



RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS UM GUIA PARA TOMADORES DE DECISÃO

RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS UM GUIA PARA TOMADORES DE DECISÃO

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA - CNI

Paulo Afonso Ferreira Presidente em exercício

Diretoria de Desenvolvimento Industrial

Carlos Eduardo Abijaodi Diretor

Superintendência de Relações Públicas

Ana Maria Curado Matta Superintendente de Relações Públicas

Diretoria de Educação e Tecnologia

Rafael Esmeraldo Lucchesi Ramacciotti Diretor

Diretoria de Políticas e Estratégia

José Augusto Coelho Fernandes Diretor

Diretoria de Relações Institucionais

Mônica Messenberg Guimarães Diretora

Diretoria de Serviços Corporativos

Fernando Augusto Trivellato Diretor

Diretoria Jurídica

Hélio José Ferreira Rocha Diretor

Diretoria CNI/SP

Carlos Alberto Pires Diretor



RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS UM GUIA PARA TOMADORES DE DECISÃO

© 2019. CNI - Confederação Nacional da Indústria.

Qualquer parte desta obra poderá ser reproduzida, desde que citada a fonte.

CNI

Gerência Executiva de Meio Ambiente e Sustentabilidade - GEMAS

FICHA CATALOGRÁFICA

C748r

Confederação Nacional da Indústria.

Recuperação energética de resíduos sólidos: um guia para tomadores de decisão / Confederação Nacional da Indústria. – Brasília : CNI, 2019.

111 p. : il.

ISBN 978 - 85 - 7957 - 219 - 7

1.Recuperação Energética. 2. Resíduos Sólidos. 3. WtE I. Título.

CDU: 628.312.1

CNI

Confederação Nacional da Indústria Departamento Nacional

Sede

Setor Bancário Norte Quadra 1 – Bloco C Edifício Roberto Simonsen 70040-903 – Brasília-DF

Tel.: (61) 3317-9000 Fax: (61) 3317-9994

http://www.portaldaindustria.com.br/cni/

Serviço de Atendimento ao Cliente - SAC

Tels.: (61) 3317-9989 / 3317-9992

sac@cni.org.br

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DIFERENTES PLANTAS DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA POR DIGESTÃO ANAERÓBIA E INCINERAÇÃO AO REDOR DO MUNDO	
FIGURA 2 – WTE NA ECONOMIA CIRCULAR	17
FIGURA 3 – RELAÇÃO ENTRE QUALIDADE E CUSTO DA RECUPERAÇÃO DOS REJEITOS PARA RECICLAGEM E RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA	19
FIGURA 4 – REJEITOS COMO UM SUBPRODUTO DE FONTE DE ENERGIA PARCIALMENTE RENOVÁVEL PARA UM SISTEMA SUSTENTÁVEL DE GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	20
FIGURA 5 – PLANTA DE TRATAMENTO TÉRMICO AVANÇADO	22
FIGURA 6 – PLANTA DE INCINERAÇÃO	22
FIGURA 7 – PLANTA DE DIGESTÃO ANAERÓBIA	23
FIGURA 8 – PROCESSO DA PRODUÇÃO DE CLÍNQUER COM PONTOS DE ALIMENTAÇÃO DE RESÍDUOS PARA COPROCESSAMENTO	26
FIGURA 9 – RESUMO ILUSTRADO DA DEFINIÇÃO DE COPROCESSAMENTO	26
FIGURA 10 – PLANTA PADRÃO DE INCINERAÇÃO DE RSU	27
FIGURA 11 – USINA ELÉTRICA DE CLASSIFICAÇÃO E INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS DE LUJIASHAN (PEQUIM, CHINA)	30
FIGURA 12 – VARIAÇÃO DO VALOR CALORÍFICO DOS RSU PARA AS PLANTAS WTE EUROPEIAS	39
FIGURA 13 – PRODUTOS TÍPICOS DAS PLANTAS WTE	41
FIGURA 14 – CONTEÚDO ENERGÉTICO E PRODUÇÃO DE ENERGIA DEPENDENDO DO PODER CALORÍFICO	42
FIGURA 15 – INSUMOS E PRODUTOS TÍPICOS DE UMA PLANTA DA	45
FIGURA 16 – CAPEX E OPEX DAS PLANTAS WTE	56
FIGURA 17 – ATORES DE INTERESSE DOS PROJETOS DE WTE	61
FIGURA 18 – BENEFÍCIOS DA RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS	65
FIGURA 19 – BALANÇO DE CO2 DE DIFERENTES FONTES DE ENERGIA	66
FIGURA 20 – PLANTAS WTE LOCALIZADAS AO REDOR DO MUNDO	71
FIGURA 21 – WTE EM SUZHOU, CHINA	71
FIGURA 22 – DISTRIBUIÇÃO REGIONAL DOS RSU COLETADOS EM 2017	92
FIGURA 23 – DISPOSIÇÃO FINAL DOS RSU COLETADOS NO BRASIL	93
FIGURA 24 – COMPOSIÇÃO DOS RSU NO BRASIL	94

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – VALOR CALORÍFICO LÍQUIDO PARA DIFERENTES TIPOS DE RESÍDUOS	40
TABELA 2 – CONVERSÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO PARA DIFERENTES TIPOS DE INSTALAÇÕES DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS	41
TABELA 3 – FATORES DE EMISSÕES DE DIFERENTES COMBUSTÍVEIS	43
TABELA 4 – PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM DIGESTORES DE LARGA ESCALA QUE TRATAM UMA VARIEDADE DE RSU ORGÂNICOS ÚMIDOS	46
TABELA 5 – USO DE RECUPERAÇÃO TÉRMICA DE CDR NA ALEMANHA EM 2007	51
TABELA 6 – SÍNTESE DA APLICAÇÃO BEM-SUCEDIDA DE DIFERENTES PROCESSOS TÉRMICOS AOS PRINCIPAIS RESÍDUOS	53
TABELA 7 – RESUMO DA VARIAÇÃO DE CUSTOS PARA AS PLANTAS DE TRATAMENTO TÉRMICO	57
TABELA 8 – PANORAMA DA LITERATURA SOBRE CAPEX E OPEX DOS PROCESSOS DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA	57
TABELA 9 – LISTA DE ATORES POTENCIAIS	64
TABELA 10 – INSUMOS, PRODUTO E CAPACIDADE TOTAL DAS TECNOLOGIAS EXISTENTES NO MUNDO (ISWA, 2012)	70
TABELA 11 – MELHORES OPÇÕES TECNOLÓGICAS ADOTADAS COM BASE NA FAIXA POPULACIONAL	79
TABELA 12 – ESPECIFICAÇÕES PARA DIFERENTES TECNOLOGIAS DE WTE	81
TABELA 13 – MATERIAIS MAIS RECICLADOS NO BRASIL	95
TABELA 14 – RESUMO DAS TECNOLOGIAS COMERCIAIS DE DA COM PLANTAS DE REFERÊNCIA DE GRANDE ESCALA (2008)	.102

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABRELPE Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

BNDES Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

BREF Documento de referência sobre as melhores tecnologias disponíveis

CDR Combustível Derivado de Resíduo

CEWEP Confederação das Plantas Europeias de Recuperação Energética

CHP Planta de geração combinada de calor e eletricidade

COT Construção-Operação-Transferência

CPA Controle da Poluição do Ar

DHC Rede urbana de aquecimento/resfriamento

GEE Gases de Efeito Estufa

ISWA Associação Internacional de Resíduos Sólidos

NPK Nitrogênio, Fósforo e Potássio

OCDE Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

PET Polietileno Tereftalato

POPs Poluentes Orgânicos Persistentes

PPP Parceria Público-Privada

TIR Taxa Interna de Retorno

TMB Tratamento Mecânico-Biológico

TTA Tratamento Térmico Avançado

UNFCCC Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

VCB Valor Calorífico Baixo

VCL Valor Calorífico Líquido

WtE Waste-to-Energy ou Recuperação Energética de Resíduos

WTERT Conselho de Pesquisa e Tecnologia em Waste to Energy

LISTA DE UNIDADES

BTU/LB UNIDADE TÉRMICA BRITÂNICA/LIBRA

CDCL₂ CLORETO DE CÁDMIO

CL METANO
CL CLORO

CO MONÓXIDO DE CARBONO

CO₂ DIÓXIDO DE CARBONO

G/GJ GRAMAS/GIGAJOULE

GJ/MG GIGAJOULES/MILIGRAMA
GJ/T GIGAJOULES/TONELADA

H₂ HIDROGÊNIO

KG/GJ KILOGRAMA/GIGAJOULE
KJ/KG KILOJAULES/QUILOGRAMA

KW KILOWATTS

KWH KILOWATTS-HORA

M³/WET KG METROS CÚBICOS/QUILOGRAMA MOLHADO

MJ/KG MEGAJOULES/QUILOGRAMA

MJ/M³ MEGAJOULES/METROS CÚBICOS

MMBTU 1 MILHÃO DE UNIDADES TÉRMICAS BRITÂNICAS

MTPY MILHÕES DE TONELADAS /ANO

MW MEGAWATT

MWH MEGAWATT-HORA

N₂O DIÓXIDO DE NITROGÊNIO

NACL CLORETO DE SÓDIO

NG/NM³ NANOGRAMAS/METRO CÚBICO NORMAL

NOX ÓXIDO NITROSO

SO₂ DIÓXIDO DE ENXOFRE

TWH TERAWATT-HORA

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	11
1 O QUE É RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS? 1.1 Mensagens-chave	
2 WTE & ECONOMIA CIRCULAR	
3 UMA INTRODUÇÃO ÀS TECNOLOGIAS WTE	21
4 INCINERAÇÃO	27
5 GASEIFICAÇÃO & PIRÓLISE	31
6 DIGESTÃO ANAERÓBIA	35
7 INSUMOS & PRODUTOS	37
8 COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS (CDR)	49
9 APLICAÇÃO COMERCIAL DAS PLANTAS WTE 9.1 Mercados de energia	54
10 ATORES DOS PROJETOS DE WTE	61
11 PRÓS & CONTRAS DA RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS	65
12 ESTADO DA ARTE NO MUNDO	
13 ATRATIVIDADE DO INVESTIDOR	75
14 SELEÇÃO DAS TECNOLOGIAS WTE	77
15 AQUISIÇÃO & FINANCIAMENTO	83
16 PLANEJAMENTO & LICENCIAMENTO	85
17 CONSTRUÇÃO & COMISSIONAMENTO	87
18 PROPRIEDADE & OPERAÇÃO	89
19 SETOR DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL	91 95

20 QUADRO REGULATÓRIO BRASILEIRO PARA RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA	
DE RESÍDUOS	97
20.1 Política Nacional de Resíduos Sólidos	97
20.2 Recuperação Energética de Resíduos	98
21 ENTENDIMENTO SOBRE WTE NO BRASIL	101
21.1 Possíveis configurações e oportunidades para esforços conjuntos	
entre municípios e indústria no uso de CDR	101
21.2 Barreiras à adoção de plantas WtE	104
21.3 Incentivos financeiros	105
REFERÊNCIAS	107



A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010 e regulamentada pelo Decreto nº 7.404/2010, está em pleno processo de implantação. Entre os principais pontos a serem efetivados, encontra-se a questão da recuperação energética.

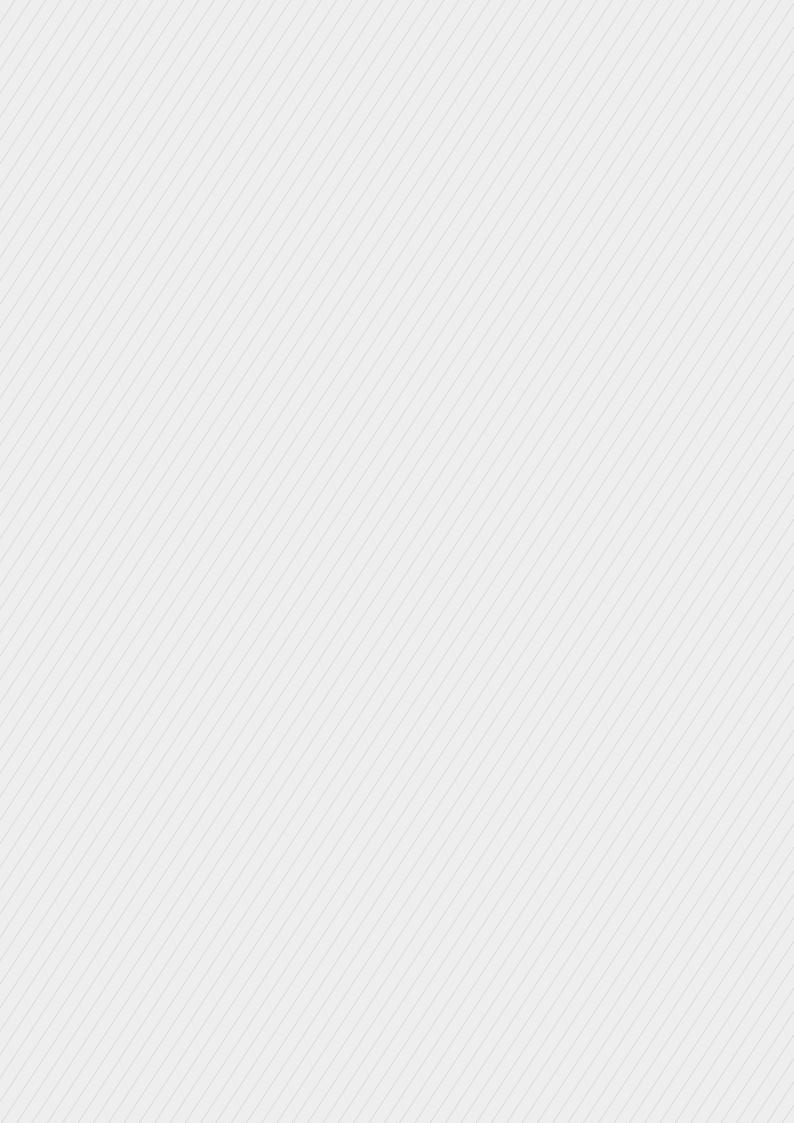
Os sistemas de destinação de resíduos por processos de recuperação energética, mais conhecidos em inglês pelo termo *Waste-to-Energy (WtE)*, são modelos avançados de aproveitamento de materiais com potencial energético não passíveis de reciclagem. Esses mecanismos transformam os resíduos em energia limpa e renovável.

As formas mais comuns podem se dar em instalações dedicadas a essa finalidade, as Unidades de Recuperação Energética (UREs). Isso também é possível por meio de combustíveis fabricados com resíduos em fornos, caldeiras e turbinas das empresas, permitindo a utilização como fonte energética mais barata e disponível em todo o país, em substituição às fontes fósseis.

Em parceria com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe) e com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), a Confederação Nacional da Indústria (CNI) elaborou este guia, que aborda as diferentes realidades e os requisitos necessários para o desenvolvimento de um mercado voltado à recuperação da energia dos resíduos. O texto apresenta diretrizes e orientações para prevenir problemas e estimular os projetos, com indicações técnicas, institucionais, regulatórias, econômicas e tributárias.

É imprescindível criar um bom ambiente de negócios que atraia investimentos e aumente a competitividade da indústria brasileira. Esperamos que este guia contribua para esse propósito e ajude na tomada de decisão, tanto do setor público quanto da iniciativa privada.

Boa leitura.





A energia contida nos resíduos sólidos pode ser recuperada por meio de várias tecnologias. Primeiramente removendo a fração reciclável para, então, recuperar o que se classifica como rejeito.

O escopo do presente Guia abordará as seguintes tecnologias de recuperação energética:

Coprocessamento em fornos de clínquer: é realizada a combustão do resíduo a 1.450 °C para geração de energia térmica e matéria-prima em fornos de clínquer (principal componente do cimento Portland). Processo no qual não há geração de novos resíduos nem cinzas.

Incineração: é realizada a combustão do resíduo a 850 °C para geração de energia térmica e elétrica.

Pirólise & Gaseificação: o resíduo, na condição de combustível, sofre reação térmica com pouco ou nenhum oxigênio (dependendo da tecnologia escolhida) para produzir o "gás de síntese" ou *syngas*, com aplicação na geração de energia ou como matéria-prima para produção de metano, químicos, biocombustíveis ou hidrogênio.

14

Digestão Anaeróbia: utiliza microrganismos que decompõem os resíduos orgânicos em biogás rico em metano, cujo poder calorífico pode gerar energia térmica, elétrica ou mesmo ser convertido em gás veicular, além de poder gerar também biofertilizante. Essa tecnologia é mais adequada para a fração molhada ou resíduos de alimentos.

No Brasil, a maior parte dos resíduos sólidos é tradicionalmente depositada em aterros sanitários, abrindo a possibilidade de exploração do gás que é gerado em muito deles por meio do confinamento dos resíduos em condições anaeróbias. O gás de aterro contém metano, um poderoso gás de efeito estufa, por isso capturá-lo também é uma forma de prevenção da poluição atmosférica. Sua geração declinará com o tempo e com o avanço de práticas mais sustentáveis e eficientes de gestão de resíduos sólidos, com foco nas tecnologias que serão descritas nas próximas páginas.

Figura 1 – Diferentes plantas de recuperação energética por digestão anaeróbia e incineração ao redor do mundo



Fonte: organizado por D-Waste, 2016.

O presente trabalho foi desenvolvido visando:

- Apresentar o papel da recuperação energética dos resíduos na Economia Circular.
- Oferecer um panorama das características técnicas e econômicas dos diferentes tipos de tecnologias de recuperação energética utilizadas.
- Mostrar os benefícios ambientais, econômicos e sociais dos produtos gerados pelos processos de recuperação energética.
- Identificar o papel do tratamento de resíduos por recuperação energética nos mercados de energia.
- Apresentar o papel dos principais atores dos projetos de recuperação energética.

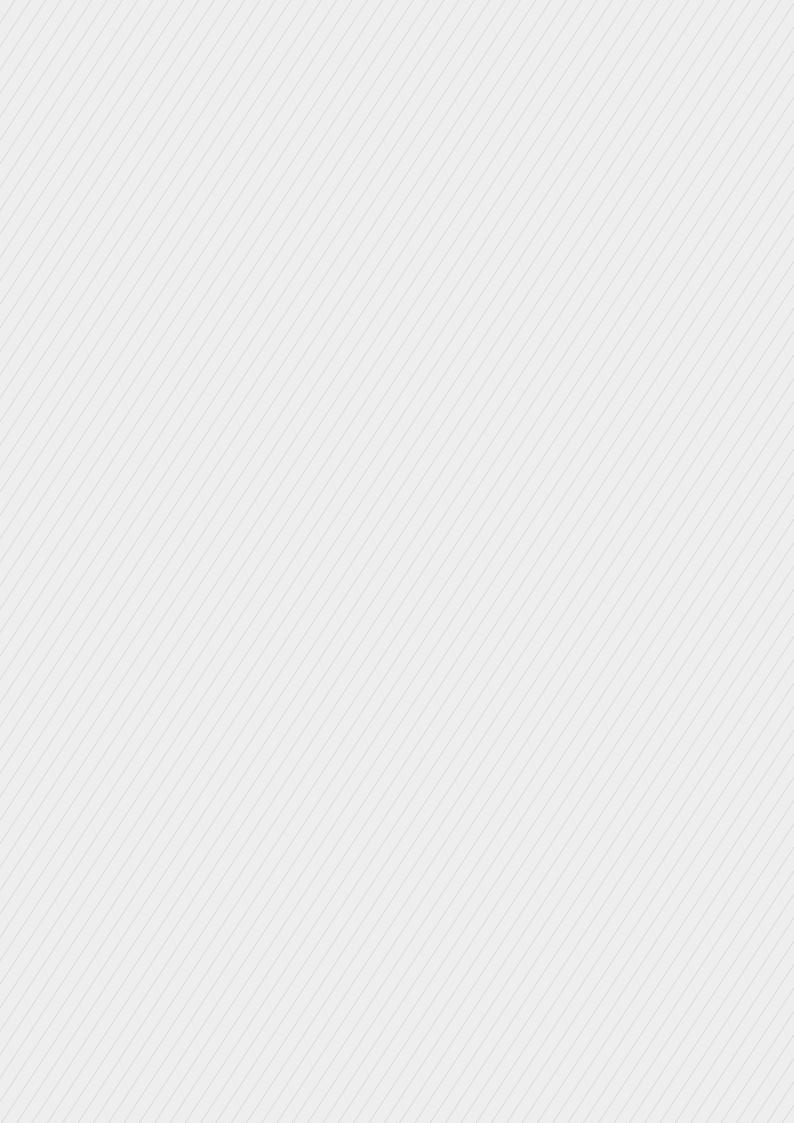
- Revisar o estado da arte no mundo, em países desenvolvidos e em desenvolvimento.
- Ilustrar o conceito de gestão de resíduos sólidos no Brasil em níveis nacional e regional, e o panorama de seu quadro legal.
- Descrever as barreiras e os estímulos existentes para promoção da implantação da recuperação energética no Brasil.
- Identificar a oportunidade para esforços conjuntos entre municipalidades e indústria na utilização de resíduos sólidos urbanos como combustível no Brasil.

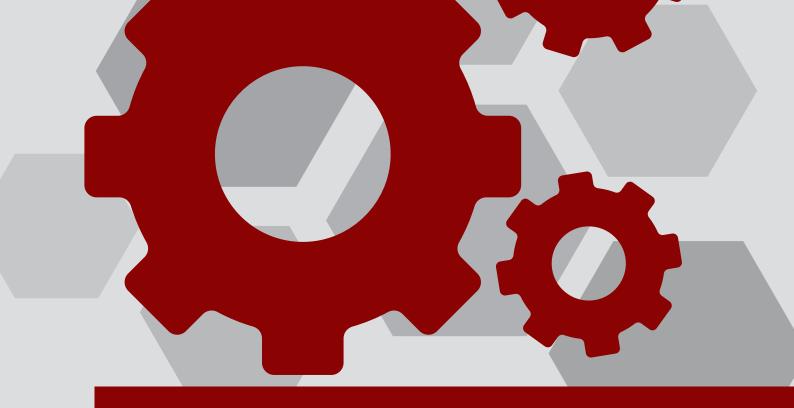
1.1 Mensagens-chave

- A recuperação energética complementa a reciclagem ao promover o maior aproveitamento possível e assim atingir o propósito comum da economia de recursos naturais.
- O rejeito dos processos de reciclagem pode ainda passar por recuperação energética.
- Quando há uma queda na qualidade dos produtos reciclados após diversos ciclos de reciclagem, e quando já não é mais possível realizá-los, a recuperação energética ainda é uma opção.
- Os metais que n\u00e3o s\u00e3o separados no sistema de coleta, muitas vezes por estarem presos a outros produtos, podem ser recuperados juntos com os res\u00edduos inertes gerados ap\u00e3o a incinera\u00e7\u00e3o.
- Resíduos contém materiais e substâncias contaminados com, por exemplo, riscos sanitários para a saúde e, por conseguinte, devem ser retirados de circulação. Tais materiais podem ser incinerados com segurança enquanto geram energia.
- Países com metas ambientais diferenciadas e ambiciosas para gestão de seus resíduos sólidos possuem uma combinação de recuperação energética e de materiais. As nações com os índices mais altos de reciclagem são também as que possuem as maiores taxas de recuperação energética.
- O Brasil apresenta potencial para utilização da recuperação energética de resíduos. Isso requer setores de gestão de resíduos e infraestrutura energética bem organizados para o aproveitamento máximo desse potencial.
- Já instalada a infraestrutura elétrica, o desenvolvimento das infraestruturas de gás, aquecimento e resfriamento proporcionarão oportunidades para aumentar a eficiência da recuperação e utilização de energia.

