para aterros existentes ao invés de novos projetos WtE. Ela poderá mitigar parte do impacto ambiental de AS, entretanto a baixa eficiência de captura de gás ao longo da sua vida útil demonstra a dificuldade de mitigar o impacto ambiental dos AS.

3.5 Tecnologias Alternativas: Pirólise e Gaseificação

Nos últimos 40 anos, o desenvolvimento das chamadas “Tecnologias Alternativas” (AT) para o tratamento térmico de resíduos ocorreu em duas etapas. A primeira etapa, nos anos 1970 e 1980, foi caracterizada por grande motivação e potencial de inovação para desenvolver uma tecnologia de tratamento de resíduos abrangente e eficiente, com geração máxima de produtos do processo e com o menor impacto ambiental possível. A segunda etapa, em meados dos anos 1990, foi dominada por estratégias de marketing. Gaseificação e pirólise, e mais tarde a pirólise a plasma, eram consideradas alternativas técnica e financeiramente viáveis para a incineração de resíduos e foram apontadas como sendo uma tecnologia não poluente, em comparação à incineração. Atualmente, não há nenhuma planta de tratamento de RSU em operação em larga escala na Europa, África ou na América Latina, e as poucas plantas na Ásia (principalmente no Japão) e nos EUA operam como parte integrante de sistemas complexos de GRSU ou em fluxos específicos de resíduos. A tecnologia avançada e os requisitos operacionais, a necessidade de uma fração de resíduos muito específica e o alto custo de capital inicial tornam esta tecnologia difícil de aplicar em escala.

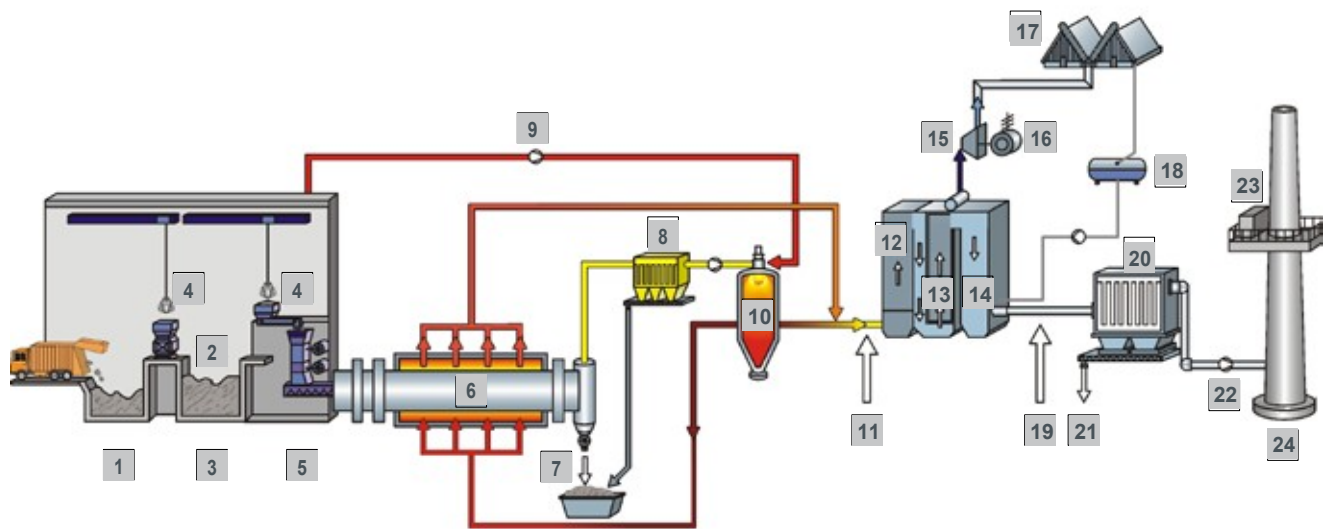
Como a incineração de resíduos, o objetivo da AT é tratar resíduos para reduzir o volume e os riscos, enquanto capta (e, portanto, concentra) ou destrói as substâncias potencialmente perigosas. O processo também oferece meios para recuperar energia ou conteúdo mineral e/ou químico dos resíduos na forma de produtos reciclados como gás de síntese, óleo, carvão ou coque (veja Figura 10).

3.5.1 DESCRIÇÃO DA TECNOLGIA

A pirólise/gaseificação é a decomposição de resíduos em ambiente com pouco ou nenhum oxigênio, gerando gás de pirólise e coque sólido. Os valores de poder calorífico estão entre 5 e 15 MJ/m³, com base em resíduos urbanos. Num sentido mais amplo, “pirólise” é um termo genérico que engloba uma série de tecnologias diferentes que geralmente compreendem as seguintes etapas tecnológicas:

- » **Processo de secagem:** Formação de gás a partir das partículas voláteis dos resíduos entre 400 e 600°C
- » **Pirólise:** Decomposição térmica das moléculas orgânicas dos resíduos entre 500 e 800°C, levando à formação de gás e de uma fração sólida
- » **Gaseificação:** Conversão da parcela de carbono restante em coque de pirólise entre 800 e 1,000°C, com ajuda de uma substância de gaseificação (p. ex. ar ou vapor)
- » **Incineração:** A depender da combinação de tecnologias, o gás e o coque são queimados na câmara de combustão.





- | | | |
|---------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1 Silo de resíduos brutos | 9 Ventilador de ar de combustão | 17 Condensador |
| 2 Triturador rotativo | 10 Câmara de combustão | 18 Tanque de água de alimentação |
| 3 Silo de resíduos finos | 11 Redução seletiva não catalítica | 19 Dosador de aditivos |
| 4 Ponte rolante | 12 Evaporador | 20 Filtro fibroso |
| 5 Sistema de alimentação | 13 Superaquecedor | 21 Descarga de pó do filtro |
| 6 Forno de pirólise | 14 Economizador | 22 Ventilador de tiragem induzida |
| 7 Sistema de descarga | 15 Turbina | 23 Sistema de controle de emissões |
| 8 Filtro de gás aquecido | 16 Gerador | 24 Chaminé |

Figura 10: Componentes de uma planta de pirólise para tratamento de resíduos sólidos específicos [36]

Outros processos foram desenvolvidos com base na dissociação das fases que também ocorrem no incinerador: secagem, vaporização, pirólise, carbonização e oxidação dos resíduos. Alguns destes avanços encontraram problemas técnicos e econômicos ao serem dimensionados para a escala comercial, e, portanto, deixaram de ser desenvolvidos. Alguns são utilizados para fins comerciais (p. ex. no Japão) e outros estão sendo testados em plantas de demonstração por toda a Europa, mas ainda têm uma capacidade de tratamento muito pequena quando comparados com incineração e só podem ser utilizados em alguns tipos específicos de resíduos.