Recuperação energética de resíduos caminha lado a lado com reciclagem e também integra a economia circular.

WtE evita um maior consumo de combustíveis fósseis e, consequentemente, ajuda na redução dos impactos climáticos.

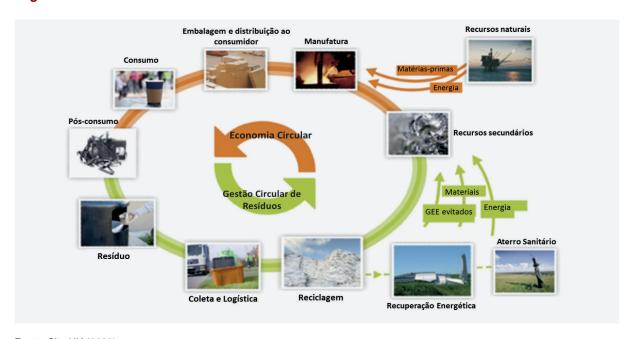




2 WTE & ECONOMIA CIRCULAR

As plantas de Waste-to-Energy realizam a recuperação energética dos rejeitos resultantes dos processos de reaproveitamento e reciclagem dos RSU e outros resíduos, atuando como canalizadores dos materiais que eventualmente prejudicariam a cadeia produtiva da reciclagem e poluiriam o meio ambiente.

Figura 2 - WtE na Economia Circular



Fonte: Sita UK (2009).

Tradução: Gabriela GPO Sartini, 2016.

Disponível em: http://umprun.com/?page_id=278.

O sofisticado sistema de limpeza dos gases de combustão é uma das partes mais importantes de qualquer sistema moderno de WtE e, portanto, permite que as plantas atualmente garantam emissões muito baixas de poluentes.

A recuperação energética é um método higiênico para tratar rejeitos e transformá-los em energia sob a forma de vapor, eletricidade ou água quente. A eletricidade é injetada na rede e distribuída para o consumidor final; a água quente, dependendo da infraestrutura local, pode ser enviada ao sistema distrital mais próximo de aquecimento/resfriamento para residências, hospitais, escritório, etc.; e o vapor pode ser aproveitado nos processos de produção da indústria mais próxima. Metais ferrosos e não ferrosos são extraídos das cinzas e reciclados, enquanto a fração mineral das próprias cinzas pode ser utilizada como material secundário na construção civil. Dessa forma, o rejeito é aproveitado como uma fonte local e sustentável de energia, bem como recursos secundários que contribuem para as metas ambientais e de segurança energética.

Cerca de 60% dos RSU no Brasil vão diretamente para aterros sanitários, ainda que o gás gerado neles (metano) contribua significativamente para o aquecimento global (25 vezes mais impactante que o CO₂). Um aterro sanitário também ocupa uma área que poderia ser aproveitada e enterra potenciais fontes preciosas de energia – uma planta WtE ajuda a desviar os rejeitos dos aterros sanitários e a energia gerada nela contribui para a proteção do clima ao substituir combustíveis fósseis que seriam queimados em plantas convencionais. Uma fração significativa dos rejeitos enviados para plantas de WtE são biogênicos (biomassa), o que significa que cerca de metade da energia gerada é de fonte renovável. O mesmo ocorre quando os resíduos orgânicos são separados na fonte, uma vez que ainda existe uma quantidade significativa de biomassa nos rejeitos que está demasiadamente poluída para compostagem de qualidade e que não é fácil de segregar.

Para desenvolver o potencial total de um sistema WtE para fornecer energia e aquecimento/resfriamento distrital, é necessário desenvolver infraestrutura. O relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnud) conclui que "os incineradores de resíduos produzem calor de baixo custo e muitas vezes iniciam o desenvolvimento da rede de aquecimento ou resfriamento de uma cidade".

No Brasil, o sistema WtE torna-se uma ponte importante entre a política energética e a economia circular, dois temas que devem ser priorizados na agenda do país; o fornecimento de energia local e sustentável dos

rejeitos que iriam para aterros sanitários contribui para as metas climáticas e a qualidade do ar.

2.1 Rejeitos em Energia

Este Guia possui foco na recuperação energética de rejeitos que não são passíveis de reciclagem ou que sobraram desse processo. Isso significa que os custos econômicos e ambientais de tentativas de segregação e limpeza desses rejeitos são maiores do que os potenciais benefícios.

Quando se fala em rejeitos, geralmente se refere a uma mistura de diferentes materiais. Uma parte é feita de petróleo, como plásticos, e outra de materiais cultivados recentemente que são biodegradáveis, como alimentos, madeira e papel.

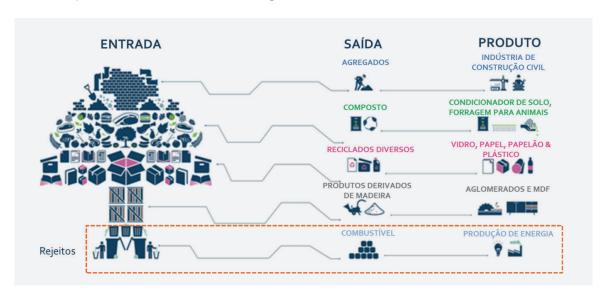
Figura 3 – Relação entre qualidade e custo da recuperação dos rejeitos para reciclagem e recuperação energética



Fonte: D-Waste, 2016.

Tradução: Gabriela GPO Sartini, 2016.

Figura 4 – Rejeitos como um subproduto de fonte de energia parcialmente renovável para um sistema sustentável de gestão de resíduos sólidos



Fonte: Renewi, 2016.

Tradução: Gabriela GPO Sartini, 2016.



3 UMA INTRODUÇÃO ÀS TECNOLOGIAS WTE

A ideia de recuperar a energia dos resíduos não é algo novo, mas só recentemente os setores de resíduos e da produção de energia se interessaram pela recuperação energética de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Tecnologias como incineração, gaseificação, pirólise e digestão anaeróbia oferecem alternativas à disposição em aterros sanitários, estruturas que, a cada dia, enfrentam mais restrições. A seguir são apresentadas breves descrições sobre cada tipo de tecnologia desenvolvida atualmente.

Incineração

As plantas de incineração são conhecidas como plantas WtE. Elas possuem uma caldeira que captura e converte o calor gerado em eletricidade e vapor; também possuem um sistema robusto de controle da poluição do ar e que limpa os gases de combustão antes de liberá-los para a atmosfera através de uma chaminé, buscando a conformidade com as regulamentações ambientais. Uma planta processa entre 50.000 e 300.000 toneladas de materiais combustíveis por ano.

Tipos de combustíveis

- Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).
- Resíduos Industriais & Comerciais.
- · Combustível Derivado de Resíduos (CDR).

Produtos gerados

- Eletricidade ou calor ou os dois se for uma planta de geração combinada de calor e eletricidade (CHP).
- Cinzas de fundo é o que sobra depois da combustão e podem ser usadas como agregados ou material de leito; delas também podem ser extraídos os metais que não foram separados previamente.
- Cinzas volantes são retidas pelo sistema de controle de poluição do ar.

Gaseificação & Pirólise

Por vezes denominadas como Tratamentos Térmicos Avançados (ATTs), as plantas de gaseificação e a pirólise realizam o tratamento térmico dos combustíveis sem permitirem entrada suficiente de oxigênio para a completa combustão. São pequenas e mais adaptáveis do que as plantas de incineração, consumindo entre 25.000 e 150.000 tons/ano de resíduos, mas algumas chegam a 350.000 tons/ano.

Tipos de combustíveis

- RSU.
- Resíduos Industriais & Comerciais.
- CDR.
- Outros combustíveis, como madeira e outros tipos de biomassa.

Produtos gerados

- Eletricidade ou calor ou os dois se for uma planta de geração combinada de calor e eletricidade (CHP).
- Syngas, que pode ser purificado e produzir "biometano", biocombustíveis, químicos ou hidrogênio.
- Bio-óleo pode ser usado nas engrenagens ou substituir o diesel.
- Insumo para a indústria química permitindo que a biomassa substitua o óleo na produção de plásticos, por exemplo.
- Cinzas de fundo, escórias subprodutos que podem ser utilizados para fins benéficos, como agregados ou material de leito de estrada.

Figura 5 – Planta de tratamento térmico avançado



Fonte: D-Waste, 2016.

Figura 6 - Planta de incineração



Fonte: D-Waste, 2016.

Digestão Anaeróbia (DA)/Biogás

Plantas de DA operam a baixas temperaturas para permitir que os microrganismos atuem sobre a matéria-prima e a transformem em biogás, uma mistura de dióxido de carbono e metano. Costumam ser bem menores que as plantas de incineração e gaseificação, e os resíduos mais apropriados são os orgânicos mais úmidos, como alimentos, lodo de esgoto, resíduos da agricultura e de culturas energéticas.

Tipos de combustíveis

- Resíduos de alimentos.
- Alguns tipos de resíduos industriais e de comércio, como os de abatedouros.
- Resíduos agrícolas e lodo de esgotos.

Figura 7 – Planta de digestão anaeróbia



Fonte: D-Waste, 2016.

Produtos gerados

- Biogás, que pode ser usado para gerar eletricidade e/ou calor – a geração combinada (CHP) é comumente realizada nessas plantas.
- Biometano para a rede de distribuição de gás, com as tecnologias apropriadas de lavagem e injeção de gases.
- Digestato material que pode ser usado como fertilizante/condicionador de solo na agricultura, em substituição aos fertilizantes químicos.

Coprocessamento em fornos de clínquer

O coprocessamento em fornos de clínquer consiste na utilização de resíduos como substitutos de combustíveis e matérias-primas convencionais no processo de fabricação de cimento, sem geração de cinzas. A porção orgânica dos resíduos é destruída e a inorgânica incorporada à estrutura do clínquer.

Tipos de combustíveis

- · Resíduos industriais e comerciais.
- Blends (mistura de resíduos com características apropriadas).
- CDR.
- Biomassa.

- Pneus.
- Resíduos sólidos urbanos tratados.

Coprocessamento é eliminação definitiva de resíduos pela sua integração na produção de cimento como matéria-prima secundária ou combustível alternativo. É uma técnica de destinação de resíduos, de forma definitiva, sem gerar passivos ambientais aproveitando o potencial energético e/ou mineral do material.

A técnica de coprocessamento utiliza os resíduos devidamente preparados que são alimentados em diferentes fases no processo de produção do clínquer, para serem usados com substitutos das matérias-primas naturais e/ou combustíveis fósseis.

A produção de cimento consiste na obtenção de minerais, por via da mineração de calcário e de argila fonte de ferro, sílica e alumínio, que passam por um processo de britagem e moagem ao qual podem ser adicionados corretivos (areia, minério de ferro e de alumínio, calcário de alto teor, etc.) até a obtenção de um pó muito fino, conhecido como "farinha".

Após homogeneização, a farinha passa pelo forno, onde sofre um processo térmico controlado (temperatura mínima requerida 1.450 °C) para obtenção de um subproduto denominado clínquer. Neste processo térmico, os combustíveis assumem um papel preponderante, podendo ser ou de origem fóssil – e como tal não renováveis – ou resíduos com poder energético (ex.: pneus usados, resíduos urbanos tratados, borras oleosas, rejeitos de biomassa, etc.). As cinzas resultantes do processo de combustão são também reincorporadas no processo. O clínquer, juntamente com o gesso e outros aditivos, são moídos, finalmente, dando origem aos diversos tipos de cimento

Por essas características, os resíduos têm seu potencial energético totalmente aproveitado e as cinzas incorporadas ao clínquer sem geração de nenhum subproduto ou novo resíduo.

A vantagem do coprocessamento face à maioria das alternativas de destinação de resíduos assenta-se fundamentalmente no fato de:

- Apresentar uma valorização dos resíduos.
- Não desperdiçar recursos, uma vez que os reutiliza como matérias-primas e combustíveis.
- Não apresentar riscos de contaminação do solo e lençóis freáticos e outros associados.
- Não trazer impactos negativos para a sociedade (ex.: odor, ocupação de terrenos por períodos longos).

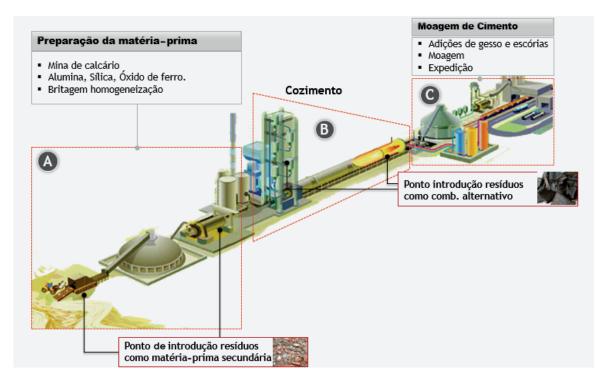
- Ser a mais eficiente na recuperação do calor.
- Requerer menores investimentos específicos para eliminação de resíduos.
- Submeter os resíduos a temperaturas muito mais elevadas (mínima de 1.450 °C), em ambiente altamente controlado, garantindo a sua combustão completa.
- Possibilitar a redução da emissão de gases de efeito estufa (CO₂)
 e um controle rigoroso de emissões.
- Não gerar qualquer resíduo (cinzas e escórias são reincorporadas ao cimento sem alterar a sua qualidade ou composição química).
- Preservar recursos naturais n\u00e3o renov\u00e1veis.
- Contribuir com a economia circular.

A utilização dos fornos de clínquer, para recuperar a energia e a parte mineral dos resíduos, tem dado à indústria de cimento um novo e relevante papel no âmbito da promoção da sustentabilidade e do equilíbrio ambiental, contribuindo ainda com a redução dos gases de efeito estufa.

O coprocessamento representa, em muitos casos, a solução mais eficiente e econômica para a gestão de resíduos sem representar risco à qualidade do cimento e ao meio ambiente.

O coprocessamento contribui diretamente para o Desenvolvimento Sustentável do país, pois permite contribuir com o crescimento da sociedade, na participação e na geração de riquezas do país, permitindo, ao mesmo tempo, tratar os resíduos, reduzir as emissões dos gases de efeito estufa e os consumos de matérias-primas naturais e combustíveis fósseis de origem não renovável.

Figura 8 – Processo da produção de clínquer com pontos de alimentação de resíduos para coprocessamento



Fonte: ABCP, 2018.

Figura 9 - Resumo ilustrado da definição de coprocessamento

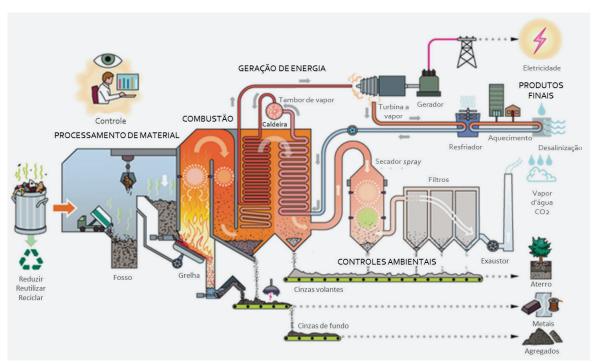
Operação combinada Técnica Técnica de destinação e destruição de Produzir Cimento resíduos de maneira com qualidade definitiva, sem geração de Passivos Utilizar o forno de Ambientais, Cimento para a aproveitando o destruição de resíduos potencial energético e/ou mineral do material

Fonte: ABCP, 2018.



A incineração é um processo de combustão controlada (GIDARAKOS; AIVALIOTI, 2007), que queima os resíduos e os converte em gases não combustíveis.

Figura 10 - Planta-padrão de incineração de RSU



Fonte: GLOBAL Business & Development Construction LTD, sem data.

Tradução por: Gabriela GPO Sartini, 2016.

Disponível em: https://globalbdconstruction.com/Energy-Solution.

O processo de incineração requer um ambiente rico em oxigênio para transformar os resíduos em vapor d'água, dióxido de carbono e calor. Nas plantas de WtE, são aplicáveis três sistemas diferentes de incineração, sendo o primeiro a seguir o mais utilizado e popular:

- Grelhas móveis: o incinerador convencional possui em uma grelha móvel situada na parte inferior e que consiste em uma zona de queima que transporta o material através do forno. Na grelha, os resíduos são desidratados e depois queimados a altas temperaturas com o auxílio de injeção de ar. As cinzas de fundo deixam a grelha através de uma calha; a escória é resfriada em banho-maria e descarregada por um exaustor hidráulico, um dispositivo projetado especificamente para esse fim. A água do banho de resfriamento também fornece um gás vedante para o forno e impede a entrada de ar e saída de poeira e fumos. A grelha móvel, se bem executada, transporta e agita eficientemente os resíduos, assim como distribui uniformemente o ar de combustão. A grelha pode ser seccionada em zonas individualmente ajustáveis, e o ar de combustão pode normalmente ser pré-aquecido para acomodar variações no valor calorífico dos resíduos. As grelhas são desenhadas para incinerar resíduos com poder calorífico de 7.800 kJ/kg a 12.500 kJ/kg sem demandar combustível adicional. Pequenas unidades modulares pré--fabricadas recebem entre 5 tons/dia e 200 tons/dia, e plantas maiores são capazes de processar até 3.000 tons/dia. Grelhas móveis são amplamente utilizadas para RSU misturados, mas também recebem resíduos comerciais, industriais não perigosos, de saúde e lodo de esgotos.
- Forno rotativo: um incinerador com forno rotativo conduz a queima dos resíduos em camadas em um cilindro rotativo inclinado, que transporta o material pelo forno através de suas rotações. O forno rotativo geralmente possui revestimento refratário, mas também pode ser equipado com paredes de água. O cilindro pode ter de 1 a 5 metros de diâmetro e 8 a 20 metros de comprimento, e sua capacidade começa em 2,4 tons/dia (100 kg/h) e chega a 480 tons/dia (20 tons/h). A proporção de ar é bem maior do que as demais tecnologias de incineração; consequentemente, a eficiência energética é ligeiramente inferior e de até 80%. Como o tempo de retenção dos gases de combustão é usualmente muito curto para uma combustão completa no próprio forno rotativo, e para garantir a destruição de componentes tóxicos, o cilindro é seguido por e interligado a uma câmara de pós-combustão que pode ser incorporada na primeira parte

da caldeira. O forno rotativo também pode ser usado em combinação com uma grelha móvel, onde esta atua como a peça de ignição e o forno rotativo é a seção de queima. Isso resulta em níveis muito baixos de material não queimado em meio à escória, que é expurgada do forno através de uma calha. Em fornos rotativos, podem ser tratados resíduos sólidos, líquidos e gasosos, bem como lodos de esgotos. A queima adicional com resíduos líquidos ou combustível adicional pode ser realizada para manter as temperaturas necessárias para assegurar a destruição dos resíduos a incinerar.

Leito fluidizado: essa tecnologia é baseada no princípio de que as partículas sólidas são misturadas com o combustível e fluidizadas pelo ar. O reator (depurador) consiste de um recipiente vertical de aço com revestimento refratário, contendo um leito de material granular, como areia de sílica, calcário ou um tipo de material cerâmico. A tecnologia de leito fluidizado possui uma série de características atraentes em relação à incineração: redução de substâncias perigosas no reator de leito fluidizado, alta eficiência térmica, flexibilidade em relação à entrada de múltiplos combustíveis e custo. A principal desvantagem para o tratamento de resíduos é a necessidade do processo de pré-tratamento dos materiais para atender aos requisitos bastante rigorosos de tamanho, valor calorífico, teor de cinzas, e assim por diante. Devido ao conteúdo heterogêneo dos RSU, pode ser difícil produzir um combustível que atenda aos requisitos mínimos em qualquer ponto. Assim, o leito fluidizado é amplamente aplicado à incineração de resíduos classificados como CDR e lodos de esgoto.

A energia gerada pela incineração deixa o forno como gás de combustão a uma temperatura de aproximadamente 1.000-1.200 °C, que então é resfriado por uma caldeira onde a energia liberada da incineração é inicialmente recuperada como água quente ou vapor. Incineradores podem gerar entre 475 kWh e 800 kWh de energia excedente por tonelada de RSU (CONSONNI, 2005; KLEIN, 2002).





Fonte: D-Waste, 2016.



Gaseificação é uma combinação de oxidação parcial e volatilização dos compostos orgânicos contidos, que ocorre em condições de temperatura similares à da incineração e converte a fração orgânica da mistura em syngas, um gás combustível sintético, sob condições controladas de calor e oxigênio. Devido ao aumento da temperatura desenvolvida durante a gaseificação, os óxidos complexos e possivelmente os materiais perigosos produzidos durante a combustão são divididos em gases simples (ADVANCED ENERGY STRATEGIES, 2004). O syngas produzido pelo processo de gaseificação possui uma variedade de aplicações, como a produção de diversos produtos químicos, incluindo metanol e amônia (BELGIORNO, 2003). A gaseificação é adequada para o tratamento de RSU de composição homogênea, certos resíduos perigosos e lodos de esgoto desidratados. É importante considerar nesse processo o tamanho e a consistência dos resíduos para assegurar que estão dentro dos limites predefinidos, o que demanda certo pré-tratamento específico.

Na gaseificação por plasma é utilizada uma tocha de plasma alimentada por um arco elétrico para a gaseificação dos resíduos. O plasma térmico é uma mistura de íons, elétrons e partículas neutras, e é capaz de destruir qualquer ligação química. Sua criação ocorre pela ionização de um gás devido à criação de um arco elétrico sustentável entre o cátodo e o ânodo de uma tocha de plasma. As moléculas gasosas forçadas a colidir com elétrons carregados resultaram na criação de partículas carregadas que conduzem a eletricidade. O plasma está próximo do equilíbrio local devido à alta mobilidade dos elétrons, que mantêm as partículas pesadas (íons, átomos e moléculas) à mesma temperatura, enquanto dada energia elétrica é captada pelos elétrons e transferida para as partículas pesadas por colisão elástica.

O plasma pode ser gerado por corrente contínua, descarga elétrica, radiofrequência e descargas de micro-ondas. Para o tratamento de resíduos, o plasma é gerado preferencialmente por descarga elétrica de corrente contínua, utilizando dois tipos de dispositivos: arco transferido e não transferido, sendo este último utilizado com maior frequência, uma vez que permite a boa mistura do plasma e dos resíduos, e não requer os fluxos elevados de calor para o tratamento de resíduos.

As principais vantagens da gaseificação por plasma são: a) as altas densidades; e b) altas temperaturas permitidas.

- Alta taxa de transferência de calor e reagentes.
- Dimensão menor das instalações.
- Arranque e desligamento rápidos.

Além disso, o uso de eletricidade como entrada desassocia a geração de calor do potencial de oxigênio, permitindo, assim, melhor controle da unidade de processamento.

O principal inconveniente desta tecnologia é o uso de eletricidade, pois é uma forma muito cara de energia. Além disso, há uma falta de dados sobre a confiabilidade do tratamento com plasma que poderia impedir seu desenvolvimento em grandes escalas (DUCHARME, 2010).

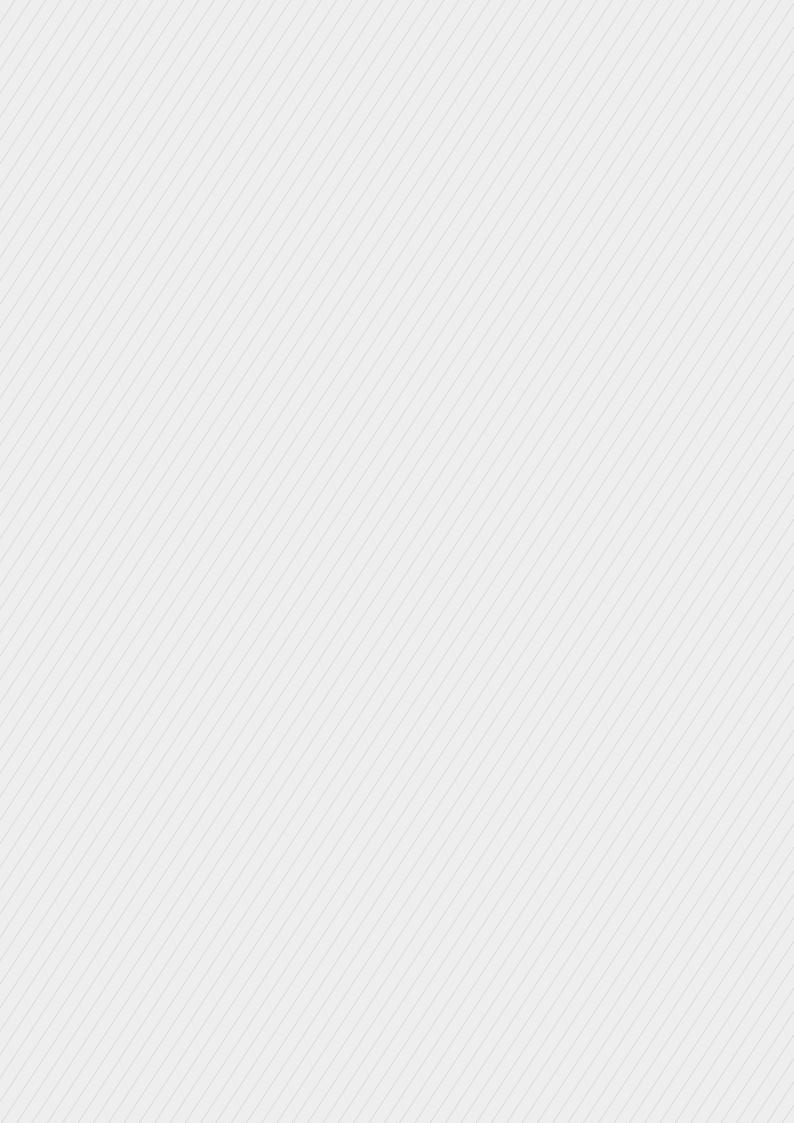
A gasificação por plasma tem sido estudada há muito tempo por cientistas e engenheiros para a sua utilização no tratamento de resíduos, devido à sua capacidade única de vaporizar e destruir qualquer ligação química, mas atualmente a única instalação comercial por arco de plasma que trata RSU é no Japão, em Utashinai, operado por Hitachi metals e Alter NRG.

Pirólise é um processo similar à gaseificação, mas ocorre na ausência de oxigênio e entre temperaturas de 400 °C - 900 °C, gerando gás de pirólise e coque. A pirólise é um estágio do processo de gaseificação, mas pode ser aplicada por si só como uma forma de tratamento de resíduos. Seus principais combustíveis são RSU e CDR, mas, devido às altas temperaturas, pode tratar também resíduos perigosos e lodo de esgotos desidratado. O valor calorífico do gás de pirólise fica entre 5 MJ/m³ e 15 MJ/m³ para RSU e entre 15 MJ/m³ e 30 MJ/m³ para CDR.

Tanto o syngas quanto o gás de pirólise podem ser queimados para gerar calor ou converter água em vapor para rodar as turbinas. O gás também pode ser usado em motores de combustão para operar o gerador; se o syngas for purificado, ele pode ser usado em uma turbina de gás de ciclo combinado com potencial para maior eficiência (BELGIORNO, 2003).

O processo de gaseificação possui potencial para produzir entre 600 kWh e 1.000 kWh de eletricidade excedente por tonelada de RSU (KLEIN, 2002; SRI INTERNATIONAL, 1992).

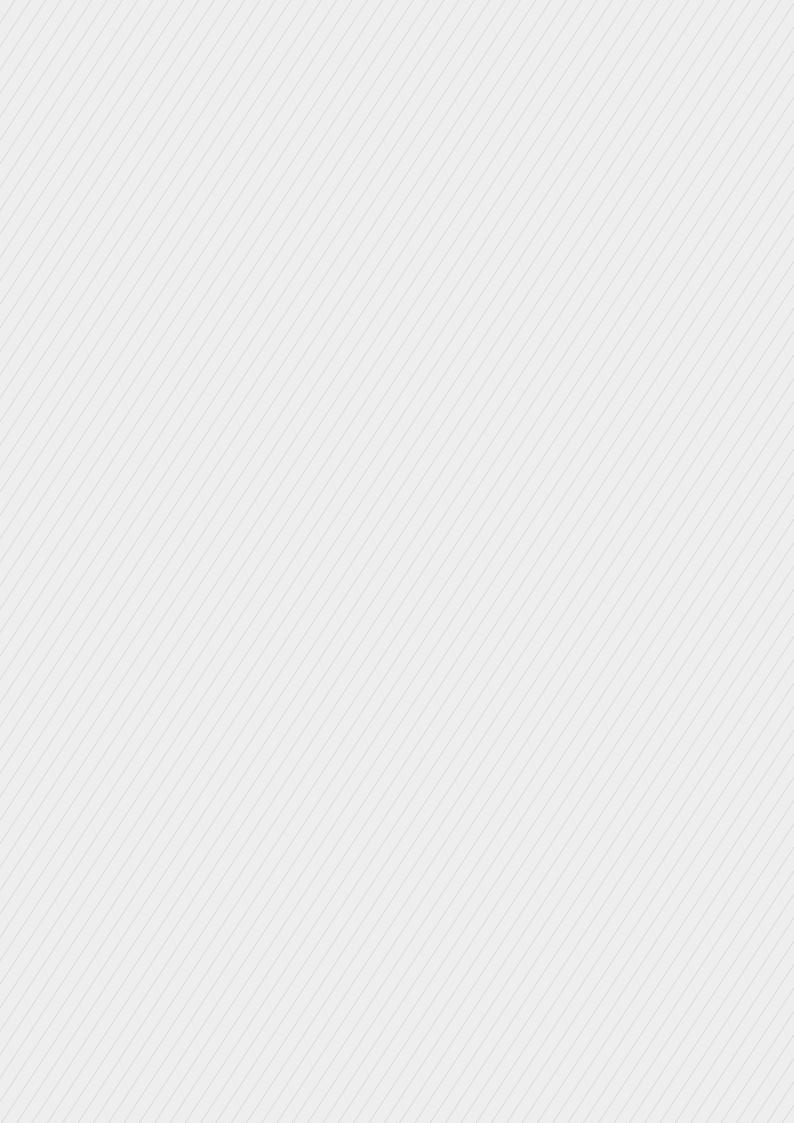
Ambas as tecnologias estão em fase de demonstração/teste ao redor do mundo e ainda tentando alcançar a viabilidade comercial de seus resultados.





A Digestão Anaeróbia (DA) é o processo de transformação de materiais orgânicos em metano, dióxido de carbono e fertilizantes, ocorrendo em ambiente natural ou realizada em um digestor. A maior parte dos sistemas de DA demanda o pré-tratamento dos resíduos de forma a obter uma mistura homogênea: basicamente segregação dos materiais indesejados e trituração. Os resíduos recebidos são geralmente segregados na fonte ou segregados mecanicamente – o que garante a remoção de materiais indesejados, como vidros, metais, pedras, etc. Na separação na fonte, evita-se a mistura dos resíduos orgânicos com outros tipos de resíduos; já a segregação mecanizada realizada a separação do que foi misturado.

A DA é um processo de três etapas em que as bactérias convertem os compostos orgânicos em moléculas solúveis, que depois são convertidas em ácidos orgânicos e estes são finalmente transformados em biogás, cuja composição inicial é de metano e dióxido de carbono. O biogás pode ser captado e utilizado para a geração de calor e eletricidade (THEMELIS; ULLOLA, 2007) e um digestor pode gerar entre 140 kWh e 150 kWh de eletricidade excedente (MURPHY; MCKEOGH, 2004).





7.1 Insumos

Incineração – tipos de combustíveis:

- Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).
- Resíduos Industriais & Comerciais.
- Combustível Derivado de Resíduos (CDR).

Digestão Anaeróbia – tipos de combustíveis:

- Resíduos de alimentos.
- Alguns tipos de resíduos industriais e de comércio, como os de abatedouros.
- Resíduos agrícolas e lodo de esgotos.

Gaseificação, Plasma & Pirólise – tipos de combustíveis:

- Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).
- Resíduos Industriais & Comerciais.
- Combustível Derivado de Resíduos (CDR).
- Outros combustíveis, como madeira e outros tipos de biomassa.

O tipo de insumo de um incinerador é importante para determinar a tecnologia a ser aplicada. Os processos projetados para uma faixa específica de insumos geralmente podem ser mais otimizados do que aqueles que recebem uma grande variedade de resíduos. Assim, existe um espaço para melhorias na estabilidade do processo e no desempenho ambiental do sistema e pode permitir uma

simplificação de operações posteriores, tais como limpeza de gases de combustão, que representam aproximadamente 15% a 35% do investimento total de capital.

Partindo do princípio de que as plantas de WtE precisam de um combustível para seus fornos, este insumo deve apresentar características específicas para trabalhar adequadamente e de acordo com o esperado. Os principais condutores de uma planta bem operada são:

- A composição química (carbono, hidrogênio, cloro, etc.).
- As características físicas (granulometria, formato, etc.).
- As características térmicas (poder calorífico, umidade, etc.).

A composição química dos resíduos desempenha papel importante, pois seu conteúdo é liberado na câmara de combustão e transferido para o gás de combustão, as cinzas de fundo e as cinzas volantes, o que demandará tecnologias avançadas adequadas de prevenção à poluição (limpeza dos gases, etc.) dentro dos parâmetros ambientais.

A composição física dos resíduos, juntamente com as características térmicas, desempenha papel fundamental na operação adequada de uma planta WtE, uma vez que são os dois fatores que sustentam um processo de combustão sem combustível suplementar. Quanto menor o tamanho de partícula, maior o valor calorífico inferior e mais fácil é queimá-la completamente. De acordo com os padrões do Banco Mundial, o valor calorífico médio dos resíduos deve ser de pelo menos 6 MJ/kg em todas as estações, enquanto o valor calorífico médio inferior não deve ficar abaixo de 7 MJ/kg/ano.

Os dois parâmetros que causam o menor poder calorífico dos insumos são:

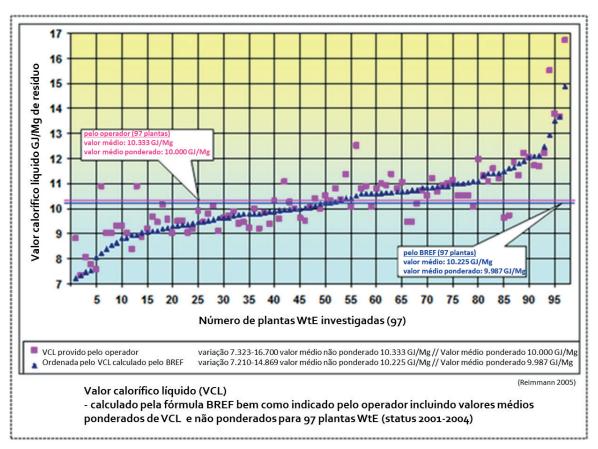
- Umidade.
- Os materiais n\u00e3o combust\u00edveis na mistura dos RSU.

O aumento do teor de umidade e de materiais não combustíveis resulta em valores caloríficos baixos, uma vez que a energia necessária para a sua vaporização não é libertada como valor de calor. Os materiais não combustíveis na mistura dos insumos, principalmente vidro e metais, acabam nas cinzas de fundo, enquanto os vapores de água do processo de combustão e o teor de umidade do combustível se dispersam com os gases de combustão.

Em muitos países em desenvolvimento, os RSU têm alto teor de umidade e/ou materiais não combustíveis; dessa forma, deve-se realizar um estudo exaustivo para determinar se é viável incinerar durante todo o ano, uma vez que as variações sazonais podem afetar significativamente a combustibilidade dos resíduos. Resíduos das indústrias e dos comércios (exceto feiras) geralmente possuem valor calorífico mais elevado do que o dos resíduos domiciliares. Resíduos da construção e demolição que possuam certos componentes perigosos ou inflamáveis não são adequados para incineração.

Na Figura 12, observa-se a grande variedade de valores caloríficos baixos utilizados em 97 plantas de WtE na Europa, conforme relatório da CEWEP (REITMAN, 2007); os valores variam de 8 MJ/kg a 14 MJ/kg, sendo este valor mais alto referente às plantas que utilizam insumos que misturam RSU com resíduos industriais, enquanto os menores valores representam as unidades que utilizam RSU com alto teor de umidade.

Figura 12 – Variação do valor calorífico dos RSU para as plantas WtE europeias



Fonte: Reimmann, 2005.

Tradução por: Gabriela GPO Sartini, 2016.

Na Tabela 1, é apresentado o VCL típico de cada tipo de resíduo (EUROPEAN COMISSION, 2006).

Tabela 1 - Valor calorífico líquido para diferentes tipos de resíduos

Tipo de insumo	Comentários e exemplos	VCL da substância original (incluindo umidade) Variação GJ/t Média GJ/t		
RSU misturado	Resíduos domiciliares misturados	6.3-10.5	9	
Resíduos volumosos	Móveis, etc.	10.5-16.8	13	
Similares a RSU	Resíduos similares aos domiciliares, gerados em lojas, shoppings, escritórios, etc.	7.6-12.6	11	
Rejeitos gerados pós- -processo de reciclagem	Fração eliminada dos processos de compostagem e recuperação de materiais secos	6.3-11.5	10	
Resíduos comerciais	Resíduos coletados separadamente de geradores comerciais	10-15	12.5	
Embalagens	Coleta seletiva de embalagens pós-consumo	17-25	20	
CDR	Pellets ou material floculado produzido de RSU e outros não perigosos similares	11-26	18	
Resíduos industriais específicos	Rejeitos industriais de plástico ou papel	18-23	20	
Resíduos perigosos	Denominados resíduos químicos ou especiais	0.5-20	9.75	
	Provenientes de tratamento de águas residuais	Veja abaixo	Veja abaixo	
Lodos de esgotos	Bruto (desidratado a 25% de sólidos secos)	1.7-2.5	2.1	
	Digerido (desidratado a 25% de sólidos secos)	0.5-1.2	0.8	

Fonte: European Commission, 2006. Tradução por: Gabriela GPO Sartini, 2016.

7.2 Produtos

O tratamento térmico dos resíduos pode ser considerado como uma resposta às ameaças ambientais causadas por fluxos de resíduos mal gerenciados ou não gerenciados, dado que, durante o seu processo, ocorre a combustão de substâncias orgânicas contidas nos resíduos e que se transformam em energia (eletricidade, calor). Através do processo de recuperação energética, são gerados eletricidade e calor, logo há a possibilidade de recuperação do conteúdo mineral dos resíduos, bem como a produção de combustíveis, como CDR e materiais inertes que podem ser aplicados na construção civil.

Figura 13 - Produtos típicos das plantas WtE



Fonte: D-Waste, 2016.

Tradução por: Gabriela GPO Sartini, 2016.

A Tabela 2 apresenta intervalos aproximados para as potenciais eficiências nas instalações de recuperação energética em uma variedade de situações. Deve-se ter em mente que esta tabela representa apenas uma média para comparar o que será alcançado em boas circunstâncias e que os números reais serão variados de acordo com a localização da planta.

Tabela 2 – Conversão do potencial energético para diferentes tipos de instalações de incineração de resíduos

Tipos de planta	Potencial reportado de eficiência térmica % (Calor + eletricidade)/saída de energia da caldeira)
Apenas geração de eletricidade	17-30
Planta de geração combinada de calor e eletricidade (CHP)	70-85
Estações de aquecimento com venda de vapor e/ou água quente	80-90
Venda de vapor para grandes indústrias químicas	90-100
CHP e plantas de aquecimento com condensação de umidade no gás de combustão	85-95
CHP e plantas de aquecimento com condensação e bombas de calor	90-100

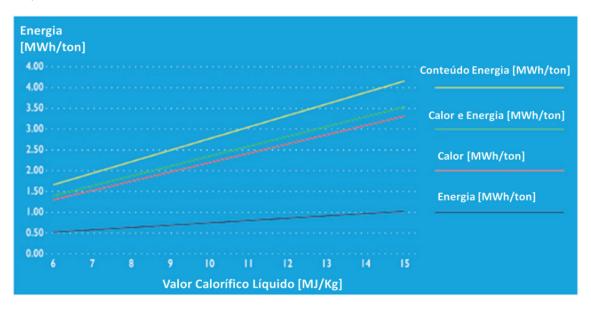
Nota: os valores referidos neste quadro são derivados da adição simples dos MWh de calor e de MWh produzidos, divididos pela produção de energia da caldeira. Não são tidos em conta de forma exaustiva outros fatores importantes, tais como: demanda de energia (combustíveis de apoio, entradas de eletricidade); valor relativo de ${\rm CO_2}$ da eletricidade e da fonte de calor (geração deslocada).

Fonte: European Commission, 2006. Tradução por: Gabriela GPO Sartini, 2016. Abaixo são apresentados os **principais** produtos das plantas de recuperação energética e seus ganhos ambientais, sociais e econômicos.

Eletricidade & Calor

O calor da combustão dos resíduos é utilizado para gerar vapor, que então alimenta uma turbina que gerará eletricidade e/ou calor – ao produzir uma combinação de calor e energia, é possível usar até 80% da energia dos resíduos. Quando há a combinação de energia e aquecimento/resfriamento para distribuição urbana, é utilizada uma turbina de contrapressão. A quantidade típica de energia líquida que pode ser produzida por tonelada de RSU é de cerca de 2/3 MWh de eletricidade e 2 MWh de aquecimento urbano (RENOSAN; RAMBOLL, 2006).

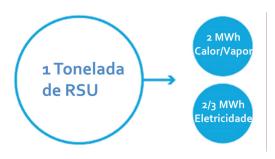
Figura 14 – Conteúdo energético e produção de energia dependendo do poder calorífico



Fonte: preparado por D-Waste, 2016. Traducão por: Gabriela GPO Sartini, 2016.

Em países com menor demanda de calor/ano, mas com maiores exigências de resfriamento, deve-se escolher a solução para este produto. O resfriamento para áreas urbanas é a produção centralizada e a distribuição de energia de arrefecimento, uma alternativa sustentável à eletricidade convencional ou sistemas de ar-condicionado a gás. A água refrigerada é distribuída por uma tubulação isolada subterrânea para escritórios, indústrias e residências para diminuir a temperatura do ar que passa pelo sistema de ar-condicionado do edifício. Grandes unidades podem ser colocadas centralmente para abastecer grandes distritos,

enquanto pequenas unidades podem ser localizadas em prédios que requerem resfriamento e conectadas a um sistema de resfriamento local.



Geração típica de energia de uma planta CHP com entrada de RSU a 10 MJ/kg (2,8 MWh/ton) de poder calorífico líquido

Benefícios:

- A energia produzida substitui a da combustão de combustíveis fósseis.
- Menor geração de gases do efeito estufa (GEE) em comparação com outros combustíveis.
- Sistema de aquecimento e/ou resfriamento de baixo custo para edifícios próximos.
- Auxilia a rede nacional de fornecimento de eletricidade a atender à demanda.
- Energia renovável no balanço energético nacional.
- As plantas WtE podem cobrir as próprias demandas por vapor e calor.

Tabela 3 - Fatores de emissões de diferentes combustíveis

Combustível	Carvão	Gasolina	Gás natural	Resíduo
CO ₂₋ (kg/GJ)	95	74	57	18
CH _{4 -} (g/GJ)	1,5	1,5	15	0,6
$N_2O - (g/GJ)$	3	2	1	1,5
SO ₂₋ (g/GJ)	45	23	0	23,9
NO _{x-} (g/GJ)	130	52	50	124

Fonte: Renosan & Ramboll, 2006. Tradução por: Gabriela GPO Sartini, 2016.