3.5.2 FRAÇÕES DE RESÍDUOS ADEQUADAS

Não há experiências exitosas com o tratamento de grandes volumes de RSU misturado devido à sua composição heterogênea. Por isso, a pirólise poderá ser uma opção para o tratamento final de fluxos específicos de resíduos como solo contaminado, resíduos clínicos ou resíduos industriais ou comerciais perigosos. Não é recomendada para resíduos urbanos misturados ou para ambientes que exigem uma tecnologia robusta e comprovada.

3.5.3 ASPECTOS OPERACIONAIS

Pirólise ou gaseificação não devem ser consideradas tecnologias isoladas de fácil utilização, devem ser parte integrante de um sistema global de gestão de resíduos. Sua operação requer um bom conhecimento da composição dos resíduos e uma boa compreensão do processo. A experiência comprova que a operação regular de uma usina de pirólise requer técnicos altamente capacitados.

3.5.4 ASPECTOS AMBIENTAIS

As potenciais vantagens dos processos de pirólise podem incluir:

- » Recuperação do valor material da fração orgânica, p. ex. como metanol;
- » Aumento da geração de energia usando motores ou turbinas a gás;
- » Redução de volume de gases de combustão;
- » Produção de carvão ou coque, que poderá ser usado como combustível em usinas de cimento ou de energia.

3.5.5 ASPECTOS LEGAIS

Deve-se assumir que a legislação ambiental da maioria dos países em desenvolvimento não lida com a aplicação de pirólise ou gaseificação com tecnologia de combustão (ou WtE). Isto torna todo o processo de avaliação de impacto e licenciamento ambiental bastante complicado e moroso, se não impossível.

3.5.6 ASPECTOS ECONÔMICOS

Devido aos altos custos de operação e manutenção, a economia de AT só deve ser considerada viável quando os produtos do processo (gás, coque) tiverem um bom valor de mercado. Isto depende muito das condições de mercado e da existência de um consumidor final (p. ex. uma usina de cimento) próximo à planta de AT. Experiências ao longo dos últimos 40 anos comprovam que além dos desafios técnicos, empresas de pirólise e gaseificação precisam lidar com desafios econômicos que muitas vezes levaram ao encerramento das atividades, uma vez que não foi possível obter a receita necessária para cobrir os custos. Em comparação com todas as outras tecnologias WtE apresentadas neste Guia, pirólise e gaseificação são as mais caras. A Tabela 7 apresenta uma estimativa de custos para uma planta de tecnologias alternativas com entrada de resíduos de 150,000 - 200,000 toneladas anuais.

Estimativa de custos de uma planta de pirólise/gaseificação em países em desenvolvimento - valores somente indicativos						
Investimento Inicial	Custos de capital por ton. de resíduos	Custos de O&M por ton.	Custo total por ton.	Receita* por ton.	Custo** por ton. de resíduos	Observações
80 - 120 milhões EUR	35 - 45 EUR/t	30 - 40 EUR/t	65 - 85 EUR/t	2 - 5 EUR/t	63 - 80 EUR/t	Cap. 250,000 t/a 20 anos operação, tx. juros 6% ao ano

* Com a venda de produtos finais

** Custos a serem cobertos por taxas adicionais, subsídios, etc.

Tabela 7: Exemplo comparativo de elementos de custo de uma planta de pirólise na Alemanha [37].

3.5.7 CONCLUSÃO

Conceitos de gestão de resíduos orientados para o futuro devem atender a necessidades econômicas e ambientais. Neste contexto, a pirólise ou gaseificação de frações de alto poder calorífico pode oferecer uma solução técnica alternativa para complementar usinas de energia e fornos industriais, desde que utilizada em resíduos selecionados de alto poder calorífico ou resíduos de combustível. A abordagem técnica representa uma possível opção em um sistema de gestão de resíduos totalmente organizado.

Entretanto, na maioria, senão todos, os países em desenvolvimento, as condições municipais existentes não justificam a aplicação de pirólise ou gaseificação. Além disso, os altos custos iniciais e operacionais não justificam a experimentação de uma tecnologia de nicho em frações muito seletivas, raramente encontradas nos resíduos urbanos.

4 MATRIZ DE APOIO PARA TOMADA DE DECISÃO

4.1 Objetivo

Qualquer projeto de WtE é uma tarefa complexa que deve ser acompanhada de uma avaliação de viabilidade rigorosa e profissional. A matriz de decisão apresentada neste capítulo visa auxiliar no mapeamento inicial da adequação de potenciais tecnologias a contextos específicos e os diversos aspectos que tomadores de decisão devem ponderar durante conversas com fornecedores de tecnologia. Este capítulo sintetiza as condições de enquadramento geral para cada uma das cinco tecnologias discutidas no guia. Esta matriz tem três objetivos:

- Oferecer um panorama dos requisitos para construção e operação da tecnologia WtE;
- Comparar a adequação das cinco tecnologias WtE apresentadas em diferentes condições estruturais;
- Fornecer uma orientação inicial da aplicabilidade de uma determinada tecnologia WtE, se serão necessárias outras melhorias no sistema global de gestão de resíduos ou se a tecnologia WtE não se aplica.

A matriz é composta por 12 parâmetros essenciais a serem analisados no contexto local para avançar com um projeto de WtE, nomeadamente:

1. **Nível global de gestão de resíduos**
2. **Composição dos resíduos**
3. **Poder calorífico dos RSU para processos térmicos, teor orgânico**
4. **Quantidade de resíduos adequada para WtE**
5. **Operação eficiente das instalações de gestão de resíduos**
6. **Tempo de transporte dos RSU e distância adicional até a planta WtE**
7. **Comercialização e/ou descarte final dos resíduos do processo**
8. **Quadro jurídico e requisitos ambientais para WtE**
9. **Financiamento da gestão de RSU**
10. **Acesso a moeda estrangeira**
11. **Acesso a usuários finais de energia de WtE ou CDR**
12. **Incentivos para geração de energia de baixo carbono**

Estes parâmetros são parcialmente extraídos do guia de tomadores de decisão do Banco Mundial [15] e adaptados para atender as demandas deste guia. Cada parâmetro é descrito com mais detalhes no Anexo A.