Combustíveis

Syngas, óleos, entre outros combustíveis, são produtos das plantas de gaseificação e pirólise que podem ser usados para aumentar a produção de vapor e, consequentemente, de eletricidade e calor. Também podem ser purificados para queima direta em motores ou turbinas a gás,

convertidos em combustíveis para transportes, ou transformados em gás natural sintético (DEFRA, 2014).

- Uso de combustível renovável com baixo custo.
- Energia neutra em carbono.
- Emissões reduzidas de GEE.
- Dispensa a energia de combustíveis fósseis.

Escória e/ou cinzas de fundo

Qualquer material não combustível (metais, vidro, pedras) permanece como um sólido, conhecido como cinzas de fundo, que também contém uma pequena quantidade de carbono residual, enquanto a escória é um produto da gaseificação. A escória e/ou as cinzas de fundo podem ser usadas como agregado de baixo custo na construção civil, bem como os metais da cinza podem ser recuperados e reciclados (DEFRA, 2014).

Benefícios:

- Reúso dos inertes na construção civil.
- Agregados de baixo custo.
- Economia de espaço nos aterros sanitários.
- · Recuperação dos metais para a reciclagem.

Cinzas Volantes

Cinzas volantes são resíduos dos sistemas de controle da poluição do ar nas plantas WtE, geralmente misturados com cinzas da caldeira, e correspondem a 2% – 3% do peso original do insumo; são compostos por inertes, partículas minerais, sais solúveis variáveis (por exemplo, NaCl) e compostos de metais pesados (dos quais o cloreto de cádmio é prontamente solúvel). Para minimizar o risco de poluição, as cinzas volantes devem ser pré-tratadas e depositadas em condições controladas de aterro sanitário.

Insumos & Produtos - DA

Figura 15 - Insumos e produtos típicos de uma planta DA



Fonte: D-Waste, 2016.

Tradução por: Gabriela GPO Sartini, 2016.

Matéria orgânica

O insumo do digestor anaeróbio é de origem orgânica, geralmente de mistura selecionada de RSU, resíduo orgânico separado na fonte, lodo de esgoto, resíduos da agricultura, etc. Foi provado que as características físico-químicas do insumo de um digestor desempenham papel crucial na eficiência do processo em termos de quantidade e qualidade do biogás produzido e do digestato. Além disso, as características do substrato são cruciais para evitar qualquer inibição do processo e qualquer tipo de mau funcionamento do reator.

Biogás

A produção de biogás de plantas DA depende muito da configuração do reator e da fonte do insumo orgânico (SAINT-JOLY; DESBOIS; LOTTI, 2000). Muitos relatórios na literatura indicam o desempenho de digestores de RSU em termos de produção de biogás por peso úmido de

RSU tratado (ver Tabela 4). As plantas em grande escala, normalmente, atingem rendimentos de biogás de 0,10-0,15 m³/kg úmido.

Tabela 4 – Produção de biogás em digestores de larga escala que tratam uma variedade de RSU orgânicos úmidos

Referência	Planta	Localização	Produção média biogás (m3/kg)
		França	0.144
14	Valorga	Holanda	0.93
		Alemanha	0.127
		Itália	0.180
	_	Itália	0.60
	Valorga - -	França	0.145
45		Holanda	0.92
15		Alemanha	0.126
		Alemanha	0.147
	Dranco	Bélgica	0.103
	_	Áustria	0.135
16	BTA (processoúmido)	Alemanha	0.92
47	Kompogas	Suíça	0.90
17	ISKA	Alemanha	0.40
Média geral			0.112

Fonte: D-Waste, 2016.

Tradução por: Gabriela GPO Sartini, 2016.

O biogás produzido em condições ótimas tem um conteúdo energético de cerca de 20-25 MJ/m³. As eficiências de conversão elétrica variam de acordo com a planta de combustão. A experiência prática com motores de combustão de pequena escala com uma potência nominal inferior a 200 kW indica uma eficiência de conversão elétrica de cerca de 25%; as instalações maiores (até 17.000 kW) podem ter uma maior eficiência de conversão de cerca de 36%. Há também a possibilidade adicional de aquecer a água do escape do motor que pode aumentar a eficiência total da conversão a 65-85% (IEA BIOENERGY, 1997).

Estimativas sobre a utilização da eletricidade pela planta variam muito. Nas usinas rurais, aproximadamente 20% da eletricidade produzida no processo é necessária à operação da planta, enquanto as usinas urbanas podem utilizar dois terços da eletricidade produzida.

A produção de biogás e, consequentemente, o potencial de produção de energia são maiores nos resíduos orgânicos de coleta seletiva. Por

exemplo, relatórios (MATA-ALVAREZ, 2010) sobre resíduos orgânicos (com uma fração de resíduos de poda e jardinagem) informam uma produção de biogás entre 90-150 m³/t, equivalente a uma produção de eletricidade entre 90-150 kWh/ton (valor líquido excedente após consumo interno). Quanto maior a fração orgânica presente na mistura, maiores são os valores da produção de biogás e energia. Sobre o tema, Neiva Correia et al. (2008) obtiveram valores de energia elétrica superiores a 160 kWh/t através do processamento de resíduos orgânicos objeto de coleta seletiva de grandes geradores (sem a fração de resíduos de poda e jardins).

Digestato

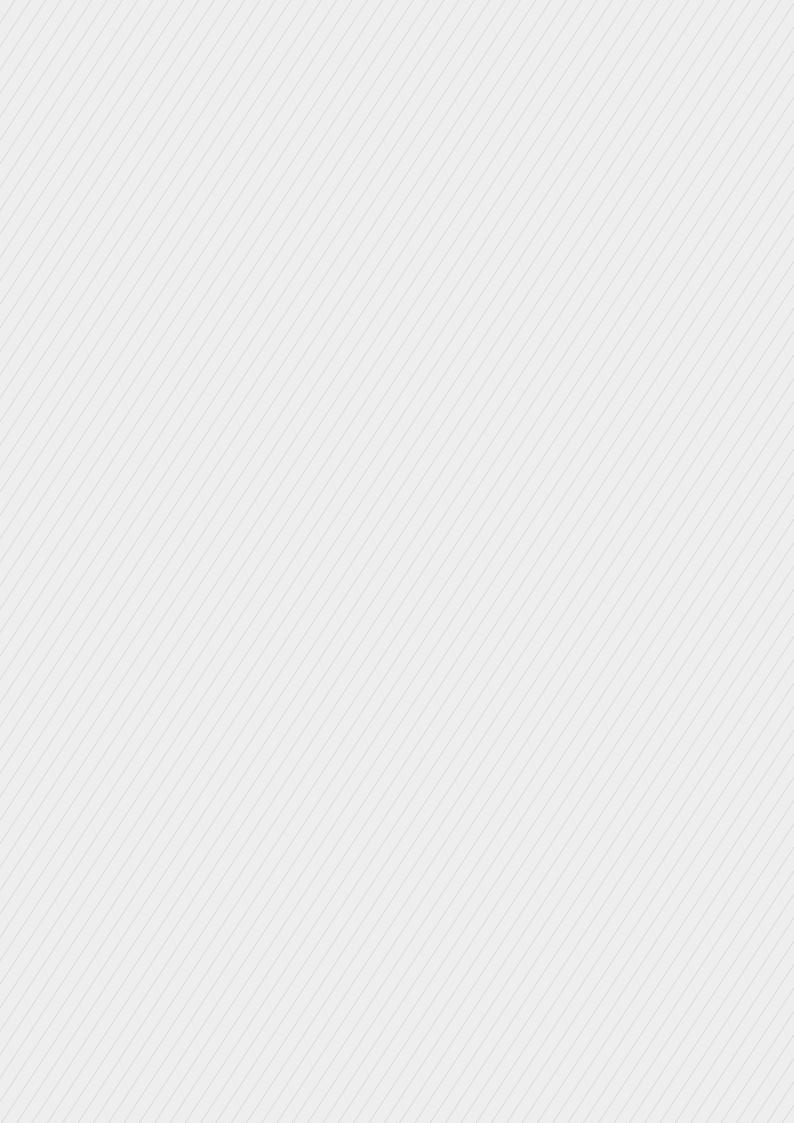
O principal produto da DA é o digestato, rico em nutrientes. Sua qualidade deve ser aceitável para fins, como alteração do solo ou paisagismo, e deve ser avaliada em três critérios: aspectos químicos, biológicos e físicos. Os aspectos químicos da gestão da qualidade do digestato estão relacionados com:

- Metais pesados e outros contaminantes inorgânicos.
- · Poluentes orgânicos persistentes (POPs).
- Nutrientes (NPK).

Para se obter um produto de alta qualidade, com alto valor, o digestato é transformado em composto, o que deve garantir uma degradação completa dos componentes orgânicos, assim como fixar o nitrogênio mineral na fração semelhante ao húmus. O teor de água do digestor também é interessante para a gestão da umidade no processo de compostagem.



Energia típica resultante de uma planta otimizada de biogás para resíduos orgânicos domiciliares



8 COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS (CDR)

O Combustível Derivado de Resíduos (CDR) é uma opção importante para a recuperação energética de resíduos e pode potencialmente contribuir para a gestão sustentável dos recursos e para a eficiência e segurança energética; é produzido a partir de materiais combustíveis dos resíduos após considerável processamento mecânico e muitas vezes biológico. Sua fonte principal são os **rejeitos**, a fração **não reciclável** resultante de plantas de Tratamento Mecânico-Biológico (TMB) (SALA; CALCATERRA, 2004; PULCHET, 2000), mas também de outros fluxos de rejeitos, como os industriais não perigosos (ex., lascas de madeira, aparas de produção de plásticos, etc.). O CDR deve cumprir critérios específicos de qualidade ambiental e técnica de normas nacionais ou internacionais; podem ser cocombustível juntamente com os tradicionais, substituindo fontes de energia primária, como combustíveis fósseis (por exemplo, carvão, óleo combustível pesado), em indústrias intensivas em energia como fornos de cimento ou de cal, e caldeiras industriais (por exemplo, aço, papel). Alternativamente, pode ser utilizado em instalações de recuperação energética dedicadas à "monocombustão", como plantas de gaseificação ou de pirólise.

Mercado atual & aplicação

Atualmente há um mercado global muito promissor para o CDR, mas deve-se ter em mente que esse mercado depende muito da capacidade de garantir uma qualidade adequada e constante para cada tecnologia de recuperação térmica, algo desafiador devido à alta heterogeneidade e carga poluente dos RSU transformados em CDR. A mudança fundamental para a fabricação de CDR está na qualidade

requerida, algo relacionado com a compreensão e previsão da gestão dos fluxos de materiais nas plantas TMB (componentes individuais, valor calorífico, teor de cloro, etc.).

Uma das principais vantagens do CDR é que o reprocessamento extensivo dos resíduos ocasiona a perda gradual de sua carga poluente em comparação com os RSU ainda não processados, o que resulta em investimento menor nos sistemas de controle da poluição do ar (CPA), cujo custo é alto. Este é o caso quando o CDR é usado como a única matéria-prima em plantas de gaseificação; de qualquer forma, os sistemas CPA são necessários em todas as tecnologias de recuperação térmica utilizando CDR.

A intenção principal do CDR produzido é utilizá-lo como um combustível de substituição em instalações já existentes e em operação com uso intensivo de energia, tais como fornos de cimento (CEMEX, 2009; GENON; BRIZIO, 2008). O grau de substituição dos combustíveis originais por CDR varia dependendo da compatibilidade de suas propriedades com o processo de recuperação térmica, tipicamente concebido para combustíveis fósseis, bem como o comportamento geral da mistura durante a produção de energia (WU et al., 2011; WAGLAND et al., 2011). Em plantas concebidas para a cocombustão de CDR com combustíveis fósseis, tais como pneus triturados, o grau de substituição depende da qualidade comparável do CDR com o resto dos combustíveis, juntamente com disposições legais relacionadas.

Plantas WtE e CDR

WtE geralmente se refere a plantas de recuperação energética de resíduos misturados não transformados, mas o processamento e a modernização de resíduos em CDR abrem novas possibilidades para a recuperação do seu potencial energético nessas plantas, quer devido a uma baixa qualidade ou à falta de garantia de outros pontos de recuperação térmica. Inclusive, a construção de plantas de gaseificação ou pirólise para recuperar CDR pode ser uma opção-chave.

Recuperação térmica

A produção de CDR é considerada a única opção viável de recuperação da grande quantidade de energia contida nos rejeitos de RSU quando há plantas de consumo intensivo de energia, como as cimenteiras e usinas de energia. O processamento avançado em plantas TMB resultou na descontaminação da fração combustível e assim a energia é conservada do aquecimento da fração inerte (ao redor 3% da entrada de energia

em plantas WtE) (VELIS, 2012). No entanto, esses benefícios devem ser comparados com os custos de produção do CDR.

O CDR pode ser objeto de recuperação térmica através de uma série de diferentes tecnologias para seu consumo, sendo as mais comuns:

- 1) Cocombustão em fornos de cimento ou cal.
- 2) Plantas específicas para sua combustão, como gaseificação, pirólise e leito fluidizado.
- 3) Cocombustão em usinas de energia, por exemplo, em usinas térmicas a lignito ou carvão, de tecnologias de fundo seco ou úmido.
- 4) Caldeiras industriais.
- Plantas tradicionais de combustão com ou sem recuperação energética.
- Indústrias metalúrgicas (fabricação de aço) para substituição do agente redutor.

Na Tabela 5, é apresentado o uso de recuperação térmica de CDR na Alemanha em 2007, de acordo com um questionário atribuído aos operadores de plantas TMB com produção de CDR (BILITEWSKI et al., 2007).

Tabela 5 - Uso de recuperação térmica de CDR na Alemanha em 2007

Tipo de recuperação térmica	% por peso
CDR – monocombustão	98
Cocombustão em fornos de cimento	15
Cocombustão em usinas térmicas de lignito	15
Processamento de combustível mecânico externo	12
Incineração de resíduos	11
Armazenamento temporário	3
Outro	3
Cocombustão em usinas térmicas de carvão	2

Fonte: BILITEWSKI et al, 2007.

Tradução por: Gabriela GPO Sartini, 2016.

Pegada de carbono

O CDR comumente é referido como uma fração de resíduos de alto poder calorífico (papel, papelão e plástico) gerado pelo tratamento mecânico de RSU ou similares de origem comercial/industrial. Uma grande parte do CDR é originada de biomassa (biogênico) e, portanto, pode ser considerado como uma fonte de energia renovável e neutra em carbono. Assim, dependendo dos motivadores legais e políticos de um país, a energia produzida com essas características pode atrair investimentos, especialmente por não contribuir com o aquecimento global. Outra vantagem pode ser a isenção de impostos consideráveis se houver legislação que os imponha para as tecnologias geradoras de grandes quantidades de GEE.

A produção de CDR consome energia em suas etapas, como na coleta dos RSU e nas operações da planta TMB – algumas dessas, inclusive, não tão eficientes no consumo de energia, como a fragmentação para redução do tamanho dos materiais. Mas a produção e utilização global de CDR, na maioria dos casos, são comparativamente negativas em carbono; para determinar o montante exato de emissões evitadas de CO₂ equivalente, é preciso estabelecer quais combustíveis fósseis foram substituídos pelo CDR. De acordo com Remondis (GLORIUS; REMONDIS, 2008), se o CDR com 50% de conteúdo biogênico substitui carvão, economiza 0,75 tCO₂ eq/ton de CDR, enquanto economiza 1 tCO₂ eq/ton de CDR quando substitui carvão betuminoso.

Taxa de entrada

Na maioria dos casos, o CDR possui um valor de mercado negativo; isso significa que os produtores de CDR (indústria de gestão de resíduos) pagam aos consumidores finais para recuperá-los termicamente. Mas a indústria de processamento de resíduos tenta melhorar o perfil do CDR e atrair, se possível, preços positivos, ainda mais com a escalada dos preços dos combustíveis tradicionais derivados de fósseis. As taxas de entrada do CDR resultam da oferta e demanda gerais, que variam consideravelmente e se relacionam com a qualidade real e a percebida. Medidas fiscais específicas (subsídios) visam abordar os benefícios ambientais que o CDR pode trazer.

Recentemente, na Europa, evidencia-se um CDR de alta qualidade (por exemplo, baixo teor de Cl e elevado em biomassa), atraindo um valor positivo ou neutro quando recuperados em usinas térmicas a carvão (xisto betuminoso) que utilizam tecnologia de leito fluidizado circulante (THIEL; THOME-KOZMIENSKY, 2012).

ï

9 APLICAÇÃO COMERCIAL DAS PLANTAS WTE

Na Tabela 6 é apresentado um sumário dos diferentes tipos de sistemas WtE e sua aplicação em RSU bruto, pré-tratado, CDR, resíduos perigosos, de saúde e lodos de esgotos.

Tabela 6 - Síntese da aplicação bem-sucedida de diferentes processos térmicos aos principais resíduos

Tipo de incinerador	RSU bruto	RSU pré- tratado	CDR	Resíduos perigosos	Resíduos de saúde	Lodo de esgoto
Grelhas móveis	Muito aplicado	Muito aplicado	Muito aplicado	Raramente aplicado	Aplicado	Normalmente não aplicado
Forno rotativo	Normalmente não aplicado	Aplicado	Aplicado	Muito aplicado	Muito aplicado	Aplicado
Forno rotativo com grelhas móveis	Aplicado	Normalmente não aplicado	Normalmente não aplicado	Raramente aplicado	Aplicado	Normalmente não aplicado
Leito fluidizado	Raramente aplicado	Aplicado	Aplicado	Normalmente não aplicado	Normalmente não aplicado	Muito aplicado
Gaseificação	Raramente aplicado					
Gaseificação por plasma	Raramente aplicado					
Pirólise	Raramente aplicado	Raramente aplicado	Raramente aplicado	Raramente aplicado	Raramente aplicado	Raramente aplicado
Digestão Anaeróbia	Normalmente não aplicado	Muito aplicado	Não aplicado	Normalmente não aplicado	Normalmente não aplicado	Muito aplicado

Fonte: Preparado por D-Waste, 2016. Tradução por: Gabriela GPO Sartini, 2016.

9.1 Mercados de energia

Os preços da energia podem ser afetados por impostos ou subsídios e variam de país a país. O valor econômico da energia a partir de resíduos é mais bem avaliado pelo valor socioeconômico do tipo de energia substituída sem os efeitos de subsídios, impostos e taxas (ISWA, 2015).

Eletricidade

A eletricidade é facilmente transferida da planta de recuperação energética para a rede elétrica local, tornando-a disponível para todos os tipos de clientes, mesmo a uma distância através de conexões entre fronteira (ISWA, 2015).

Em algumas regiões (EUA e partes da Europa), há um mercado à parte para a eletricidade verde, incluindo de plantas WtE e DA, compreendendo pelo menos partes da eletricidade produzida. A plataforma de mercado é usada para documentar que certa parcela da eletricidade consumida vem de fontes renováveis (ISWA, 2015).

A eletricidade normalmente é vendida a preço de mercado com base em contratos de curto ou longo prazo ou uma combinação dos mesmos.

Esse preço de venda é muito mais baixo do que o preço residencial da eletricidade que consiste em uma escala de elementos adicionais do preço, tais como o custo da rede, as taxas da subscrição, a taxa verde da eletricidade, o imposto específico da energia e o imposto de vendas (ISWA, 2015).

O potencial da venda da eletricidade gerada por WtE possui um valor estimado de 16,5 bilhões de dólares/ano, assumindo o potencial de venda da eletricidade de 300 TWh/ano e um preço estável de 56 dólares/MWh (ISWA, 2015).

Se o biogás das plantas de DA for usado para gerar eletricidade, o valor do potencial de 50 milhões de tons/ano de resíduos orgânicos domiciliares gira em torno de 788 milhões de dólares/ano, assumindo o mesmo preço de 56 dólares/MWh (ISWA, 2015).

Aquecimento/resfriamento

A perspectiva da produção de calor e resfriamento a partir de resíduos é, antes de tudo, que ela suplementa a eletricidade em usinas que combinam

calor e energia, recuperando a energia que não pode ser convertida em eletricidade por razões dadas pelas leis físicas (ISWA, 2015).

Enquanto a produção líquida típica seria entre 25-30% a partir de uma planta exclusiva de eletricidade, a recuperação de energia total poderia ser aumentada significativamente pelo uso combinado de calor e eletricidade, mesmo que ele cause uma ligeira redução da produção de energia (ISWA, 2015).

A venda de calor/resfriamento requer a existência de demanda local e o estabelecimento de uma rede de transmissão. O calor poderia ser fornecido a partir de plantas exclusivas de WtE ou de centrais combinadas de calor e eletricidade (ISWA, 2015). A venda potencial de calor de uma planta WtE com geração combinada tem um valor de cerca de 9 bilhões de dólares/ano, assumindo que o potencial de venda de calor seja de 400 TWh/ano a um preço médio de 22,5 dólares/MWh (ISWA, 2015).

Pode haver questões tributárias relacionadas à venda de calor que afetam o mercado e os preços, por exemplo, imposto sobre o calor entregue a partir da planta de WtE e/ou imposto sobre o combustível alternativo para o fornecimento de calor.

Se o calor é gerado a partir de unidades de geração combinada de biogás, instaladas como parte de plantas DA, a geração potencial é de 18 TWh/ano, no valor de 203 milhões de dólares/ano, considerando o potencial de 50 milhões de tons/ano de resíduo orgânico domiciliar e assumindo que 50% do calor seja vendido (ISWA, 2015).

Metano

A vantagem da produção de metano é, antes de tudo, substituir o gás natural ou outros combustíveis fósseis, e sua emissão associada de dióxido de carbono, porque o uso de metano gerado por resíduos é considerado biogênico com emissão zero de dióxido de carbono.

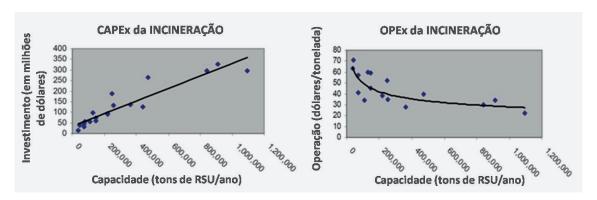
O metano proveniente de DA demanda aprimoramento e pressurização para transferência para uma rede local de gás natural ou para transporte para uma estação de serviço para venda para utilização no transporte rodoviário. A geração potencial de biogás em plantas DA de 40 TWh/ano tem o valor de 1,35 a 1,8 bilhão de dólares/ano (ISWA, 2015).