COMO USAR A MATRIZ DE DECISÃO

Para cada um dos parâmetros listados acima, o leitor deverá avaliar suas condições locais de acordo com as opções oferecidas horizontalmente da esquerda (muito desenvolvida) para a direita (pouco desenvolvida) na matriz. O potencial de cada uma das cinco tecnologias WtE é apresentada numa cor diferente para cada faixa horizontal de condições locais:

VERDE	AMARELO	VERMELHO
provavelmente, a tecnologia WtE é adequada.	mais informações e/ou melhorias nas condições local podem ser exigidas para o planejamento e implementação de um projeto WtE com sucesso.	a tecnologia não é adequada. Recomenda-se fortemente melhorar ou modificar as condições locais específicas.

Após avaliar os **doze parâmetros**, o leitor terá um panorama da adequação de cada uma das tecnologias para suas condições locais. Como indicação, podemos interpretar a quantidade de campos vermelhos, amarelos e verdes para cada tecnologia WtE da seguinte forma:

Totais de matriz	A tecnologia é adequada para o meu contexto?
<ul style="list-style-type: none">• Nove ou mais campos verdes• 0 restante amarelo	A princípio, a tecnologia parece ser adequada. Entretanto, os parâmetros em amarelo devem ser investigados mais detalhadamente e melhorias devem ser iniciadas.
<ul style="list-style-type: none">• Menos de nove campos verdes• 0 restante amarelo	A tecnologia poderá ser adequada, mas as condições atuais não são propícias à sua aplicação. Tomadores de decisão devem avaliar as condições mais detalhadamente antes de iniciar um projeto de WtE ou focar numa tecnologia que tenha mais campos verdes.
<ul style="list-style-type: none">• Um ou mais campos vermelhos	CRITÉRIO IMPEDITIVO: há deficiências graves que impedem a aplicação desta tecnologia. Todas as condições marcadas em vermelho devem ser melhoradas antes de iniciar um projeto com respectiva tecnologia ou escolha uma tecnologia que apresente somente campos amarelos e verdes.

A aplicação da matriz permite a realização de uma primeira avaliação transparente das opções de WtE para o futuro próximo. Ela fornece um panorama dos pré-requisitos que devem ser cumpridos na região alvo do projeto de WtE e das lacunas de informação para uma análise mais abrangente. Para obter mais detalhes sobre cada parâmetro e seus diferentes valores, por favor consulte o Anexo A.

4.2 Matriz para tomadores de decisão

1. Nível global de gestão de resíduos

1	Sistema avançado de gestão de resíduos baseado em fluxos de resíduos (p. ex. biomassa, resíduos perigos, recicláveis) existente.	A coleta sistemática de resíduos é organizada. Algumas frações de resíduos (p. ex. pneus, recicláveis, biomassa) são direcionadas para reciclagem e compostagem.	Há coleta sistemática de resíduos e descarte em aterro. Não há reciclagem sistemática organizada.	Ausência de coleta, reciclagem e descarte sistemático de resíduos.
	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

2. Composição dos resíduos

2	Frações orgânicas e não orgânicas são coletadas separadamente. Resíduos volumosos ou perigosos são tratados separadamente.	RSU ou frações coletadas separadamente são ocasionalmente misturadas com pequenas frações de resíduos minerais ou perigosos	RSU costuma ser misturado com frações minerais ou resíduos perigosos	RSU é misturado com grandes quantidades de resíduos minerais e perigosos
	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

3. Poder calorífico dos RSU para processos térmicos, teor orgânico

3	O poder calorífico médio dos RSU é > 8 MJ/kg.	O poder calorífico médio está entre 7 e 8 MJ/kg.	O poder calorífico dos RSU é < 7 MJ/kg. Alto teor de biomassa com alto teor de umidade.	O poder calorífico dos RSU é < 7 MJ/kg. A proporção de frações inorgânicas (p. ex. cinza, pó, areia, vidro, metais) é alta.
	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

4. Quantidade de resíduos adequada para WtE

	> 150,000 toneladas anuais de frações adequadas de resíduos estão disponíveis	De 50,000 a 150,000 toneladas anuais de frações adequadas de resíduos	De 10,000 a 50,000 toneladas anuais de frações adequadas de resíduos	< 10,000 toneladas anuais de frações adequadas de resíduos
4	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

5. Operação eficiente das instalações de gestão de resíduos

	Atores públicos e privados são experientes e eficientes na administração de instalações de gestão de resíduos e em projetos de cooperação	Atores públicos e privados são experientes, mas requerem capacitação para gerir instalações de WtE com eficiência	Atores públicos têm experiência limitada com WtE e a contratação local de pessoal qualificado é difícil para os setores público e privado.	Nem atores públicos nem privados têm experiência com a operação de sistemas WtE.
5	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

6. Tempo de transporte dos RSU e distância adicional até a planta WtE

	Nem a distância nem o tempo de transporte devem mudar em relação à situação atual.	O tempo de transporte irá aumentar < 1 hora, distância adicional < 50 km.	O tempo de transporte irá aumentar > 1 hora, distância adicional > 100 km.	A distância adicional > 200 km e não há transporte ferroviário disponível.
6	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

7. Comercialização e/ou descarte final dos resíduos do processo

7	Existe mercado para os resíduos do processo. Resíduos perigosos podem ser descartados com segurança num aterro controlado próximo à planta WtE.	Não há mercado para os resíduos do processo. Todos os resíduos do processo podem ser descartados com segurança num aterro controlado próximo à planta.	Não há mercado para os resíduos do processo. O descarte seguro requer transporte por grandes distâncias.	Não há mercado para os resíduos do processo e o descarte seguro não pode ser disponibilizado.
	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	

8. Quadro jurídico e requisitos ambientais para WtE

8	Existe um quadro jurídico amplo, que abrange todos os tipos de WtE. Leis são fiscalizadas e a estratégia nacional de gestão de resíduos contempla WtE.	Existe um quadro jurídico nacional para WtE. As deficiências de fiscalização, ordenação e regulamentação estão sendo abordadas.	Não existe quadro jurídico para WtE, ou existe parcialmente. Pode-se assegurar que normas internacionais são cumpridas em projetos específicos.	O quadro jurídico existente proíbe WtE térmico, ou há indícios de que os padrões adequados de emissões não podem ser aplicados.
	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	

9. Financiamento da gestão de RSU

9	Os custos de coleta e descarte de RSU são sempre totalmente cobertos. Há recursos financeiros para cobrir os custos adicionais com WtE.	Os custos de coleta e descarte de RSU são sempre totalmente cobertos. Os custos adicionais com WtE podem ser difíceis de cobrir.	Os custos de coleta e descarte de RSU não são cobertos regularmente.	Costuma haver falta de recursos financeiros para cobrir os custos operacionais dos serviços de RSU.
	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	