9.2 Economia da Recuperação Energética

O sucesso de uma planta WtE com RSU como insumo recai sobre sua viabilidade econômica para o investidor e nos cidadãos também. O custo real do investimento depende de uma grande variedade de fatores e, mais particularmente, da localização da instalação, do seu tamanho (capacidade), da condição do insumo (valor calorífico), do tipo de tecnologias utilizadas, dos métodos utilizados para a recuperação energética, da mão de obra e da manutenção necessárias. As plantas de baixa capacidade são relativamente mais caras do que as de alta capacidade em termos de custo de investimento por tonelada.

De acordo com a pesquisa conduzida por E. K. Paleologos et al. (2006), para instalações de incineração com capacidade de 36.500 tons/ano para mais de 1.000.000 tons/ano, instalações de gaseificação variando de 21.000 tons/ano para 642.000 tons/ano e plantas DA entre 5.500 tons/ano a 110.000 tons/ano, as comparações das capacidades físicas dessas instalações (\$/tons de RSU/ano) demonstra que o processo de incineração parece ter custos menores do que a gaseificação e a digestão anaeróbia. Na Figura 16, os resultados da sua pesquisa são apresentados.

Figura 16 - Capex e Opex das plantas WtE



Fonte: Paleologos et al., 2006. Tradução por Gabriela GPO Sartini, 2016.

Uma vez que os dados acima se referem a 2006 e o presente Guia é de 2016, foram realizadas novas investigações sobre as tecnologias. Os dados relativos à incineração e à DA foram obtidos na base de dados da EPEM S.A. criada para efeitos do Programa Europeu LIFE intitulado Opções de Gestão de Resíduos para Controle das Emissões de GEE (WASTE-C-CONTROL), os dados referentes à gaseificação e gaseificação de plasma foram obtidos pelo *American Chemistry Council*, em seu relatório de 2013 intitulado "Gaseificação de Plásticos Não Reciclados de RSU nos EUA", enquanto a informação sobre a pirólise foi obtida por Gary

C. Young e seu livro intitulado **RSU para processos de conversão de energia: comparações econômicas, técnicas e renováveis**. A Tabela 7 resume as informações de pesquisa, enquanto a Tabela 8 fornece a faixa de custo de cada uma das tecnologias descritas.

Tabela 7 – Resumo da variação de custos para as plantas de tratamento térmico

Tecnologia	Capex, \$/ton ano	Opex, \$/ton
Incineração	147-1.300	9-228
Gaseificação	630-1.165	35-60
Pirólise	527-520	43-47
DA	18-650	23-178

Fonte: organizado por D-Waste, 2016. Tradução por: Gabriela GPO Sartini, 2016.

Tabela 8 – Panorama da literatura sobre Capex e Opex dos processos de recuperação energética

Capacidade, tons/ano	Tecnologia	Capex, milhões de dólares	Opex, \$/ tons ano	Opex, \$/ ton	Fonte
40.000	Digestão Anaeróbia (DA)	6.9	172	43.4	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
50.000	DA	12 – 32.7	244 – 655.5	29 - 67	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
50.000	TMB com DA	23	467	122 - 178	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
>50.000	DA		163 – 423	24 – 105.5	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
50.000 – 60.000	DA	15 – 39	300 – 648	42	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
72.000	DA	1.3	18	54.5	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
100.000	DA	8.3 - 20	83 - 200	23.3	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
328.000	TMB com DA	21.2	64.4	43.4	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
33.000	Incineração de CDR	38 – 43	1144 – 1312	212 - 228	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
60.000	Incineração de CDR	52 – 59	870 – 981	151 - 161	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)

Capacidade, tons/ano	Tecnologia	Capex, milhões de dólares	Opex, \$/ tons ano	Opex, \$/ ton	Fonte
63.929 tons/ anoCDR 597 tons/ano Lama biológica filtrada	Leito fluidizado borbulhante	39	602	138	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
50.000 – 100.000	Incineração	41.7	146.7 - 833	109	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
100.000	Incineração	45.5	455.5	8.8	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
100.000	Incineração	60 – 69	600 – 689	61.5 – 96.1	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
100.000 – 200.000	Incineração	68 – 96.1	481 - 683	14 - 30	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
120.000	Incineração	71.1 – 81.1	592 – 675.5	96.6 – 107.6	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
200.000	Incineração	77.2	381	14	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
200.000	Incineração	87.1 – 96.1	435.5 – 481	45 – 67.8	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
200.000	Grelhasmóveis	119 (2001)	594.4	51	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
200.000	Incineração		355.5 - 500	55.6	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
300.000	Incineração	114	380	17.6	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
500.000	Incineração	173.9	347.7	24.6	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
600.000	Incineração	210.5	351	27.2	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
600.000	Incineração	433.3	722.1	61.1	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
700.000	Incineração	241.6	345.5	30.7	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
165.000¹	Pirólise	86.9	526.7	43.6	Gary C. Young, 2010 (EPEM 2018)

¹ O autor estabelece a capacidade diária igual a 500 tons. Para calcular o valor anual, assumiu-se que a planta opera 330 dias e 35 são de manutenção.

Capacidade, tons/ano	Tecnologia	Capex, milhões de dólares	Opex, \$/ tons ano	Opex, \$/ ton	Fonte
165.000²	Pirólise/ gaseificação	102.6	621.8	46.7	Gary C. Young, 2010 (EPEM, 2018)
	Pirólise	120-172.5			Thomas Stringfellow, 2014 (YOUNG, 2010)
99.000²	Gaseificação	80	808	NA	The American Chemistry Council, 2013 (YOUNG, 2010)
248.000 ³	Gaseificação por plasma	156	629	42	The American Chemistry Council, 2013 (STRINGFELLOW, 2014)
129.000 ⁴	Gaseificação por plasma	150	1162.8	53	The American Chemistry Council, 2013 (STRINGFELLOW, 2014)
132.000 ⁵	Gaseificação por plasma	113	856	63	The American Chemistry Council, 2013 (STRINGFELLOW, 2014; BELGIORNO, 2003)

Fonte: organizado por D-Waste, 2016. Tradução por: Gabriela GPO Sartini, 2016.

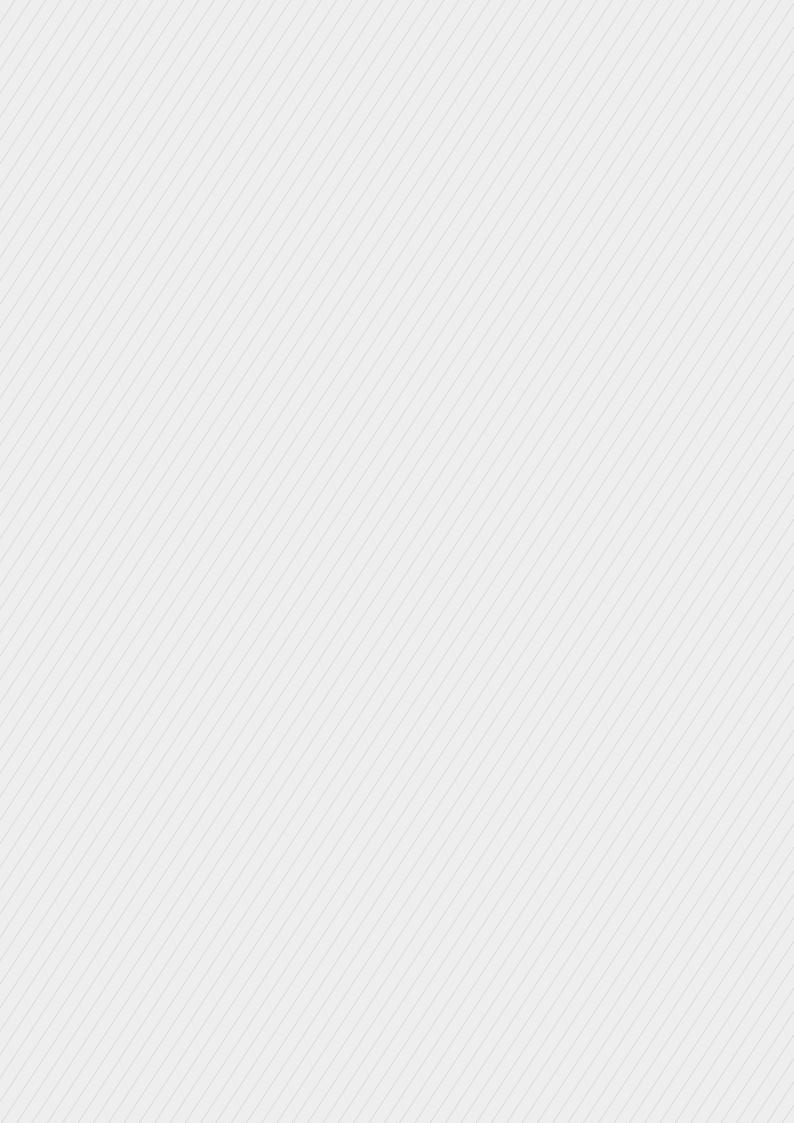
Obs.: para ter somente uma moeda na tabela, o ε foi trocado em \$ com a seguinte taxa: 1 \$/0.9 $\varepsilon.$

² O autor estabelece a capacidade diária igual a 300 tons. Para calcular o valor anual, assumiu-se que a planta opera 330 dias e 35 são de manutenção.

³ O autor estabelece a capacidade diária igual a 750 tons. Para calcular o valor anual, assumiu-se que a planta opera 330 dias e 35 são de manutenção.

⁴ O autor estabelece a capacidade diária igual a 390 tons. Para calcular o valor anual, assumiu-se que a planta opera 330 dias e 35 são de manutenção.

⁵ O autor estabelece a capacidade diária igual a 400 tons. Para calcular o valor anual, assumiu-se que a planta opera 330 dias e 35 são de manutenção.





10 ATORES DOS PROJETOS DE WTE

Devem ser considerados múltiplos *stakeholders* quando do planejamento e da investigação sobre a viabilidade da incineração de RSU, pois seus interesses e intenções podem não estar plenamente alinhados.

A implantação bem-sucedida de uma planta de incineração de RSU é altamente dependente de leis, regulações e procedimentos em vigor no país de interesse.

Figura 17 – Atores de interesse dos projetos de WtE



Fonte: ISWA,2013.

A instalação de uma planta de incineração de resíduos pode, em princípio, ser iniciada por diferentes setores, por exemplo, de resíduos ou de energia. Em ambos os casos, a planta pode ser de propriedade pública ou privada ou de capital misto.

Em qualquer caso, é importante que a planta seja parte integrante do sistema de gestão de resíduos e que existam acordos vinculativos de longo prazo relativos às taxas de depósito, ao fornecimento de resíduos e à venda de energia. A natureza destes acordos varia conforme a estrutura organizacional.

Setor de resíduos

Ao considerar a instalação de uma planta WtE, é importante ter um setor de resíduos bem gerenciado onde existam regulamentações e fiscalização, de modo que os materiais não recicláveis sejam descartados em aterros sanitários. Nessa situação, presume-se que todos os não recicláveis serão realmente eliminados em locais controlados e, portanto, a sua transição para instalações de WtE garantirá um fornecimento de resíduos. O controle do fluxo de insumos de RSU e resíduos industriais é importante porque a boa operação de uma planta de incineração de RSU depende de um suprimento contínuo de resíduos com variações relativamente pequenas no poder calorífico (ISWA, 2013).

Os requisitos supramencionados são, em geral, cumpridos em sistemas consolidados de gestão de resíduos sólidos. A coleta, o transporte e a disposição podem ser tratados por diferentes organizações, mas o sistema como um todo está normalmente sob controle financeiro e orçamentário público, já que o custo dos resíduos sólidos urbanos é, em última análise, coberto pelos geradores de resíduos por meio do pagamento de impostos e tarifas.

Setor de energia

Considerando que a incineração de RSU é um método caro em comparação com a disposição em aterros sanitários, a fim de manter as taxas de entrada baixas o suficiente, é importante vender a energia produzida. As perspectivas de venda de energia devem ser consideradas em longo prazo quando se planeja a criação de uma planta de incineração de RSU e exige contratos e garantias do investidor.

O setor de energia, em alguns países, pode ser regulado por tributação ou subsidiar tecnologias energéticas específicas, como a energia renovável e a energia produzida pelas plantas WtE. Deve-se considerar que

a tributação e as subvenções podem ser canceladas subitamente e, por isso, o financiamento da planta não deve depender exclusivamente desses subsídios e, sim, ser sustentável. Uma cooperação desde o início entre os consumidores de energia e a operadora da planta é favorável, uma vez que a viabilidade da instalação depende muito da venda de energia.

A comunidade

É de extrema importância assegurar um programa aberto de informação com comunidade, ONGs ou outros grupos que possam ter interesse na planta WtE. Desde o início, é preciso envolver a comunidade no projeto e fazer campanhas de sensibilização sobre os benefícios ambientais e financeiros de sua implementação. Além disso, a instalação pode estar localizada perto de áreas residenciais e uma possível expansão causará impactos na paisagem e no modo de vida local; o tráfego também será influenciado e, portanto, toda informação deve ser compartilhada com a comunidade local.

As campanhas de informação precisam ser abertas, honestas e apresentadas em linguagem de fácil compreensão para todos. A oposição local pode ser forte e adiar a implementação; experiências de casos anteriores mostram que, se representantes locais (vizinhos, ONGs ambientalistas, catadores de materiais recicláveis, etc.) participarem no grupo de comunicação, os obstáculos podem ser superados mais facilmente (ISWA, 2013).

Autoridades

As autoridades ambientais devem estabelecer normas claras para as emissões das instalações de WtE, bem como normas para as cinzas de fundo e as cinzas volantes. Se não houver normas locais, a União Europeia (EU) ou a legislação dos Estados Unidos da América (EUA) podem ser utilizadas como base para seu desenvolvimento.

A autoridade sanitária deve também ser envolvida para assegurar que todos os aspectos necessários sejam tidos em conta durante o processo de avaliação do impacto ambiental.

A seguir é dada uma lista indicativa de interessados que poderiam estar envolvidos em um projeto WtE no Brasil.

Tabela 9 – Lista de atores potenciais

Ator	Interesse do ator	Possível influência do ator
Ministério do Meio Ambiente	O projeto exige um estudo de impacto ambiental (EIA). Supervisão e fiscalização do sistema. Definição de políticas ambientais. Busca por alcançar padrões internacionais de práticas ambientais.	Encerramento, atraso ou mudança no projeto Obstáculos burocráticos.
Ministério da Saúde	O resíduo é gerenciado de forma adequada e as emissões atmosféricas da planta estão dentro dos padrões legais.	Encerramento, atraso ou mudança no projeto
Municípios	Gestão dos RSU. Dispor de uma alternativa economicamente competitiva para a disposição dos resíduos.	Fornecimento dos resíduos e pagamento pela disposição. Negociação de contratos. Gestão dos problemas do sistema. Falta de clareza e transparência no cálculo das taxas de disposição dos resíduos. Diminuição das iniciativas de reciclagem.
Ministério da Energia	Proposição e regulamentação de incentivos para energia limpa.	Regulamentação dos preços da energia.
Governos locais	Benefícios sociais e de saúde ambiental para a população. Estímulo à melhoria contínua do sistema.	Demanda por competência técnica e recursos para abordar questões de curto e longo prazos. Resolver conflitos com várias partes interessadas.
Catadores	Mudanças no Sistema de Gestão de Resíduos podem afetar ou eliminar sua fonte de renda.	As atividades dos catadores podem afetar as propriedades e quantidades de resíduos disponíveis.
Grupos comunitários/ associações de bairros	Melhoria da qualidade de vida devido a melhorias no meio ambiente. Oportunidade de geração de empregos. Impactos negativos.	Encerramento, atraso ou mudança no projeto devido aos protestos da comunidade.
ONGs ambientalistas	Redução dos impactos ambientais da gestão de resíduos no meio ambiente.	Encerramento, atraso ou mudança no projeto devido aos protestos da ONG ou mesmo apoio caso o projeto cause impactos positivos.
Vizinhança	Vizinhança livre de ruídos, particulados, tráfego pesado e impactos visuais. Impacto nos preços dos imóveis.	Encerramento, atraso ou mudança no projeto devido aos protestos dos moradores.
Empresas de coleta e transporte	Manutenção ou expansão dos negócios.	Novos requisitos para segregação, contentores e veículos.
Fornecedores de energia	Preferência por poucos fornecedores e altos preços para a energia.	Variação do preço da energia devido ao valor dos combustíveis fósseis e à seca.
Plantas de disposição final	Desejo de receber mais resíduos. Concorrer e ganhar licitações públicas.	Possível diminuição da taxa pelo aumento da competitividade.
Municípios vizinhos	Dispor de uma alternativa economicamente competitiva para disposição dos resíduos.	Fornecer resíduos para a planta e pagamento pela disposição.

Fonte: organizado por D-Waste, 2016. Tradução por: Gabriela GPO Sartini, 2016.





Diminuição do uso de aterros sanitários

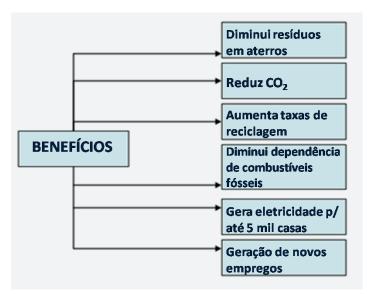
Plantas WtE recebem os resíduos que normalmente seriam enviados para aterros sanitários.

Redução das emissões de CO₂

De acordo com a Agência de Proteção Ambiental Norte-americana (USEPA), "cerca de uma tonelada de emissões de CO₂eq tem sua emissão evitada para cada tonelada de RSU que segue para plantas de WtE" devido a:

• Emissões de metano evitadas nos aterros sanitários: quando uma tonelada de RSU é enviada para uma planta WtE, evita-se a geração de metano em um aterro sanitário.

Figura 18 - Benefícios da recuperação energética de resíduos



Fonte: D-Waste, 2016.

Tradução por: Gabriela GPO Sartini, 2016.

65

Carvão

Petróleo

Produção de energia

Gás
natural

Resíduo

CO2 evitado

CO2 tons

Figura 19 - Balanço de CO, de diferentes fontes de energia

Fonte: D-Waste, 2016.

Tradução por: Gabriela GPO Sartini, 2016.

- Emissões evitadas de CO₂ da queima de combustíveis fósseis: quando um megawatt de eletricidade é gerado em uma planta WtE, evita-se o aumento das emissões de dióxido de carbono geradas nas usinas térmicas.
- Emissões evitadas de CO₂ da produção de metais: plantas WtE recuperam mais de 700 mil tons/ano de metais ferrosos para reciclagem, o que economiza energia e evita as emissões de dióxido de carbono da mineração e da produção de novos metais, como o aço.

Além disso, o uso do digestato como fertilizante do solo é muitas vezes considerado um sumidouro de carbono porque o teor contido nele é depositado no solo e só lentamente é liberado como ${\rm CO_2}$.

O sumidouro de carbono imediato é de cerca de 70 kg/tons de RSU orgânico, totalizando 3,5 tons/ano de carbono, assumindo 50 toneladas de resíduos, o que é contrabalançado pela libertação gradual de CO_2 e pela geração do poderoso gás com efeito de estufa, o óxido nitroso, pelos processos biológicos no solo.

Aumento das taxas de reciclagem

Estudos norte-americanos demonstraram que comunidades atendidas por plantas de WtE apresentam taxas de reciclagem 20% superiores às da média nacional.

Criação de empregos locais

Até 30 vagas de tempo integral para as posições de gestores e operadores podem ser criadas, e cerca de 45 vagas para a construção.

Geração de eletricidade

Uma planta WtE de 150 tons/dia de RSU pode gerar 5 MW de eletricidade/hora, o suficiente para abastecer 5 mil residências.

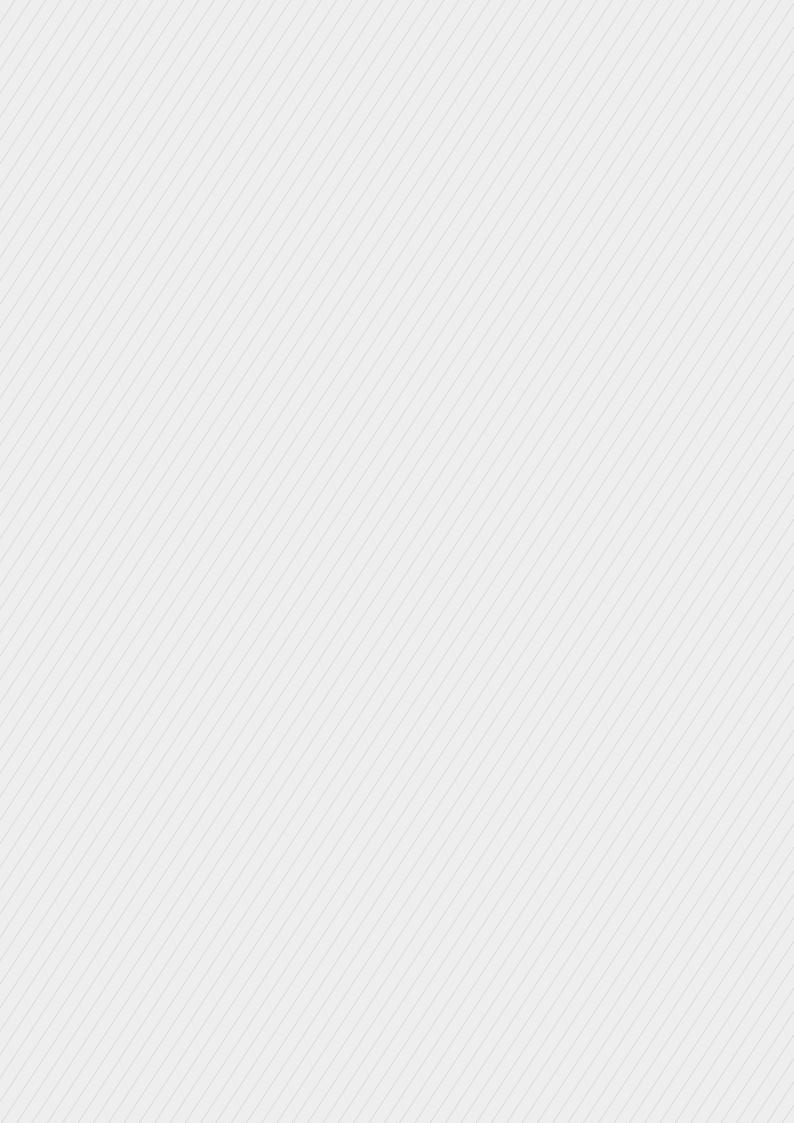


Inconvenientes sociais

O público em geral ainda não está convencido de que as emissões atmosféricas das plantas WtE são limpas e livres de poluentes químicos (o que não é verdade, por outro lado, pois o sistema de limpeza do gás combustão é 99,9% eficiente).