10. Acesso a moeda estrangeira

10	Peças de reposição podem ser adquiridas localmente. Não há restrição para compra de peças de reposição em moeda estrangeira.	Grande parte das peças de reposição pode ser adquirida localmente. Há escritórios de venda e importação de peças disponíveis localmente.	A tecnologia chave da usina WtE precisa ser importada. Há atrasos para compras realizadas em moeda estrangeira.	Não há acesso a moeda estrangeira.
	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

11. Acesso a usuários finais de energia de WtE

11	As instalações de WtE ou CDR estão próximas de uma área industrial com demanda por energia e calor ou gás. Existe boa infraestrutura de transportes e energia.	As instalações de WtE ou CDR estão em uma área com demanda moderada por calor. Existe boa infraestrutura de transportes e energia.	As instalações de WtE ou CDR estão próximas a uma grande rede de transmissão de energia. Não há demanda por calor na região.	As instalações de WtE ou CDR estão em uma área que é ligada aos consumidores de energia de forma deficiente.
	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

12. Incentivos para geração de energia de baixo carbono

12	Os incentivos econômicos para energia e calor de baixo carbono já foram aplicados com sucesso.	Os incentivos para energia de baixo carbono são regulamentados por lei, mas ainda não foram aplicados.	A introdução de incentivos econômicos deverá acontecer dentro de um ano.	Não há incentivos econômicos
	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

4.3 Recomendações

Algumas dúvidas podem surgir após a leitura dos capítulos 1 - 3 e aplicação da matriz do capítulo 4.2. As recomendações a seguir podem oferecer orientações adicionais.

Para tomadores de decisão a nível nacional e local:

- » **Avalie se WtE é a melhor solução em termos de hierarquia dos resíduos e economia circular:** A redução de resíduos através da prevenção deve ser prioridade, seguida da preparação para reutilização e reciclagem de materiais dos resíduos. Analise seu fluxo de resíduos e identifique potencial de reutilização e reciclagem adicional de frações específicas.
- » **Tome decisões com base no plano de GRSU:** Só tome decisões fundamentadas num plano integrado de GRSU baseado em análise do fluxo de material e que respeite o conceito de hierarquia dos resíduos. O WtE não é uma solução independente, mas um possível componente de um sistema de tratamento de resíduos.
- » **Obtenha uma resposta para todos os itens marcados em amarelo na matriz de decisão:** Mesmo se sua avaliação interna baseada na matriz favoreça o WtE, pode haver pontos que exigem maiores esclarecimentos. Peça ajuda a um especialista ou consultor independente para obter resposta para todas as questões.
- » **Garanta que o projeto atende os padrões internacionais de emissões:** Sistemas de monitoramento de emissões devem estar em funcionamento antes do início dos projetos (especialmente para incineração, coprocessamento e tecnologias alternativas). Certifique-se que a fiscalização dos padrões de emissões possa ser efetuada por órgãos independentes. Isto poderá exigir alterações no quadro jurídico.
- » **Estabeleça um sistema de financiamento para cobrir o custo operacional de plantas WtE:** Como plantas WtE precisam de financiamento adicional para cobrir os custos, é preciso obter um mecanismo de financiamento adicional. Além das receitas diretas com impostos e taxas de resíduos, há três fontes adicionais de receita: subsídios, tarifas de processamento de resíduos e tarifas de alimentação para energia.
- » **Garanta uma boa cooperação interinstitucional:** Em muitos países em desenvolvimento, o WtE é frequentemente associado a ministérios ou órgãos do setor de energia. Entretanto, seu interesse não deveria estar em potencializar a produção de energia a partir de resíduos, mas em otimizar a recuperação de energia das frações de resíduos que não podem ser recicladas por razões técnicas ou comerciais. Desta forma, a cooperação estreita com os órgãos responsáveis pela gestão de resíduos e/ou proteção ambiental é essencial.
- » **Promova e ofereça capacitação:** A carência de especialistas em planejamento, operação e manutenção de plantas WtE traz um grande impacto na GRSU. Ofereça aos funcionários do órgão municipal de gestão de resíduos uma chance para aumentar seus conhecimentos e apoie iniciativas acadêmicas e científicas de fomento à educação no setor.

- » **Avalie oportunidades de captação de gás de aterros sanitários existentes:** É importante reduzir o impacto ambiental de aterros. Instalações de captação de gás de aterro exigem uma projeção realista da produção futura de gás de aterro, levando em consideração as quantidades futuras de resíduos desviados do aterro.
- » **Em caso de pouca experiência com o tratamento térmico de resíduos, comece pelo coprocessamento:** Uma vez que o coprocessamento de resíduos em usinas de cimento é largamente utilizado em países em desenvolvimento, esta opção de WtE poderá ser realizada a curto prazo. Usinas de cimento estão disponíveis em quase todos os países e podem ser atualizadas para uso de CDR com investimentos mínimos. Começar pelo coprocessamento também ajuda a exercitar a cooperação entre municípios e o setor industrial, além de aproveitar a vasta experiência internacional com coprocessamento em países em desenvolvimento. Os potenciais fatores limitantes são as baixas tarifas de tratamento de resíduos, a distância entre a geração de resíduos e as usinas de cimento, e os baixos custos de combustíveis fósseis (carvão, coque de petróleo, etc.).
- » **Promova a segregação de resíduos na fonte e plantas descentralizadas de digestão anaeróbia para a biomassa coletada de forma segregada:** Não comece em grande escala. Ofereça a oportunidade para que a população do seu município ganhe experiência com a segregação de resíduos e planejamento e operação de plantas de biogás.
- » **Aumente a cooperação com o setor privado:** Os municípios não conseguirão suportar os futuros desafios de GRSU sozinhos. Portanto, as autoridades locais devem criar um ambiente de confiança e condições estruturais e jurídicas seguras para que o setor de resíduos se torne atrativo para investidores e operadores privados.

Para empresas nacionais e internacionais:

- » **Desenvolva técnicas de incineração adaptadas às condições locais:** Usinas de incineração instaladas em países industrializados são caras demais para a maioria das cidades de países em desenvolvimento. Há uma necessidade global de desenvolver novas tecnologias para atender à composição dos resíduos de países em desenvolvimento, de forma que os custos operacionais e investimentos possam ser financiados.
- » **Evite a formação de uma má reputação para o setor:** O sucesso do WtE a médio e longo prazo depende da reputação obtida por plantas bem operadas. Associações industriais e empresas individuais devem minimizar o risco de plantas WtE se transformarem em dispendiosos ‘elefantes brancos’.

Anexo A: Descrição dos parâmetros da matriz de decisão

1. NÍVEL GLOBAL DE GESTÃO DE RESÍDUOS

- » Um requisito básico para a implementação exitosa do WtE é a existência de um sistema avançado de gestão de resíduos baseado na coleta seletiva e tratamento de diversos fluxos de resíduos separados na fonte. Biomassa, como resíduos de cozinha e jardim, são digeridos e/ou compostados. Recicláveis, como papel, cartão, PET, vidro, metais, etc., são separados e encaminhados para a indústria de reciclagem. A gestão de resíduos perigosos é controlada. As frações restantes de RSU que não podem ser recicladas são descartadas em um aterro sanitário controlado.
- » Experiências internacionais indicam que a implementação do estado da arte em coprocessamento e captação de gás de aterro pode ser exitosa se houver uma coleta sistemática de resíduos e alguns fluxos de resíduos específicos como pneus ou biomassa puderem ser encaminhados para essas instalações. A digestão anaeróbia requer a coleta separada de biomassa, uma vez que qualquer contaminação de outras frações de RSU poderá causar problemas no processo e na utilização do material digerido na agricultura. Nesse caso, a possibilidade de incineração deverá ser avaliada detalhadamente antes de iniciar um projeto. Pode ser necessário realizar algumas melhorias no sistema de gestão de resíduos.
- » Se não houver reciclagem sistemática, a captação de gás de aterro pode ser uma opção viável que não requer melhorias substanciais no nível geral de GRSU.
- » Devido à pouca experiência e altos custos operacionais e de capital, a aplicação e planejamento de projetos de pirólise e gaseificação deve ser estudada muito cuidadosamente em todos os níveis de GRSU.

2. COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS

- » A separação de RSU na fonte em residências é o melhor pré-requisito para reciclagem e também para WtE. Resíduos volumosos ou perigosos devem ser coletados e tratados separadamente.
- » Conforme mencionado anteriormente, a coleta seletiva de resíduos orgânicos é uma exigência para digestão anaeróbia. Se os resíduos coletados estiverem misturados com resíduos minerais ou perigosos, mesmo em pequenas quantidades, a digestão anaeróbia deixa de ser uma opção.
- » Se RSU costumam estar misturados com frações minerais ou perigosas, a adequação de cada tecnologia WtE deve ser avaliada com frequência. Deve-se tomar medidas para melhorar a separação de resíduos na fonte (p. ex. coleta e tratamento separados de resíduos de construção e demolição ou de baterias).
- » A captação de gás de aterro continua relevante onde aterros sanitários contêm níveis significativos de resíduos orgânicos.

3. PODER CALORÍFICO DOS RSU PARA PROCESSOS TÉRMICOS, TEOR ORGÂNICO

- » A combustão autotérmica (combustão autossustentada sem combustíveis adicionais) de RSU deve ser garantida durante todo o ano para incineração e coprocessamento. A queima combinada de óleo, gás ou outros combustíveis é cara e só deve ser utilizada para iniciar o processo de combustão ou em caso de emergência. Um indicador da adequação de RSU para processos de incineração ou coprocessamento é o poder calorífico. O alto teor mineral de resíduos de construção e demolição, vidro ou cinza, um alto teor de metal ou alto teor de água em resíduos de cozinha e jardim reduzem o poder calorífico. Um poder calorífico acima de 8 MJ/kg indica que todas as tecnologias de combustão são opções viáveis para projetos de WtE.
- » Tecnologias de incineração com uma etapa integrada de secagem avançada são capazes de queimar RSU úmido com um poder calorífico em torno de 7 MJ/kg. Para coprocessamento, deve-se determinar o teor de umidade aceitável e as tecnologias de secagem utilizadas antes de iniciar um projeto de WtE.
- » Se o poder calorífico for < 7 MJ/kg devido à umidade, deve-se determinar o teor de umidade aceitável e avaliar as tecnologias de secagem para qualquer tecnologia de combustão. Quando resíduos minerais forem a razão para um poder calorífico baixo, deve-se ampliar a gestão global de resíduos antes de iniciar qualquer opção de WtE.

- » O PCI para processos térmicos não pode ser comparado diretamente com a captação de GA e digestão anaeróbia. Entretanto, o teor energético de matéria prima orgânica de um biodigestor anaeróbio tem impacto no teor energético da produção de biogás. Matéria prima com alto teor energético pode aumentar a qualidade do biogás. A eficiência da captação de gás depende das condições existentes do aterro, incluindo a proporção de resíduos orgânicos depositados e a disposição das camadas.

4. QUANTIDADES DE RESÍDUOS ADEQUADAS PARA WtE

- » A escolha de tecnologia WtE também depende da quantidade de resíduos disponível e dos requisitos mínimos para uma operação economicamente viável. Neste contexto, “disponível” refere-se às frações adequadas de resíduos que podem ser fornecidas para a planta a um custo aceitável e que não possam ser recicladas economicamente. A planta WtE não deve causar um bloqueio na infraestrutura que impeça o crescimento da reciclagem dos fluxos de resíduos afetados.
- » Se houver mais de 150,000 toneladas anuais de resíduos disponíveis, todas as tecnologias são adequadas. Entretanto, devido à pouca experiência internacional com pirólise e gaseificação, outras tecnologias são mais indicadas
- » Para quantidades de resíduos entre 50,000 e 150,000 toneladas anuais, o custo-eficácia da incineração deve ser avaliado cuidadosamente. Coprocessamento, captação de gás de aterro e digestão anaeróbia são mais indicadas.
- » Abaixo de 50,000 toneladas anuais, a incineração torna-se demasiado cara. O custo-eficácia do coprocessamento pode ser impactado pelos preços baixos do carvão e do coque de petróleo. Para quantidades abaixo de 10,000 toneladas anuais, a digestão anaeróbia poderá ser a única tecnologia indicada, a depender da qualidade da biomassa.
- » A captação de gás de aterro depende da quantidade de matéria orgânica no aterro e poderá ser uma medida retroativa eficaz mesmo após o seu fechamento. Isto torna este parâmetro menos relevante, desde que a captação de metano possa ser realizada de forma a tornar a tecnologia rentável.