Custos

Plantas de WtE possuem alto custo de instalação, mas os aterros sanitários também, especialmente se considerados os custos externos da poluição.





A recuperação energética de resíduos é utilizada em todo o mundo; só nos países da Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômico (OCDE) são cerca de 2 mil plantas, e nos 28 países-membros da União Europeia (mais Noruega e Suíça), aproximadamente 460 plantas de WtE declaram tratar cerca de 65 milhões de tons/ano. Na América do Norte, 85 plantas operam o tratamento de quase 16 milhões de tons/ano de resíduos (ISWA, 2012). Na Coreia do Sul, 35 plantas WtE que estão em operação (WTERT) tratam 3 milhões de tons/ano; o Japão possui uma estrutura ligeiramente diferente de cerca de 1.100 plantas de WtE que tratam 35 milhões de tons/ano, o que dá uma média de 30 mil tons/ano de capacidade por planta. Já, na Europa, a capacidade média anual de cada planta é de 150 mil toneladas.

De acordo com os registros da WTERT, 800 plantas WtE em operação por todo o globo, somaram uma capacidade total de 195 milhões de toneladas em 2011 [www.wtert.org]. A Tabela 10 mostra uma lista com o resumo das tecnologias mencionadas, a capacidade estimada e a localização no mundo.

Tabela 10 – Insumos, produto e capacidade total das tecnologias existentes no mundo (ISWA, 2012)

Processo	Insumo	Produto	Capacidade* anual estimada, tons	Continentes/países onde aplicadas
Combustão sobre grelhas móveis	RSU in natura	Vapor de alta pressão	<168 milhões	Ásia, Europa, América
Combustão sobre fornos rotativos	RSU in natura	Vapor de alta pressão	>2 milhões	Japão, EUA, UE
Energy Answers Process (SEMASS)	RSU triturado	Vapor de alta pressão	>1 milhão	EUA
CDR para combustão em grelha	RSU triturado e segregado	Vapor de alta pressão	>5 milhões	EUA, UE
Leito fluidizado circulante	RSU triturado ou CDR	Vapor de alta pressão	>11 milhões	China, Europa
Leito fluidizado de tecnologia Ebara	RSU triturado ou CDR	Vapor de alta pressão	>0.8 milhão	Japão, Portugal
Leito fluidizado borbulhante	RSU triturado ou CDR	Vapor de alta pressão	>0.2 milhão	EUA
Tratamento Mecânico-Biológico (TMB)	RSU triturado e pós- biorreator	CDR para cimenteiras e usinas térmicas a carvão	>5 milhões	UE
Processo direto de fundição	CDR	Vapor de alta pressão	>0.9 milhão	Japão
Gaseificação termosseletiva	RSU in natura	Syngas (CO, H ₂ ,CO ₂)	>0.8 milhão	Japão
Gaseificação com plasma	RSU triturado	Syngas (CO, H ₂ ,CO ₂)	>0.2 milhão	Canadá, Japão, França
Capacidade global			<195 milhões	

Fonte: ISWA, 2012.

Tradução por: Gabriela GPO Sartini, 2016.

A Figura 19 mostra a localização das plantas WtE ao redor do mundo, de acordo com a base de dados do **Waste Atlas** http://www.atlas.d-waste.com/. Como se verifica, a recuperação energética é uma prática comum na Europa, no Japão e nos EUA, e ainda está começando na China e Índia.

Mais de 2.000 plantas WtE estão operando globalmente.



Figura 20 - Plantas WtE localizadas ao redor do mundo

Fonte: Waste Atlas. Disponível em: http://www.atlas.d-waste.com/>.

Feita a análise de ambos os bancos de dados, observa-se que a principal tecnologia usada é a da combustão em grelhas não somente em aplicações de grande escala, mas também em plantas pequenas de WtE que servem pequenas comunidades, de 10.000 habitantes. No entanto, os novos processos de recuperação energética de resíduos estão constantemente avançando e uma alternativa mais acessível financeiramente pode emergir.

A seguir são apresentados alguns estudos de caso da China, da Alemanha e da Itália.

China



A planta de WtE de Suzhou está localizada a uma hora de Xangai e é uma das maiores em operação na China. Foi desenvolvida (Construção-Operação-Transferência) pela Everbright International. Desde 2011, o projeto Suzhou aumentará sua capacidade de processamento diário projetado de RSU de 2.050 tons para 3.250 tons, sendo a maior capacidade diária no país com o padrão de emissão mais avançado. Sua capacidade anual é de 1 milhão de tons e gera 0.2 milhão de MWh de eletricidade líquida para a rede. A usina usa tecnologia mecânica e produz energia de 25MW. As cinzas de fundo, cerca de 25% do insumo, são usadas na construção de tijolos que são amplamente utilizados em obras municipais, enquanto a cinza volante é enviada para aterros de resíduos perigosos especiais com um custo de 750CNY/ton. A taxa de portão da planta é de 150 CNY/ton (19 dólares/ton), enquanto o preço de venda da eletricidade produzida é de 500 CNY/MWh. O investimento total da instalação foi de 950 milhões de CNY.

A gestão de resíduos sólidos na China apoia-se principalmente em aterros sanitários (85%) e WTE (13%). Há cerca de 100 plantas de WTE na China, enquanto as projeções para os próximos cinco anos indicam a construção de mais 200 plantas, tornando a WtE um mercado em expansão no país; seu rápido desenvolvimento tem sido muito auxiliado pela política de energias renováveis do país. As taxas de entrada dos RSU variam de 11 a 33 dólares e, em 2011, o governo chinês aprovou uma nova legislação para as emissões de dioxinas, de modo a estar em conformidade com os limites da UE, passando de 1 ng/Nm³ para 0,1 ng/Nm³. É notável o fato de a umidade dos RSU ser relativamente elevada, variando de 50-55% e o valor calorífico médio ser de cerca de 4-6 MJ/kg, sendo o principal problema operacional o manuseio do lixiviado (cerca de 30%).

O rápido crescimento desse setor também tem sido ajudado pelo custo de capital relativamente baixo. As principais empresas locais de construção e operação são: Sanfeng Covanta, Shanghai Environment Group, Wheelbrator Asia, Everbright International (Everbright Environmental Protection Technology Development), Jiangsu Senze Group, Shanghai SUS Environment, Anhui Jingding Boiler, Shenzhen Energy, OVE and Anhui Shengyun Environmental Protection Equipment.

As tecnologias WtE predominantes na China são as de grelhas mecânicas (principal) e de leito fluidizado circulante.

Alemanha

O tratamento por WtE na Alemanha representa 35% dos métodos utilizado na gestão de resíduos sólidos, enquanto a reciclagem corresponde a 47%, conforme o relatório 2013 da Eurostat.

Itália

A gestão de resíduos na Itália é basicamente apoiada em aterros sanitários (38%), enquanto a reciclagem representa 26% e WTE 21%, de acordo com o Relatório 2013 da Eurostat. Atualmente, 50 plantas operam na Itália, sendo a maioria, 34, localizada na região Norte do país; também 18 destas plantas de WTE aplicam a medição em linha do mercúrio e das dioxinas (de forma voluntária).

As taxas de entrada dessas plantas variam de 56-122dólares/ton, já a tarifa de alimentação elétrica varia entre 67-122 dólares/MWh.

Planta WtE TRM em Turim

A planta de Turim colocou em operação uma de suas três linhas em abril de 2013; possui capacidade nominal de 526 mil tons/ano e atende à Região Metropolitana de Turim (equivalente a 1,750 milhão de pessoas). Produz anualmente 350 GWh de eletricidade para 175.000 famílias (constituídas por três pessoas) e futuramente 170.000 MWh de aquecimento urbano para 17.000 casas (cada média de 100 m²). O projeto da planta é de autoria do arquiteto Bertoli (famoso pelo *design* dos carros luxuosos da Masserati), está equipada com três linhas de incineração com uma capacidade total de 67,5 tons/h por linha (LHV 11 MJ/kg). A cinza produzida representa 21% do insumo e é reutilizada como material para obras rodoviárias, enquanto as cinzas volantes representam 3,5% do insumo e são exportadas para tratamento como resíduo perigoso. A taxa de entrada é de 117 dólares/ton, enquanto o preço de venda da eletricidade produzida é de 83 dólares/MWh.

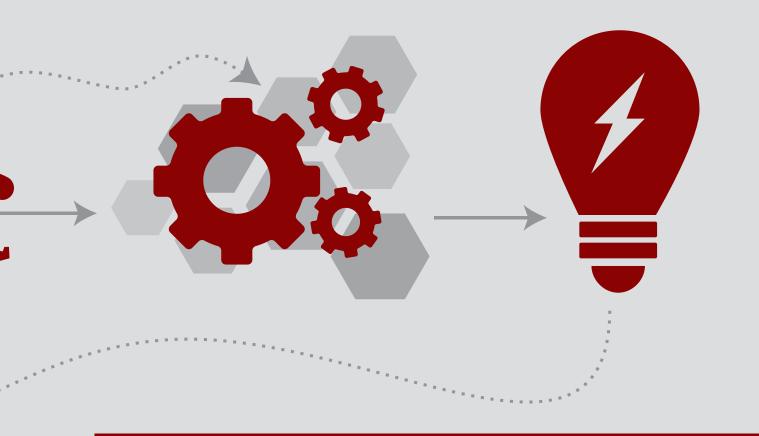
12.1 Países em desenvolvimento e CDR

Esses países geralmente enfrentam grandes desafios para gerenciar resíduos e recursos. A capacidade de implementar qualquer solução depende da composição do resíduo, da coleta e de fatores mais amenos, como o nível de capacidade institucional, a boa governança, os conhecimentos técnicos locais e as realidades e políticas governamentais e socioeconômicas mais amplas, por exemplo, proteção do ambiente ou da saúde pública. Uma consideração-chave é a acessibilidade. Sob tais condições, é provável que o setor informal de reciclagem possa estar desempenhando papel fundamental, mas frequentemente não reconhecido, na recuperação de materiais com valor, incluindo plásticos enviados para reprocessamento. A composição dos RSU é claramente diferente dos países desenvolvidos de alta renda, com prevalência de orgânicos

úmidos (exemplo, sobras de cozinha): em média, um pouco abaixo de 70% em peso. Dado o baixo poder calorífico dos orgânicos e o seu teor de umidade muito elevado, o RSU não processado geralmente não é adequado para a recuperação térmica por si só; no entanto, pode haver margem para a recuperação energética selecionada sob a forma de CDR. Em particular, as tecnologias de biodiesel de baixa tecnologia podem fornecer uma solução ideal para remover a umidade dos orgânicos e tornar os resíduos adequados para recuperação de energia via CDR.

Planta de WtE MVB (Unidades 1&2), Hamburgo, Alemanha

A planta MVB foi encomendada em 1994. Os acionistas são a Vattenfall Europe New Energy GmbH (85,5%) e a E.ON Energy from Waste AG (14,5%). Existem duas linhas de incineração, tratando uma capacidade total 325 mil tons/ano (LHV 9Mj/kg), dos quais 92% são RSU, 4% são resíduos comerciais e 4% são resíduos volumosos. O principal produto energético da instalação é o calor e abastece o sistema distrital de Hamburgo. As cinzas de fundo produzidas representam 19% do insumo, enquanto as cinzas volantes representam 2,5%. O custo total do investimento foi de 186 milhões de euros.



13 ATRATIVIDADE DO INVESTIDOR

Plantas de recuperação energética são de propriedade pública em alguns países e do setor privado em outros. A titularidade dos RSU pode ser transferida do público para a instalação de tratamento através de contratos normalmente objeto de licitação; mas, independentemente da propriedade, o público tem interesse em assegurar uma capacidade de gestão de resíduos duradoura, estável e que respeite o meio ambiente, e as plantas WtE e DA podem fazer parte. Como outros projetos de infraestrutura, há muitas partes interessadas no estabelecimento de tais instalações e é importante resolver as questões e preocupações levantadas para tornar o projeto bem-sucedido (ISWA, 2015).

A venda de gás, a eletricidade e o calor/resfriamento são normalmente atividades que desempenham papel econômico importante no processo do negócio e um cocondutor importante para um projeto no tratamento de resíduos.

Com uma vida ativa de cerca de 20 anos, contratos de longo prazo, para a entrega de resíduos a essas plantas, são de alta prioridade e geralmente necessários para financiamento externo por meio de bancos.

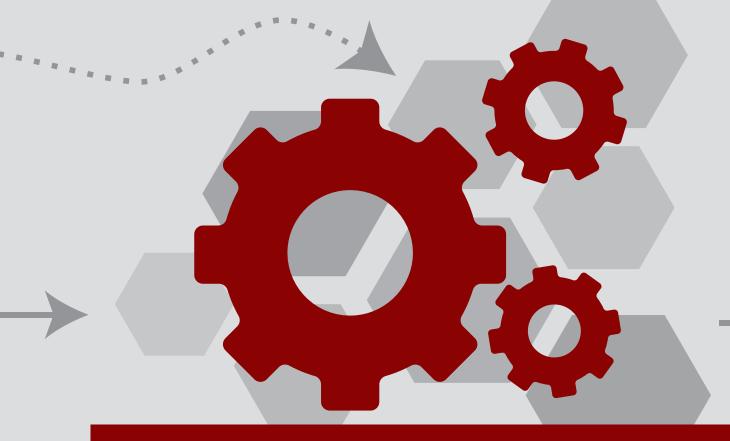
Prevê-se que o potencial de recuperação energética de resíduos aumente significativamente nos próximos 25-30 anos e grandes quantidades estejam disponíveis globalmente. A forma como estes resíduos são disponibilizados localmente deve ser considerada em cada caso, e a certeza do preço da energia e a existência de um mercado consumidor também são importantes para o caso de negócios.

Tributação e subsídios podem desempenhar papel importante, mas ambos são suscetíveis a mudanças rápidas tornando-os difíceis de usar como base em longo prazo.

Tornar um projeto de WtE atraente para os investidores está, portanto, associado à alocação de risco. As tecnologias eficientes para tratamento e recuperação energética de resíduos são, como ilustrado no relatório, já comprovadas e aprimoradas ao longo de décadas. Observados do ponto de vista dos investidores, os riscos tecnológicos são considerados baixos para projetos WtE.

As plantas de DA também estão comprovadas, e o risco tecnológico é baixo quando se assegura um pré-tratamento eficiente dos resíduos em conjunto com a mitigação de odores. Com isso, a garantia de disposição final do digestato, para fins agrícolas devido ao seu risco ou somente ao receio dele, segue como um desafio.

As plantas DA geralmente dependem de uma variedade de insumos em que os de resíduos orgânicos domiciliares são um deles. Os riscos incluem a incerteza do preço da energia, a existência de um mercado eficiente de energias renováveis, do preço e disponibilidade dos insumos complementares. Isso demonstra que tanto o público quanto o investidor possuem interesses mútuos na mitigação de riscos para que as plantas WtE sejam bem-sucedidas.



14 SELEÇÃO DAS TECNOLOGIAS WTE

- Selecionar uma tecnologia sustentável e pragmática de recuperação energética de resíduos é complicado.
- Os atores têm prioridades conflitantes sobre critérios econômicos e ambientais.
- A estrutura proposta orienta as partes interessadas a alcançar uma decisão mutuamente sustentável.
- Uma decisão sustentável é alcançada quando os custos são divididos de forma justa entre os atores (partes interessadas).
- Um Estudo de Pré-Viabilidade é o primeiro passo a ser dado na seleção da tecnologia WtE.
- Para autoridades locais, o processo de tomada de decisão sobre se a recuperação energética de resíduos é adequada para as circunstâncias deve integrar o desenvolvimento de suas estratégias de resíduos e planos locais.

Estudo de pré-viabilidade

É o primeiro passo para selecionar a tecnologia mais apropriada para a área de interesse. Os principais critérios para seleção de tecnologias de processamento térmico são:

- 1) Quantidade gerada de rejeitos.
- 2) Características dos resíduos (físicas e químicas).

- 3) Disponibilidade de áreas.
- 4) Condições ambientais prevalentes.
- 5) Condições climáticas e de terreno.
- 6) Aceitação social.
- 7) Mercado consumidor para os produtos.
- 8) Capital de investimento.
- 9) Localização.
- 10) Normas ambientais.

Para a condução do estudo de pré-viabilidade, são necessários:

1) Determinar a disponibilidade de resíduos ao longo do ano e estimar a quantidade de energia que pode ser recuperada para cada tecnologia, incluindo DA. No caso de a quantidade de resíduos estar abaixo da exigência, um plano regional pode ser preparado para consorciamento de cidades e, assim, atingir a quantidade desejada de resíduos.

A quantidade gerada de resíduos desempenha papel vital na seleção de tecnologias de tratamento. Plantas de biogás são capazes de manipular eficazmente até 30 tons/dia e adequadas para cidades pequenas, enquanto resíduos para plantas WtE são rentáveis para o processamento a partir de 500 tons diárias.

De modo geral, deve ser tido em conta o seguinte quadro:

Tabela 11 – Melhores opções tecnológicas adotadas com base na faixa populacional

Faixa populacional	Geração tons/dia	Composição % de biodegradáveis	Opções tecnológicas de WtE
			Maior processamento de resíduos com DA+CDR.
Acima 2 milhões	>1100 t/d	35-50%	Planta de WtE por: gaseificação, plasma, pirólise, incineração (CDR para a indústria cimenteira).
1 milhão a 2 milhões	550-1100 t/d	40-55%	Maior processamento de resíduos com DA+CDR.
			Planta de WtE onde a geração exceda 500 tons/dia por: gaseificação, plasma, pirólise, incineração (CDR para a indústria cimenteira).
100.000-1 milhão	30-550 t/d	40-55%	Maior processamento de resíduos com DA+CDR como insumo para usinas de energia/indústria cimenteira.
<50.000	< 10 t/d	45-65%	DA, CDR.

Fonte: preparado por D-Waste, 2016. Tradução por: Gabriela GPO Sartini, 2016.

- Investigar a demanda por aquecimento/resfriamento distrital na área de interesse.
- Encontrar solução lógica para sua instalação em termos de localização e conexão à rede de energia.
- 3) Desenvolver um modelo de projeto de planta termodinamicamente correto, adaptável às mudanças na composição de resíduos e demanda de aquecimento distrital, que pode determinar a produção de energia térmica e elétrica mais adequada em termos de lucro.
- Obter estimativas de custo dos fornecedores de componentes do projeto de planta específica.
- 5) Criar modelagem nos aspectos econômicos e ambientais que utilizem os dados de saída do projeto da planta para determinar a viabilidade nesses aspectos.

Princípio da proximidade

Ao considerar se a energia a partir de resíduos deve ser parte de uma estratégia de gestão, uma questão-chave é se exigirá novas infraestruturas ou se há capacidade suficiente em outros locais. É aqui que surgem frequentemente duas questões que, se negligenciadas, podem exceder a capacidade local. São elas (WASTE ATLAS, 2018):

- O princípio da proximidade.
- A ideia de receber "o lixo dos outros".

Critérios-chave para WtE

Os projetos de recuperação energética de RSU são adequados apenas se preenchem os seguintes critérios:

- Há anos existe um sistema de gestão de resíduos maduro e em bom funcionamento.
- A incineração é especialmente relevante para o conteúdo do contentor seco em um sistema de coleta de duas frações. Para resíduos misturados, é necessário um pré-tratamento.
- Para incineração, o valor calorífico baixo dos resíduos deve ser de pelo menos 1.450 kcal/kg (6 MJ/kg) em todas as estações.
 O valor calorífico médio anual não deve ser inferior a 1.700 kcal/kg (7 MJ/kg).
- O forno deve ser concebido de acordo com as melhores tecnologias disponíveis para assegurar uma operação estável e contínua e queimar completamente os resíduos e os gases de combustão.
- O fornecimento de resíduos combustíveis deve ser estável e atingir ao menos 500 tons/dia.
- A produção de eletricidade e/ou vapor pode ser vendida de forma sustentável (por exemplo, alimentando a rede geral com tarifas adequadas). É possível absorver o custo de tratamento ampliado por meio de taxas de gestão, taxas de entrada.
- O pessoal qualificado pode ser recrutado e mantido.
- Como o investimento de capital é muito alto, o quadro de planejamento da comunidade deve ser estável o suficiente para permitir um horizonte de planejamento de 25 anos ou mais.
- O estudo de pré-viabilidade deve trazer conclusões positivas para a respectiva comunidade.
- São propostos e implantados sistemas de monitorização rigorosos.