5. OPERAÇÃO EFICIENTE DAS INSTALAÇÕES DE GESTÃO DE RESÍDUOS

- » Instalações de gestão de resíduos podem ser operadas pelo setor público, privado ou em cooperação. Experiência nacional em aterros sanitários bem manejados, grandes estações de tratamento de águas residuais (setor público) e grandes usinas químicas ou de cimento (setor privado) demonstram que sistemas complexos podem ser geridos localmente. Entretanto, no caso de tecnologias estrangeiras em WtE, os fornecedores devem garantir contratualmente o suporte técnico a longo prazo. Projetos fracassados anteriormente em gestão de resíduos comprovam que o WtE requer gestores experientes e equipe técnica bem treinada. Outro requisito essencial é a boa comunicação entre atores públicos e privados. Sob estes requisitos, todas as tecnologias são candidatas a um projeto WtE, exceto pirólise e gaseificação devido à falta de experiência internacional com RSU heterogêneo.
- » A maioria dos atores requer capacitação em WtE mesmo quando tiverem experiência em gestão da infraestrutura de tratamento de resíduos. Usinas de cimento costumam pertencer a multinacionais com conhecimento interno de coprocessamento, que pode ser oferecido. Tecnicamente, a captação de gás de aterro é o método mais simples. Estas duas tecnologias são mais indicadas até que haja maiores conhecimentos locais sobre as outras tecnologias.
- » Se atores públicos tiverem pouca experiência com WtE e for difícil obter pessoal local qualificado, a captação de gás de aterro é a tecnologia mais indicada. Deve-se avaliar cuidadosamente a necessidade de capacitação para coprocessamento e digestão anaeróbia, uma vez que é mais fácil de obter do que para incineração e pirólise e gaseificação.
- » Caso nem atores públicos nem privados tenham experiência na operação de sistemas WtE, a captação de gás de aterro é a única alternativa possível, com alguma capacitação básica.

6. TEMPO DE TRANSPORTE DOS RSU E DISTÂNCIA ADICIONAL ATÉ A PLANTA WTE

- » Além do acesso a usuários finais da energia gerada, o impacto econômico e ambiental do esforço com transporte adicional até instalações de WtE deve ser considerado. Cada quilômetro adicional de transporte rodoviário dos resíduos aumenta o custo da coleta, bem como congestionamentos e emissões de gases de efeito estufa em áreas metropolitanas. Preferencialmente, a distância ou tempo de transporte rodoviário será menor ou igual à situação atual de gestão de resíduos.
- » Um aumento de menos de uma hora no tempo para transporte ou uma distância adicional de menos de 50 km é considerada tolerável para WtE. Para um aumento acima de uma hora ou distância acima de 100 km, o teor energético dos resíduos transportados deve ser bem alto para ser economicamente e ambientalmente viável. Para distâncias acima de 200 km, o único meio de transporte viável seria ferroviário, entretanto é de difícil gestão e pouco realista para RSU.
- » A captação de gás em aterros sanitários existentes implica que não haverá aumento de distância de transporte de resíduos. Novos aterros sanitários devem levar em conta as distâncias para otimizar a eficiência da coleta.

7. COMERCIALIZAÇÃO E/OU DESCARTE FINAL DOS RESÍDUOS DO PROCESSO

- » Com a exceção do coprocessamento em usinas de cimento e da captação de gás de aterro, todas as outras tecnologias de WtE geram resíduos do processo. Se atualmente houver mercado para resíduos de processos similares e se resíduos perigosos puderem ser descartados com segurança em um aterro controlado próximo à planta WtE, todas as tecnologias podem ser consideradas aptas para projetos de WtE.
- » Se atualmente não houver mercado para resíduos de processo, mas os resíduos perigosos puderem ser descartados com segurança em um aterro controlado próximo à planta WtE, deve-se avaliar cuidadosamente a viabilidade econômica da incineração, digestão anaeróbia e pirólise e gaseificação. Neste caso, o coprocessamento e a captação de gás de aterro são mais indicados.
- » A digestão anaeróbia deixa de ser viável se exigir percorrer grandes distâncias para a venda de fertilizante sem uma perspectiva de mercado a longo prazo. Fertilizante de alta qualidade, resultante de fluxos de resíduos bem separados e controlados é um fator determinante neste caso.

8. QUADRO JURÍDICO E REQUISITOS AMBIENTAIS PARA WTE

- » A existência de um quadro jurídico abrangente para a gestão de resíduos é um pré-requisito para o sucesso do WtE. A legislação deverá incluir elevados padrões ambientais para emissões atmosféricas, da água e do solo, além de odores e ruídos e requisitos de saúde e segurança. Deverá, ainda, definir o papel do WtE em um sistema integrado de gestão de resíduos. A legislação deverá ser adequada às condições nacionais e não simplesmente copiada de um país industrializado.
- » Mecanismos de fiscalização eficientes devem minimizar as práticas ilegais de gestão de resíduos, garantindo o fornecimento de resíduos às instalações de WtE. Entretanto, a legislação deverá visar a cooperação com o setor informal para a logística da coleta, ao invés de marginalizá-la. Deve-se assegurar o monitoramento e fiscalização dos padrões internacionais para limites de emissões. Os órgãos públicos devem estar devidamente capacitados e equipados para fiscalizar o cumprimento de normas ambientais.
- » Enquanto o coprocessamento e a captação de gás de aterro são baseados em instalações existentes que costumam ser reguladas, a digestão anaeróbia, pirólise e incineração exigem uma regulamentação específica, p. ex. com

relação às opções de reutilização dos resíduos do processo. O quadro jurídico atual poderá apresentar alguns defeitos. As alterações para permitir o estado da arte em coprocessamento e captação de gás de aterro costumam ser feitas somente em portarias ou estatutos, o que tende a ser mais fácil que o processo político para criação de novas leis. Nestas condições, pode-se considerar que o estado da arte das tecnologias de coprocessamento e captação de gás de aterro são mais fáceis de implementar, enquanto outras tecnologias de WtE exigem o desenvolvimento de quadros jurídicos mais abrangentes antes de serem implementadas.

- » Em alguns países existe um consenso político para adaptar o quadro jurídico ao WtE. A depender do progresso na elaboração de um quadro jurídico abrangente, pode fazer sentido iniciar o processo de formulação ou emenda da legislação para tornar coprocessamento, captação de gás de aterro e digestão anaeróbia tecnologias favoráveis.
- » Em alguns países, o tratamento térmico de resíduos é proibido, o que exclui coprocessamento, incineração, pirólise e gaseificação. A tecnologia WtE só pode ser considerada adequada se não for contrária à hierarquia de resíduos ou à estratégia global de gestão de resíduos de um país ou estado.