Considerações-chave

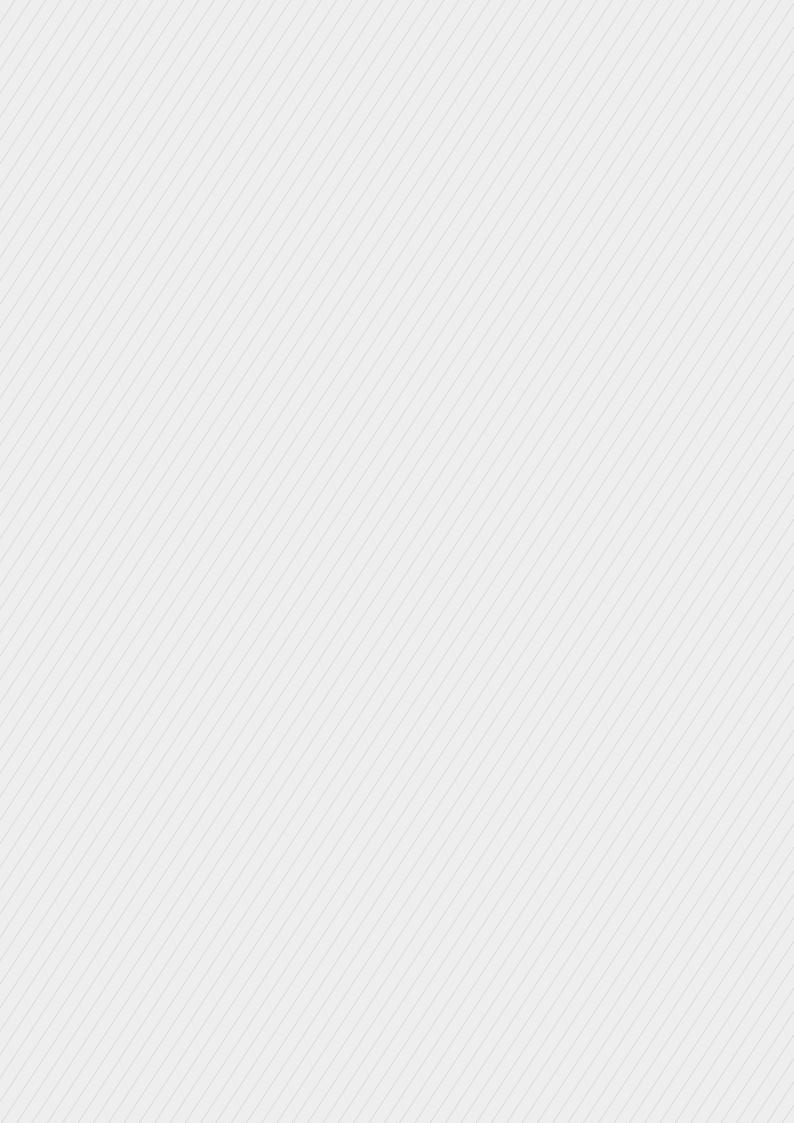
São considerações-chave para a operação de plantas de incineração de RSU:

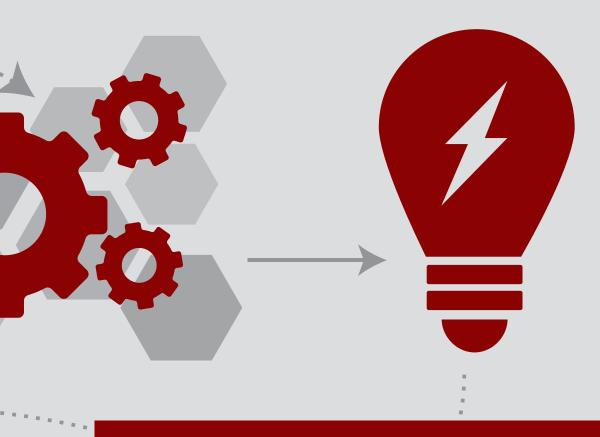
- Temperatura mínima de combustão em fase gasosa de 850 °C e um tempo mínimo de permanência dos gases de combustão de dois segundos após o último fornecimento de ar de incineração.
- O teor de oxigênio (<6%) deve ser mantido para minimizar a corrosão e garantir a combustão completa. O teor de CO dos gases de combustão é um indicador-chave da qualidade da combustão.
- As cinzas volantes atuam como um catalisador para nova síntese (a 200-450 °C) de dioxinas e furanos, e para reduzi-las é imperativo que o máximo de cinzas volantes seja removido antes de esfriar os gases para 200-450 °C.
- Os gases de combustão produzidos nas caldeiras devem ser tratados por um sistema elaborado de tratamento de gases de combustão.

Tabela 12 - Especificações para diferentes tecnologias de WtE

Método	Características dos RSU	Relação C/N Valor calorífico	Controle de pH	Temperatura necessária	Umidade	
Digestão Anaeróbia	Apenas fração orgânica segregada; quanto maior for a putrescibilidade, melhor é o rendimento de gás; a matéria orgânica fibrosa é indesejável, uma vez que os microrganismos anaeróbios não decompõem moléculas lenhosas como a lignina.	25-30 (preferível)	As bactérias acidificantes através da produção de ácidos reduzem o pH do biorreator. A bactéria metanogênica opera em uma faixa de pH e temperatura estáveis.	As bactérias mesófilas atuam melhor em torno de 37 -41 °C ou a temperatura ambiente entre 20°-45 °C. As bactérias termófilas atuam de forma ideal em torno de 50°-52 °C e em temperaturas elevadas até 70 °C. Os mesófilos são mais tolerantes às mudanças nas condições ambientais e, portanto, mais estáveis, mas os termófilos agem mais rapidamente.	>50% Implicações na alimentação, produção de gás, tipo de sistema, eficiência do sistema.	
Incineração	RSU com valor calorífico tão alto quanto possível; matérias voláteis> 40%; carbono fixo <15%; total inerte <35%.	Valor calorífico – o maior possível;> 1.200 Kcal/kg	-	850 °C a 1.400 °C	A mínima possível; <45%.	
Pirólise		=	6.5-8.5 (ótimo)	Temperaturas elevadas,	_	
			, ,	400 °C - 900 °C		
Gaseificação		=	=	Temperatura maior que 700 °C	-	
Plasma	_	_	_	A temperatura da tocha varia de 2.200 °C a 13.900 °C	_	

Fonte: preparado por D-Waste, 2016. Tradução por: Gabriela GPO Sartini, 2016.





15 AQUISIÇÃO & FINANCIAMENTO

Aquisição de plantas WtE

Uma vez que são adotadas a estratégia e as políticas de resíduos, o primeiro passo em qualquer aquisição será desenvolver a especificação que define o que a autoridade local deseja. Isso resultará da estratégia de gestão de resíduos e, às vezes, não será apenas pela energia, mas pelo resultado global da gestão planejada. Em geral, a especificação não se compromete com, ou exclui, o uso de tecnologias específicas, a menos que isso seja indicado na estratégia. Em vez disso, será concebido de forma a permitir que os licitantes determinem a melhor maneira de entregar os resultados específicados.

O objetivo do processo de contratação consiste em obter os melhores resultados para a autoridade, assegurando, ao mesmo tempo, condições isonômicas para os concorrentes.

Uma vez definida a especificação pela autoridade, esta será anunciada e as empresas concorrerão pelo contrato e gradualmente serão reduzidas a duas empresas que apresentarão as propostas finais. Estas propostas serão cuidadosamente avaliadas até uma ser escolhida. É importante que não haja mudanças fundamentais na oferta durante este período, pois isso pode invalidar a isonomia do processo.

Tal como acontece com qualquer grande projeto de infraestrutura, a aquisição pode ser onerosa e levar um período significativo de tempo, com escopo limitado de comunicação ou consulta externa. Essa etapa, que vai da especificação baseada em resultados a uma proposta clara com apenas um escopo limitado de modificação, pode dar origem à sensação de "portas fechadas" do processo. É por isso que

é vital identificar e aproveitar as oportunidades de influência dos planos e políticas adotados antes do início da aquisição.

Para uma fábrica comercial, isto é, que não é financiada pelo governo (local ou nacional), não há necessidade de tal processo de aquisição. A fábrica licitará contratos de empresas privadas ou de outros detentores de resíduos. Em certo sentido, a fábrica comercial chega primeiro para logo procurar seus insumos, ao contrário do processo de autoridade local, em que os resíduos existem e a autoridade está buscando uma solução para gerenciá-los, embora, como se indica a seguir, seja difícil financiar qualquer instalação sem ter certeza quanto à origem dos resíduos.

Financiamento dos projetos WtE

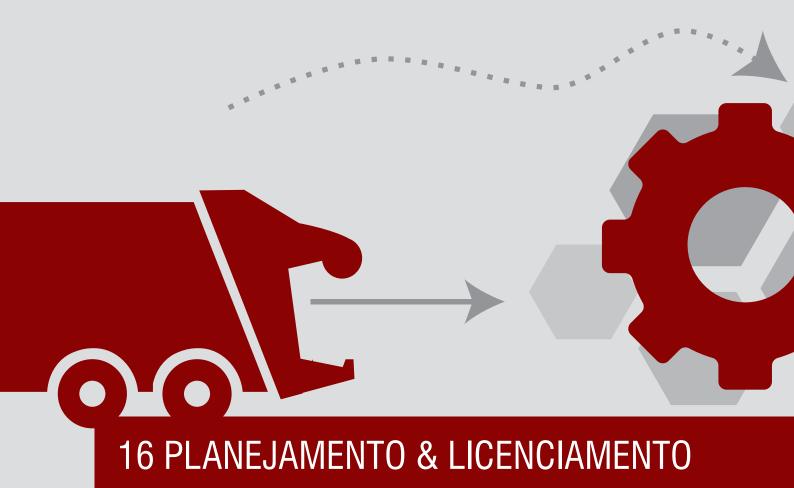
A parte mais crítica de qualquer projeto de infraestrutura é garantir a segurança financeira. Isto pode ser um desafio para os projetos de tratamento de resíduos, particularmente quando estão envolvidas tecnologias mais inovadoras. As exigências do financiamento podem restringir significativamente as opções disponíveis para um projeto (DEFRA, 2014).

Existem três formas principais de financiar a infraestrutura de WtE; não é incomum para um projeto usar uma mistura delas:

- Dívida emprestar dinheiro de um banco e pagar juros (como uma hipoteca).
- Private equity investidores colocando dinheiro em um projeto com vistas a obter uma parte dos lucros ou dividendos.
- No balanço da empresa utilização dos próprios recursos para financiar o projeto ou garantir empréstimos.

Os credores muitas vezes querem ver contratos de longo prazo para um projeto, pois uma fonte primária de renda para uma planta de WtE não é apenas a energia produzida, mas a taxa cobrada pela entrada dos resíduos. Esta taxa é cobrada sobre uma base de "por tonelada de resíduos" e os contratos geralmente incluem também as tonelagens mínimas garantidas por ano. Isso dá à planta uma fonte mínima de renda garantida que os investidores estão procurando. Tais contratos, em longo prazo, normalmente só estão disponíveis para os resíduos das autoridades locais. Os contratos de resíduos comerciais e industriais são, em geral, muito mais curtos e dificultam o financiamento desses projetos (DEFRA, 2014).

As autoridades locais, em suas especificações para esses contratos de longo prazo, definirão exigências difíceis em termos de garantias para levar resíduos (disponibilidade operacional) e histórico da empresa.



O sistema de planejamento visa ajudar a garantir que o desenvolvimento ocorra de forma que equilibre os impactos ambientais, sociais e econômicos, garantindo, em última análise, o desenvolvimento sustentável. Não é um sistema de absolutos e, embora muito deva ser legalmente considerado no processo de planejamento, as decisões se reduzem a uma questão de equilibrar as evidências (DEFRA, 2014).

O sistema de planejamento possui dois elementos-chave:

- Elaboração de planos de desenvolvimento (locais).
- Gerenciamento do desenvolvimento (através da determinação de aplicativos de planejamento).

A licença de planejamento é necessária antes de qualquer planta WtE ser construída. Discussões entre a recuperação energética de resíduos e a autoridade responsável pela gestão de resíduos devem começar bem antes da apresentação de um pedido de licença. O objetivo destas discussões será compreender a situação local e os requisitos do plano de gestão local para que qualquer implementação se some aos esforços dele e, assim, maximizar as chances de aprovação (DEFRA, 2014).

Também tem sido uma boa prática dos implementadores consultar diretamente a comunidade para entender suas necessidades e preocupações, é importante ter expectativas claras de ambos os lados sobre o que pode ser alcançado. Os implementadores precisam ser receptivos às preocupações da comunidade, enquanto esta precisa reconhecer as limitações e restrições do desenvolvimento do

projeto. Muitas questões identificadas neste guia podem ser levantadas e os responsáveis devem estar prontos e capazes de enfrentá-los. Se realizadas com antecedência, essas discussões podem ajudar a influenciar aspectos importantes, como o desenho e o impacto visual da instalação, as conexões de transporte, etc., e os conhecimentos locais podem ser explorados em benefício tanto do desenvolvedor quanto da comunidade, em um processo contínuo e de longo prazo (DEFRA, 2014).

Em resumo, enquanto as licenças de planejamento são necessárias para construir a planta, as licenças ambientais são necessárias para operá-la e há inevitavelmente algumas sobreposições nos processos; é possível um projeto obter uma aprovação e não a outra, pois os critérios examinados são distintos. E como não há sentido em construir uma planta que não pode ser operada, todas as permissões/licenças precisam ser obtidas antes da construção e os dois processos podem acontecer em paralelo.

As licenças ambientais contêm condições para proteger o ambiente e a saúde humana. As licenças ambientais de plantas de WtE podem estabelecer controles sobre uma série de fatores, incluindo:

- Entradas de resíduos tipo, quantidades, rendimento anual.
- Controles de processo como as atividades no local serão gerenciadas, por exemplo, fluxo de resíduos para garantir a combustão completa.
- Limites de emissões ar, terra e água.
- Monitoramento de desempenho mensuração contínua das atividades.



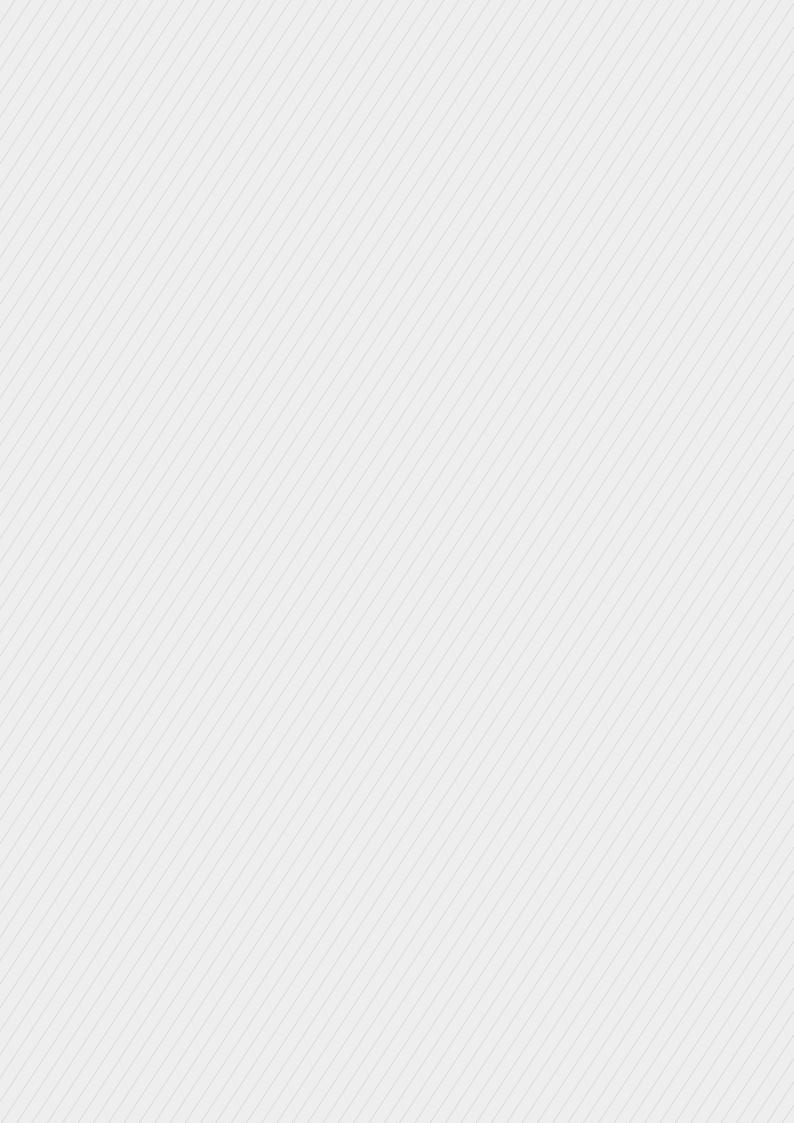
17 CONSTRUÇÃO & COMISSIONAMENTO

A construção é iniciada uma vez que todas as permissões necessárias, financiamento e contratos estão em vigor. Nesta fase, uma planta de WtE é como qualquer outro grande projeto, como são as questões e regulamentos que a rodeiam; a própria construção é monitorada pela autoridade competente para assegurar que ele está cumprindo as permissões, os padrões apropriados e se os limites são seguros para os trabalhadores e para o meio ambiente. É recomendado que o envolvimento com a comunidade continue durante toda a fase de construção para garantir que quaisquer questões sejam identificadas e tratadas, especialmente se houver alterações no calendário de construção que possam afetar residentes locais, por exemplo, através de ruídos ou movimentos de tráfego (DEFRA, 2014).

O comissionamento é o próximo passo importante no processo, em que a instalação é testada para verificar se funciona de acordo com as especificações de projeto. Diversos fatores são examinados nesta fase:

- Monitoramento das condições de combustão para garantir que funcionam como o projetado para atender aos limites de emissão.
- Monitoramento contínuo ou regular de ampla gama de emissões para garantir que atingem ou superam os limites permitidos.
- Monitoramento dos níveis de ruído no ambiente local para garantir que atendam às licenças.

Os eventuais problemas devem ser solucionados e testados novamente. Iniciar a operação da planta pode ser um processo demorado, e sua plena operação só pode ocorrer mediante a demonstração do atendimento a todas as condições impostas pelo licenciamento.



18 PROPRIEDADE & OPERAÇÃO

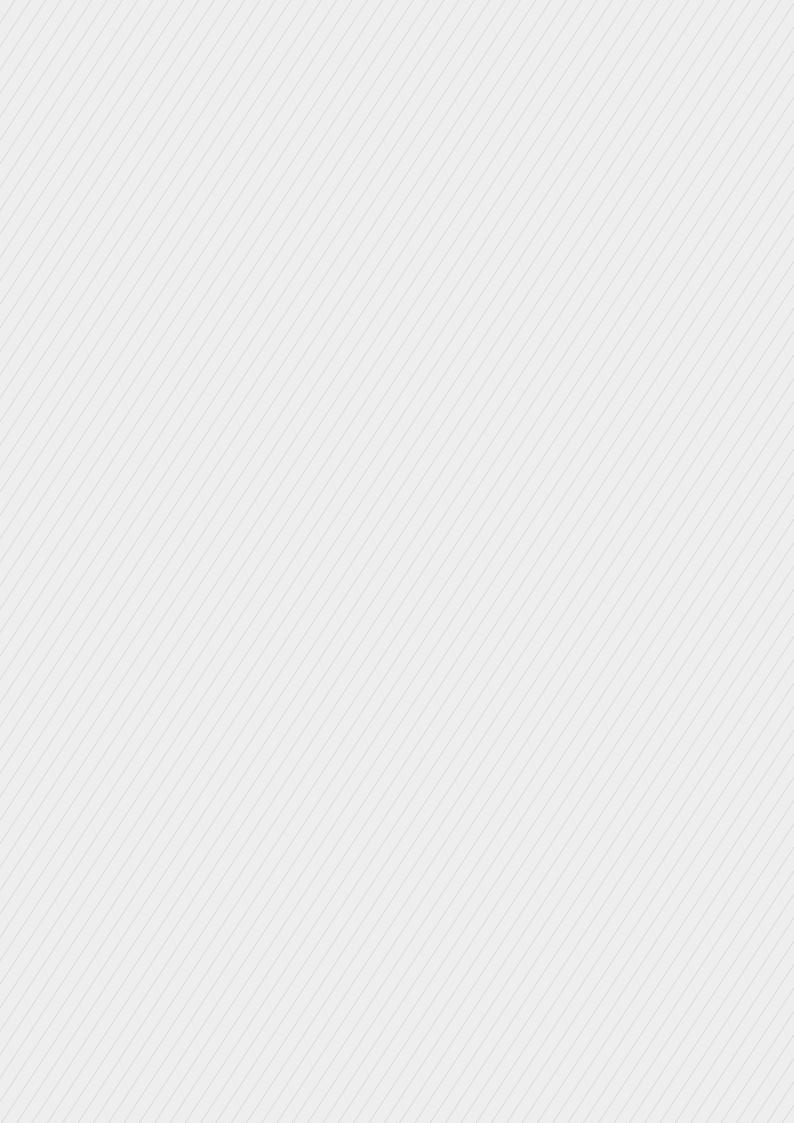
O grande número de atores interessados em uma planta de incineração resultará em interesses divergentes e possivelmente conflitantes. Dependendo da propriedade, podem surgir problemas institucionais de fronteira com a entrega de quantidade e qualidade suficientes de resíduos, padrão e preço de venda de energia, ou ambos, especialmente quando a propriedade privada e a operação estão envolvidas. Os problemas de fronteira devem ser resolvidos em fase anterior através de acordos detalhados de longo prazo, especialmente quanto ao fornecimento de resíduos e à venda de energia (DEFRA, 2014).

Uma vez totalmente comissionada, a planta entrará em sua fase operacional, que pode normalmente ser entre 20-30 anos. Muitas plantas incluem visitas guiadas ou centros educacionais para assegurar o envolvimento em longo prazo e o engajamento com a comunidade ao longo da operação (DEFRA, 2014).

Durante a operação, a planta será continuamente monitorada por um conjunto de procedimentos para garantir que está em conformidade com suas licenças ambientais.

Haverá limites estabelecidos para as emissões de uma gama de substâncias, incluindo monitoramento contínuo, ou seja, em determinado ponto, o nível de uma substância não deve exceder um dado nível; «controles por amostragem» no caso de uma substância ser medida, não devendo ser excedido determinado limite; e limites periódicos: as emissões totais em um dia, um mês, um ano, não devem exceder certos níveis.

Muitas plantas publicarão suas estatísticas das emissões regularmente e algumas o farão em tempo real disponível nos centros do visitante ou mesmo na internet.





19 O SETOR DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL

19.1 RSU em nível nacional

No Brasil, em 2017, foram gerados mais de 214 mil toneladas de RSU por dia, das quais mais de 90% foram coletadas. A região Sudeste apresentou a maior cobertura de coleta regular e alguma iniciativa de coleta seletiva está presente em 70% dos municípios brasileiros. Estima-se que o país perde, todo ano, cerca de R\$8 bilhões pela ineficiência ou ausência completa de coleta seletiva de resíduos e sua reciclagem.

Um pouco mais de 40% do montante coletado é disposto em lixões e/ou aterros controlados, que apresentam riscos à saúde pública e ambiental, ainda que a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em vigor desde Agosto de 2010, condene essa prática criminosa e estabeleça que somente a fração de rejeitos (aprox. 17% do total) seja enviada a aterros sanitários. Uma grande limitação à implantação bem sucedida da PNRS é a ausência de infraestrutura nas cidades, o que demanda investimentos que as prefeituras não podem arcar. Por exemplo, a coleta seletiva custa 4,5 vezes mais que a coleta regular, cerca de 200 dólares/tonelada.