9. FINANCIAMENTO DA GESTÃO DE RSU

- » A disponibilidade contínua de recursos financeiros é essencial para a aplicação de tecnologias WtE a longo prazo. Deve-se assumir que projetos de WtE terão custos mais elevados que aterros sanitários. As tabelas 2 a 6 apresentam os custos líquidos por tonelada de resíduos para projetos típicos em WtE para as cinco tecnologias.
- » Antes de considerar o WtE como uma oportunidade, municípios devem ser capazes de custear totalmente a coleta e descarte de RSU em um aterro controlado. Os recursos financeiros para cobrir os custos adicionais devem ser facilmente acessíveis. A longo prazo, é desejável implementar uma taxa para geradores de resíduos com base no princípio do poluidor pagador, enquanto os custos atuais de gestão de resíduos podem ser cobertos com o orçamento municipal. Mais especificamente, um aumento na taxa de aterramento sanitário poderá tornar outras opções de gestão de resíduos mais viáveis.
- » Se um aumento na taxa de gestão de resíduos não for viável ou se os municípios não quiserem aumentar seu orçamento, é essencial obter uma análise detalhada de custos realizada por consultores independentes e/ou buscar um financiamento alternativo de longo prazo antes de iniciar um projeto de WtE. Onde não houver opções para financiamento a longo prazo, os municípios provavelmente terão que arcar com os custos, o que irá resultar no encerramento das operações ou num aumento de custos para o município.

10. ACESSO A PEÇAS DE REPOSIÇÃO E MOEDA ESTRANGEIRA

- » O acesso a moeda estrangeira é essencial para todas as peças de reposição que não estão disponíveis no mercado local, uma vez que uma falha poderá levar à interrupção das operações, ou ao descumprimento de padrões operacionais.
- » Se for possível obter peças de reposição no mercado local e não houver restrição para compra de peças em moeda estrangeira, qualquer WtE pode ser considerado.
- » Quando a maioria das peças de reposição estiver disponível no mercado local e houver escritórios de venda e importação de peças, deve-se avaliar o custo estimado e o acesso a moeda estrangeira antes de iniciar um projeto em WtE. Isto é menos crítico para captação de gás de aterro.
- » Quando for necessário importar tecnologia chave para a planta WtE ou atrasos nas compras em moeda estrangeira são esperados, não se deve adotar incineração, pirólise e gaseificação. Sem acesso a moeda estrangeira, a captação de gás de aterro poderá ser a única opção e também irá exigir uma análise de custos.

11. ACESSO A USUÁRIOS FINAIS DE ENERGIA DE WtE

- » A escolha da localização de uma planta WtE depende do acesso a usuários finais da energia, entre outras coisas. A escolha da localização e as receitas devem ser analisadas antes do início do projeto. Áreas industriais podem se beneficiar da energia gerada, calor ou biogás. Investimentos em aquecimento distrital com fornecimento de vapor do processo são altos, mas podem gerar uma receita valiosa. Gás de aterro ou biogás de plantas de digestão anaeróbia podem ser injetados na rede de gás se houver um gasoduto próximo. A substituição do diesel por biogás ou gás de aterro no transporte também é uma opção interessante. A localização da captação de gás de aterro e do coprocessamento costumam ser predefinidas pelos respectivos aterros ou usinas de cimento existentes.
- » Quando um projeto for localizado em áreas sem nenhuma ou com baixa demanda por calor ou gás, as receitas com venda de energia serão menores. A transformação de todo o calor em energia é uma opção, mas não é a mais econômica, uma vez que a taxa de eficiência é muito mais baixa que o uso direto do gás ou vapor. Locais com pouca conexão com usuários finais de energia estão em desvantagem significativa para WtE porque implicam na baixa utilização da energia recuperada e um aumento nos custos operacionais líquidos.

12. INCENTIVOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA DE BAIXO CARBONO

- » A venda de energia de resíduos, i.e. energia elétrica, gás e calor, está sujeita a ser eliminada do mercado devido às flutuações no preço dos combustíveis fósseis convencionais como óleo, carvão e gás. Quando isto acontece, a viabilidade econômica da planta é ameaçada, o que torna uma renda segura com energia uma necessidade para garantir uma receita de longo prazo para a gestão de resíduos. Incentivos regulatórios (como tarifas de alimentação) para geração de energia de baixo carbono, não só podem apoiar o WtE como podem contribuir para as metas nacionais definidas nas NDCs (Contribuições Nacionalmente Determinadas) do acordo de Paris sobre o clima.
- » Uma aplicação exitosa dos incentivos para energia de baixo carbono indica um grande potencial para todas as tecnologias WtE. Se houver incentivos, mas que ainda não foram aplicados, a eficácia dos incentivos para incineração, digestão anaeróbia, pirólise e gaseificação deve ser avaliada primeiro.
- » Sem uma perspectiva realista de incentivos, qualquer projeto de WtE deve ser considerado arriscado.

Anexo B: Leitura Adicional

DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA DA UE EM TRATAMENTO DE RESÍDUOS E TRATAMENTO TÉRMICO

European Commission, Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, Brussel, 2006.

European Commission, Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Treatment, Brussel, Draft December 2015.

<http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/>

AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA WTE

CWG Waste to Energy Rapid Assessment Tool, 2016

https://www.giz.de/de/downloads/giz2016-en-cwg_Rapid-Assessment-Tool_Waste-to-Energy.pdf

INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Kamuk B, ISWA Guidelines: Waste to Energy in Low and Middle Income Countries, ISWA – the International Solid Waste Association, August, 2013. www.iswa.org

World Bank Technical Guidance Report: Municipal Solid Waste Incineration, 1999.

<http://web.mit.edu/urbanupgrading/urbanenvironment/resources/references/pdfs/MunicipalSWIncin.pdf>

COPROCESSAMENTO E PRODUÇÃO DE CDR

GTZ-Holcim Public Private Partnership, Guidelines on co-processing Waste Materials in Cement Production, 2006. <http://coprocem.com/>

UNEP, Basel Convention, Technical guidelines on the environmentally sound co-processing of hazardous wastes in cement kilns. Geneva, 2012

<http://www.basel.int/Implementation/Publications/TechnicalGuidelines/tabid/2362/Default.aspx>

DIGESTÃO ANAERÓBIA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Vögeli Y, Riu C, Gallardo A, et al., 2014, Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries.

https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/SWM/Anaerobic_Digestion/biowaste.pdf

Wellinger A, Murphy J, Baxter D, 2013, The Biogas Handbook. Science, production and applications. Woodhead Publishing

Biogas Safety First! Guidelines for the safe use of Biogas Technology, Fachverband Biogas e. V. and GIZ, November 2016. <http://www.biogas-safety.com>

CAPTAÇÃO DE GÁS DE ATERRO

U.S. Environmental Protection Agency, Landfill gas cost energy model, landfill methane outreach program (LMOP), Version 3.0, August 2014

https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-04/documents/lfgcost-webv3_manual.pdf

Referências

- [1] D. C. Wilson, L. Rodic, P. Modak, R. Soos, A. Carpintero, C. Velis, M. Iyer and O. Simonett, “Global Waste Management Outlook,” United Nations, Environment Program and International Solid Waste Association, Osaka and Wien, 2015.
- [2] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, “World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights,” United Nations, New York, 2014.
- [3] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, “Sustainable Development Challenges,” United Nations, New York, 2013.
- [4] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, “World Population Prospects: The 2015 Revision,” United Nations, New York, 2015.
- [5] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Studies,, “Patterns of Urban and Rural Population Growth,” Department of Economic and Social Affairs, New York, 1980.
- [6] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, “Probabilistic Population Projections based on the World Population Prospects: The 2015 Revision,” United Nations, New York, 2015.
- [7] D. Hoornweg and P. Bhada-Tata, “What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management. Urban Development Series; Knowledge Papers no. 15,” World Bank, Washington, D.C., 2012.
- [8] A. Mavropoulos, D. Wilson, C. Velis, J. Cooper and B. Appelqvist, “Globalization and Waste Management. Phase 1: Concepts and Facts,” International Solid Waste Association, Wien, 2012.
- [9] Ellen MacArthur Foundation, “Towards the Circular Economy, Opportunities for the Consumer Goods Sector,” 2013.
- [10] CWG, Collaborative Working Group on Solid Waste Management in Low and Middle Income Countries, “CWG Rapid Technology Assessment Tool,” 2016.
- [11] EAWAG; Sandec, “Global Waste Challenge, Situation in Developing Countries,” Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology and Sandec, Dübendorf, 2008.
- [12] EU, “Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control),” EUR-Lex, Brussel, 2010.
- [13] EU, “Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration,” European Commission, Brussel, 2006.
- [14] Diagram supplied by Doosan Lentjes GmbH and adapted for this guide.
- [15] The World Bank, “Municipal Solid Waste Incineration,” The International Bank for Reconstruction and Development, Washington, D.C., 1999.
- [16] CEMBUREAU, “Activity Report 2015,” The European Cement Association, Brussel, 2015.
- [17] GIZ, “Guideline, Application of Waste-to-Energy in Vietnam,” 2015.
- [18] D. Mutz and V. Nandan, “Co-processing Waste Materials in Cement Production. The GTZ-Holcim Public Private Partnership,” International Journal of Environmental Technology and Management, pp. 300-309, 2006.

- [19] EU, “Refuse Derived Fuel, Current Practice and Perspectives (B4-3040/2000/306517/MAR/E3) WRc Ref: CO5087-4,” European Commission, Brussel, 2003.
- [20] Secretariat of the Basel Convention, “Technical Guidelines on the environmentally sound co-processing of hazardous waste in cement kilns,” 2012.
- [21] World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), “Guidelines for Co-Processing Fuels and Raw Materials in Cement Manufacturing,” 2014.
- [22] CDM -Executive Board, “Project Design Document CEMEX Mexico: Biomass project at Huichapan cement plant, Version 3,” 2012.
- [23] A. Wellinger, J. D. Murphy and D. Baxter, *The Biogas Handbook. Science, Production and Applications*, Cambridge: Woodhead Publishing, 2013.
- [24] Y. Vögeli, C. R. Lohri, A. Gallardo, S. Diener and C. Zurbrügg, “Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries,” EAWAG, Dübendorf, 2014.
- [25] Image adapted from p. 8 of “Biowaste to Biogas”, Fachverband Biogas, Freising, 2016. [Online] Available: <http://www.biowaste-to-biogas.com/>.
- [26] Fachverband Biogas, “Biowaste to Biogas,” Freising, 2016.
- [27] U. Baserga, “Vergärung organischer Reststoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, FAT Bericht Nr. 5,” Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, 2000.
- [28] R. Whyte and G. Pery, “A rough Guide to Anerorbic Digestion Costs and MSW Diversion,” *Renewable Energy*, 2001.
- [29] J. Rapport, R. Zhang, B. M. Jenkins and R. B. Williams, “Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste,” California Environmental Protection Agency, 2008.
- [30] UNFCCC, “United Nation Framework Convention on Climate Change,” [Online]. Available: <https://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html>. [Accessed May 2016].
- [31] K. Wang-Yao, S. Towprayoon, C. Chiemchaisri, S. h. Gheewala and A. Nopharatana, “Seasonal Variation of Landfill Methane Emissions from Seven Solid Waste Disposal Sites in Central Thailand,” in *The 2nd Joint Internation Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)*, Bangkok, 2006.
- [32] Image based on “http://www.advanceddisposal.com/media/10751/landfill_gas_to_energy_diagram_946x333.jpg,” [Online].
- [33] EPA, “LFG Energy Projects, frequently askeed questions. www3.epa.gov/lmop/faq/lfg.html visited August 2016”.
- [34] CDM - Executive Board, “Project Design Document, Salvador da Bahia Landfill Gas Management Project, Version 8.2,” 2016. [Online]. Available: <https://cdm.unfccc.int/Projects>.
- [35] C. -. E. Board, “Project Design Document, Tianjin Shuangkou Landfill Gas Recovery and Electricity Generation, Version 9, 2014. Available: <https://cdm.unfccc.int/Projects>.”.
- [36] “www.dgengineering.de,” [Online]. Available: <http://www.dgengineering.de/images/Fliessbild-Pyrolyse-D-1.jpg>.
- [37] F. H. W, “Case Study Thermo Select Facility Karlsruhe,” TNO Environment, Energy and Process Innovation, Netherlands, 2002.

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Escritórios em Bonn e
Eschborn

Friedrich-Ebert-Allee 36 + 40
53113 Bonn, Germany
T +49 228 44 60 - 0
F +49 228 44 60 - 17 66

Dag-Hammarskjöld-Weg 1 - 5
65760 Eschborn, Germany
T +49 61 96 79 - 0
F +49 61 96 79 - 11 15

E info@giz.de
I www.giz.de

Em nome de



Federal Ministry
for Economic Cooperation
and Development