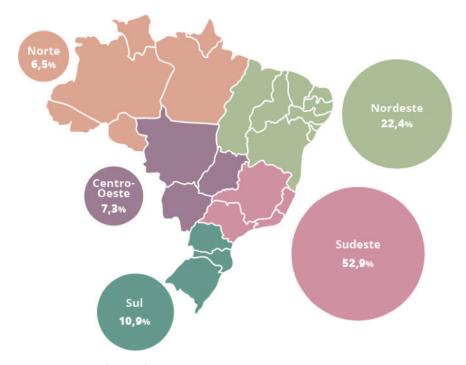
Geração

Com mais de 80% de sua população vivendo em áreas urbanas, o Brasil gerou em 2017 o total de 78,4 milhões de tons de RSU, um aumento de 1% em relação ao ano anterior e acima do índice de crescimento populacional no mesmo período. (Fontes: *ABRELPE* e *IBGE*, 2018).

Coleta

A Figura 22 mostra a distribuição por regiões do total de RSU coletado no país em 2017; observa-se que mais de 50% vem da região Sudeste, que também é a porção mais populosa do Brasil, responsável pela geração diária de 105.794 toneladas.

Figura 22 - Distribuição regional dos RSU coletados em 2017



Fonte: Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2017.

Disposição Final

A disposição adequada no Brasil ainda apresenta baixo índice, não alcançando 60% do montante coletado com encaminhamento para aterros sanitários como mostra a Figura 23.

Quase 30 milhões de toneladas foram enviadas a lixões ou aterros controlados em 2017. Do ponto de vista ambiental, praticamente não há diferenças entre estas duas formas inadequadas de disposição final, pois ambas carecem de dispositivos de controle e prevenção à poluição, além de oferecerem riscos sociais.

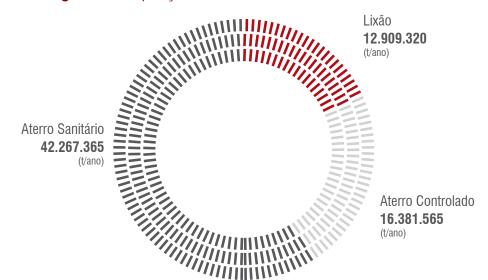


Figura 23 - Disposição final dos RSU coletados no Brasil

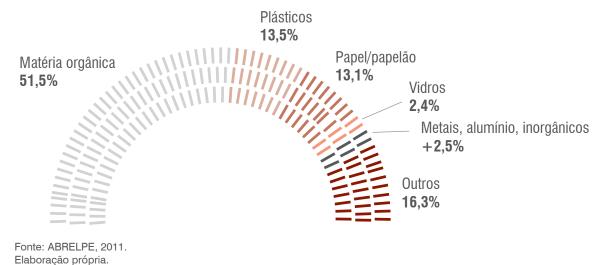
Fonte: Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2017.

Composição

Mais de 50% da composição dos RSU no país corresponde à fração orgânica, o que reflete o hábito de consumo da população, ainda que a fração seca, em sua maioria de embalagens de papelão e papel, venha crescendo e corresponda a 39% do total gerado diariamente. Alguns resíduos possuem diretrizes específicas para sua logística reversa e correta destinação, como pneus, eletroeletrônicos, embalagens de agrotóxicos, óleos lubrificantes e suas embalagens, pilhas e baterias, lâmpadas fluorescentes de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista, medicamentos, ainda que sua maioria não esteja implementada e não possua metas específicas de reciclagem.

Como demonstra a Figura 24, os principais componentes dos resíduos brasileiros são orgânicos, plásticos e papel, que contribuem com 78% do peso total dos RSU gerados; apesar da boa porcentagem de orgânicos, o que aumenta a produção de biogás, os orgânicos apresentam 60% de umidade, causando o menor valor calorífico inferior. O potencial da produção de energia depende da quantidade e qualidade dos RSU (Leme, 2010).

Figura 24 - Composição dos RSU no Brasil



Taxas de reciclagem

A taxa de reciclagem no Brasil é de apenas 3% e, de acordo com o **Waste Atlas**, é melhor que a média, especialmente em cidades maiores, como o Rio de Janeiro. Em geral, as taxas brasileiras de reciclagem são razoáveis, especialmente no que se refere ao papel, ao aço e ao alumínio, apesar de não haver programas estruturados de reciclagem municipal. A recuperação de materiais recicláveis é em grande parte deixada para os catadores, que ganham a vida através da coleta de materiais recicláveis e de sua venda para empresas privadas de reciclagem.

As cooperativas representam 74% na coleta de materiais recicláveis e cada vez mais têm trabalhado junto com as municipalidades, o que ajuda a tirar muitos desses trabalhadores da informalidade profissional e amplia a coleta seletiva. Outros componentes importantes são os PEVs, ou Pontos de Entrega Voluntário, onde os cidadãos deixam seus resíduos recicláveis; cidades como São Paulo se utilizam dos PEVs. Estima-se que a receita do mercado de reciclagem é de cerca de R\$ 12 bilhões por ano.

As principais empresas no Brasil estão assumindo um papel de liderança na organização da coleta de reciclagem nas maiores cidades do país. Em 1992, empresas privadas de diversas áreas (também conhecidas como "empresas poluentes pesadas") estabeleceram o Compromisso Empresarial para a Reciclagem (CEMPRE), uma organização sem fins lucrativos que trabalha na promoção da reciclagem no âmbito da gestão integral de resíduos como uma iniciativa para construir uma melhor imagem ambiental para seus associados. O CEMPRE procura aumentar a conscientização da comunidade sobre questões de reciclagem e outros resíduos sólidos através de publicações, pesquisas técnicas, seminários e bancos de dados.

Os materiais menos reciclados são embalagens cartonadas (Tetra Pak), a uma taxa de 26,6%, devido à dificuldade de separação dos materiais que as compõem.

As latas de alumínio são os materiais mais reciclados devido ao seu alto valor no mercado. As altas taxas de reciclagem no Brasil são um reflexo dos níveis de pobreza e do desemprego, já que a coleta desses materiais representa um bom rendimento para muitas famílias de classe baixa.

Tabela13 - Materiais mais reciclados no Brasil

Materiais	Quantidade Total Reciclada
Lata de Alumínio	97,9%
Garrafa PET	58,9%
Papel e Papelão	47%
Aço	46,5%
Aço	46,5%

Fonte: Lucas Boechat, 2015.

19.2 RSU em nível regional

Os RSU apresentam diferenças significativas entre as regiões brasileiras, uma vez que também existem diferenças no nível de vida entre as regiões Sul e Norte; por exemplo, algumas cidades do Sul estão se aproximando dos mesmos níveis de renda de países desenvolvidos, além de buscarem melhorar a gestão de resíduos para sua conformidade legal. Nesse sentido, o Sudeste tem a maior geração de resíduos per capita (1,217 kg/hab/dia em 2017), enquanto o Sul experimenta as menores taxas de geração (0,719 kg/hab/dia em 2017). Existe também uma variação nas práticas de disposição final entre as regiões: enquanto no Sul e Sudeste a maior parte de seus RSU, cerca de 70%, é descartado em aterros sanitários, no resto do Brasil apenas cerca de 60% dos resíduos são dispostos em aterro sanitário. O restante é encaminhado para lixões ou aterros controlados.

19.3 WtE no Brasil

Segundo a ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, em 2017 o Brasil contava com 35 plantas de geração de energia a partir do biogás produzido em aterros sanitários, com uma produção de 135 megawatts médios, o que representa um crescimento de 14% em relação ao ano de 2016. A maior parte dessa geração está localizada no Estado de

São Paulo, com uma potência instalada de 70 MW, a partir das seguintes 7 plantas (SECRETARIA DE ENERGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2016):

- São João, em São Paulo, com 24,64 MW;
- Estre, em Guatapará, com 5,7 MW;
- Bandeirantes, em São Paulo, com 4,6 MW;
- Tecipar, em Santana de Parnaíba, com 4,3 MW;
- Ambient, em Ribeirão Preto, com 1,5 MW;
- Energ-Biog, em Barueri, com 30 kW;
- Termoverde, em Caieiras, com 29,5 MW.

Além das plantas de geração de energia a partir do biogás em aterros sanitários, existem alguns projetos em andamento para geração de energia a partir do tratamento térmico dos resíduos sólidos, sendo que o de maior escala está sendo desenvolvido em Barueri/SP, com capacidade para tratar 825 toneladas de lixo por dia e potência instalada de 20MW de energia.

Incentivos Financeiros

O governo federal autorizou as instituições financeiras federais a criar linhas de crédito especiais para financiar atividades de reuso, reciclagem e recuperação de resíduos, incluindo o desenvolvimento e implantação de novas tecnologias no setor de gestão de resíduos no Brasil.

Além disso, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com o objetivo de incentivar a construção de plantas WtE, criou um incentivo para a geração desse tipo de energia, oferecendo uma isenção de taxas de transmissão e distribuição. Esta isenção estará disponível para plantas com capacidade instalada de até 30 MW que utilizam resíduos para satisfazer mais de 50% das suas necessidades de combustível.

Segundo o BNDES, o volume de investimentos em gestão de RSU para o período 2015-2018 deve ter atingido cerca de R\$ 5 bilhões (1,5 bilhão de euros).

20 QUADRO REGULATÓRIO BRASILEIRO PARA RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS

20.1 Política Nacional de Resíduos Sólidos

Após duas décadas de debates, em agosto de 2010, o Brasil sancionou a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei Federal nº 12.305/2010, mediante alteração da Lei nº 9.605/1998 e estabelecendo as diretrizes para uma gestão integrada e adequada de resíduos sólidos.

A PNRS estabelece princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes para a gestão integrada dos RSU no país, incluindo também os resíduos perigosos, a responsabilidade compartilhada dos geradores e do poder público, bem como instrumentos econômicos aplicáveis.

Aparentemente, a PNRS considerou as principais tendências globais para a gestão de resíduos e mais especificamente a hierarquia na gestão, estando entre seus principais objetivos:

- Prevenção e redução na geração de resíduos.
- Melhor aproveitamento dos produtos sempre que possível.
- Segregação das frações e processamento dos resíduos em plantas de reciclagem.
- Adoção de ações de recuperação energética dos resíduos que não puderem ser reciclados.

 Tratamento e disposição final com as melhores tecnologias disponíveis e a custos acessíveis.

Além da hierarquia de resíduos, a lei, entre outros, se concentra nos meios para alcançar os objetivos acima, ressaltando a importância de:

- Gestão integrada de resíduos sólidos.
- Coordenação entre diferentes níveis do governo e setor empresarial com o propósito de estabelecer uma cooperação técnica e financeira visando à gestão integrada de resíduos.
- Incentivos para o desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empreendedorismo voltados ao aprimoramento dos processos produtivos e reúso dos resíduos sólidos, incluindo recuperação e consumo de energia.

20.2 Recuperação Energética de Resíduos

Tratamento térmico e recuperação energética de resíduos são opções preferíveis à disposição em solo (seja aterros sanitários ou as formas inadequadas), prática atual e corrente no Brasil.

Além disso, no artigo 9, a PNRS menciona que "poderão ser utilizadas tecnologias para a recuperação energética de RSU desde que sejam comprovadas a viabilidade técnica e ambiental e seja implementado um programa de monitoramento das emissões de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental competente", descrevendo como a recuperação energética dos resíduos pode acontecer no Brasil.

Para atingir suas metas e objetivos, a PNRS propõe regras em escala nacional e interpreta a responsabilidade como compartilhada entre governo, setor privado e sociedade. Na prática, afirma que todos os resíduos devem ser processados adequadamente antes da disposição final e que o infrator está sujeito às sanções legais.

Mais especificamente, a PNRS define as autoridades municipais como principais responsáveis pela limpeza urbana, coleta e disposição final de resíduos. Além disso, devem estabelecer a coleta seletiva de materiais recicláveis e sistemas de compostagem para resíduos orgânicos; desta forma, obtêm benefícios ambientais e econômicos ao preservar os recursos naturais, aproveitar o valor dos materiais e sustentar seus aterros sanitários, uma vez que receberão quantidades menores de resíduos.

De sua parte, os cidadãos devem participar do sistema de coleta seletiva estabelecido, segregando e acondicionando adequadamente os resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis que geram.

A PNRS também envolve as empresas na cadeia de gestão de resíduos sob o princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e pela logística reversa. A logística reversa é considerada um marco da política brasileira de resíduos sólidos, segundo a qual, quando um produto chega ao fim de sua vida útil, é devolvido ao seu fabricante ou importador para reciclagem ou outro tratamento adequado.

Por último, um fato que não deve ser ignorado é o significado dado à integração dos catadores informais no sistema oficial de gestão de resíduos sólidos. Dessa forma, as autoridades públicas poderão reduzir os grandes investimentos em equipamentos e pessoal, trabalhando para atingir as metas estabelecidas para redução, reciclagem e desvio de resíduos dos aterros sanitários.

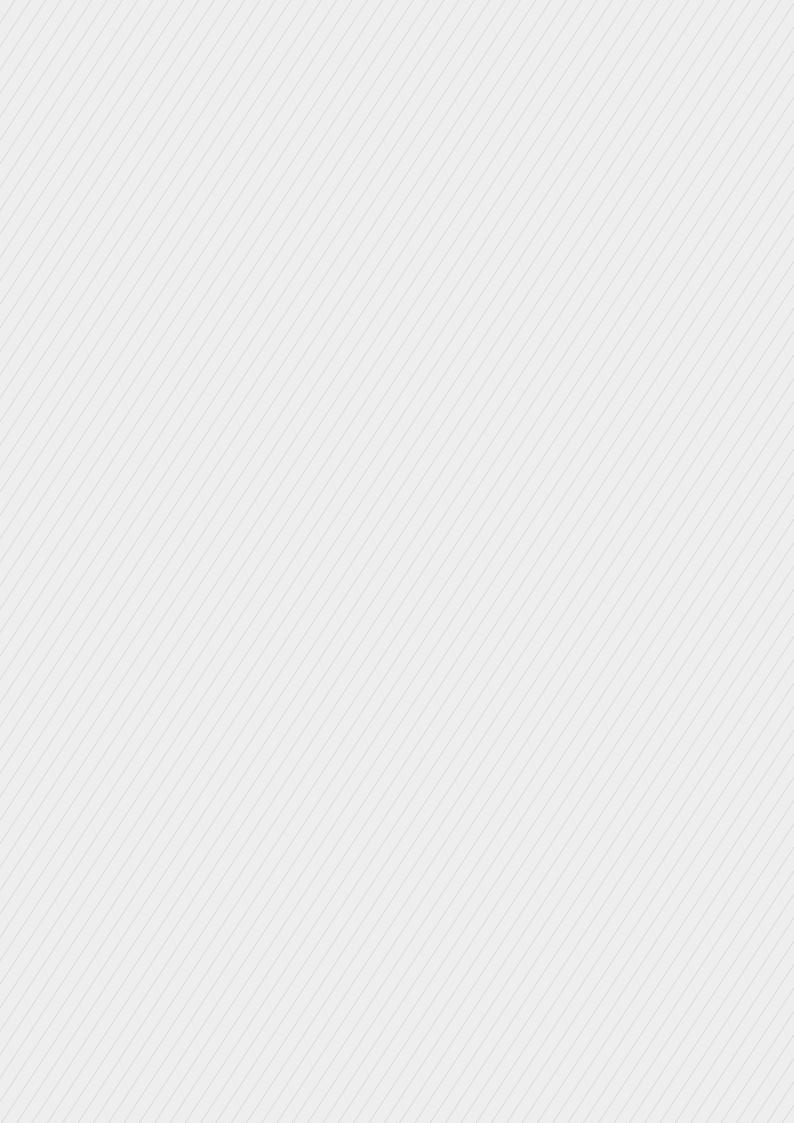
Resolução SMA/SP nº 79, de novembro de 2009

Antes do estabelecimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos, a necessidade de uma solução sólida e sustentável para a crescente questão da gestão de resíduos levou o estado de São Paulo a estabelecer a Resolução nº 79, de 4 de novembro de 2009, que estabelece requisitos e limites de emissão relativos ao funcionamento e ao licenciamento de instalações de valorização energética de resíduos sólidos.

A resolução ressalta que o tratamento térmico de resíduos é considerado "uma tecnologia de mitigação no enfrentamento do aquecimento global, bem como um Mecanismo de Desenvolvimento Limpo pelo Comitê Executivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (Conselho Executivo – UNFCCC)".

Além disso, de acordo com a resolução, o uso de RSU como fonte de energia renovável elimina os efeitos adversos da disposição direta no solo e destaca a necessidade de adotar alternativas sustentáveis principalmente nas regiões metropolitanas de São Paulo, onde o volume de resíduos gerado é muito alto e a disponibilidade de áreas é quase inexistente. Além disso, é claramente afirmado que foram desenvolvidas tecnologias de controle de emissões reconhecidas internacionalmente, especialmente sobre poluentes orgânicos persistentes (POPs) para a recuperação energética de RSU.

Sem dúvida, a Resolução nº 79 estabelece um quadro estreito no âmbito do qual as unidades de valorização energética dos resíduos sólidos funcionariam adequadamente, assegurando operações sólidas, proteção da saúde humana e do ambiente e recuperação/geração de energia a partir de fontes renováveis, como resíduos.





21.1 Possíveis configurações e oportunidades para esforços conjuntos entre municípios e indústria no uso de CDR

A plantas de WtE no Brasil poderiam ser aplicadas em nível municipal (no caso da DA) ou em um consorciamento de municípios, em nível regional e nacional (os casos de DA e incineração). A escolha das tecnologias depende de fatores, como a população atendida (capacidade), a entrada de resíduos e a política que os municípios, a região, a indústria e/ou o governo federal gostariam de seguir.

Como mais de 50% dos resíduos no Brasil são de origem orgânica, parece haver um grande potencial para plantas de digestão anaeróbia, que funcionam eficientemente com capacidade nominal superior a 30 tons/dia (mais de 100.000 habitantes atendidos). O metano produzido a partir das instalações de biogás pode ser recuperado, com relativa facilidade, para geração de eletricidade e aquecimento industrial/doméstico.

No entanto, deve-se notar que esta opção tecnológica funciona melhor com resíduos orgânicos segregados na fonte; os resíduos orgânicos misturados necessitam de um pré-tratamento mais sofisticado para extrair os materiais secos e resultar numa alimentação homogênea do biorreator.

Vários fornecedores comerciais projetaram uma variedade de digestores para o mercado global (ver Tabela 14) que poderiam ser utilizados no cenário brasileiro.

Esses sistemas comerciais abrangem toda a gama de categorias de sistemas de DA modificados; a revisão a seguir resume a literatura consultada para muitos dos sistemas existentes e emergentes.

Tabela 14 – Resumo das tecnologias comerciais de DA com plantas de referência de grande escala (2008)

Nome do sistema		Capacidade (tons/	Nº de fases		Sólidos totais		Temperaturas de operação	
	plantas ano)		1	2	<20%	>20%	35 °C	55 °C
AAT	8	3.000-55.000	Х		Х		Х	
ArroBio	4	90.000-180.000		Х	Х		Х	
ВТА	23	1.000-150.000	Х	Х	Х		Х	Х
Biocel	1	35.000	Х			Х	Х	
Biopercolat	1	100.000		Х		Х	Х	
Biostab	13	10.000-90.000	Х		Х			Х
DBA – Wabio	4	6.000-60.000	Х		Х		Х	
Dranco	17	3.000-120.000	Х			Х		Х
Entec	2	40.000-150.000	Х		Х		Х	
Haase	4	50.000-200.000		Х	Х		Х	Х
Kompogas	38	1.000-110.000	Х			Х		Х
Linde-KCA/BRV	8	15.000-150.000	Х	Х	Х	Х	Х	Х
Schwarting-Uhde	3	25.000-87.600		Х	Х			х
Valorga	22	10.000-270.000	Х			Х	Х	х
Waasa	10+	3.000-230.000	х		Х		Х	Х

Inclui plantas operacionais ou planejadas que aceitam: RSU, resíduos de cozinha, resíduos de alimentos, resíduos verdes. Não inclui resíduos de processamento de alimentos ou águas residuais. Pode incluir codigestão com outras substâncias orgânicas, tais como resíduos biológicos ou lodo de esgoto. Pilotos e demonstrações foram excluídos.

Obs.: a lista acima não é exaustiva e os nomes dos sistemas podem mudar à medida que as empresas adquirem e desenvolvem novas tecnologias.

Fonte: elaborado por D-Waste, 2016. Tradução por: Gabriela GPO Sartini, 2016.

Plantas de DA podem ser combinadas com TMB e **produção de CDR**, que oferece vantagens em casos em que ele pode ser incinerado com outros combustíveis em **plantas industriais** já existentes equipadas com sistemas de controle de emissões atmosféricas, em conformidade com os padrões de emissões de metais voláteis, dioxinas e particulados.

O combustível derivado de resíduo é promissor, com VCL entre 15-25 kJ/kg, que pode ser utilizado como um substituto ou como um combustível autônomo em indústrias com alto consumo de energia. Isso pode resultar em três grandes vantagens: em primeiro lugar, contribui para a redução de CO₂ das centrais elétricas; em segundo lugar, grandes quantidades

de combustíveis fósseis são economizadas por sua substituição pelo CDR. Em terceiro lugar, dá uma possível solução para a crise de gestão de resíduos.

Como já descrito anteriormente, o CDR pode ser aproveitado por diferentes tecnologias de consumo final, sendo as mais comuns:



- 2) Monocombustão em plantas específicas de WtE, como leito fluidizado ou gaseificação/pirólise.
- Cocombustão em usinas elétricas, por exemplo, de lignino ou carvão, de tecnologias de fundo seco ou úmido.
- 4) Caldeiras industriais.
- 5) Plantas tradicionais de incineração com ou sem geração de energia.
- 6) Indústrias metalúrgicas (produção de aço, por exemplo) para substituição de agentes redutores.

O CDR não é tipicamente produzido para ser usado em plantas WtE. No entanto, devido à eventual baixa qualidade ou devido à falta de outros consumidores, o CDR pode ser aproveitado pelas plantas de recuperação energética de resíduos, inclusive a construção de plantas dedicadas à "gaseificação" ou mesmo plantas de pirólise para recuperar CDR são opções-chave.

No Brasil, o CDR pode ser usado em fornos de cimenteiras e nas indústrias químicas e de processamento de alimentos, que precisam gerar calor/vapor em seus processos.

As plantas de produção de CDR podem ser instaladas nas mesmas condições de outros tipos de plantas de recuperação de resíduos, em zonas industriais, em desenvolvimento, entre outras. Geralmente se localizam com plantas de incineração de resíduos, que possuem restrições próprias de área, e que nem sempre são industriais e/ou em desenvolvimento.

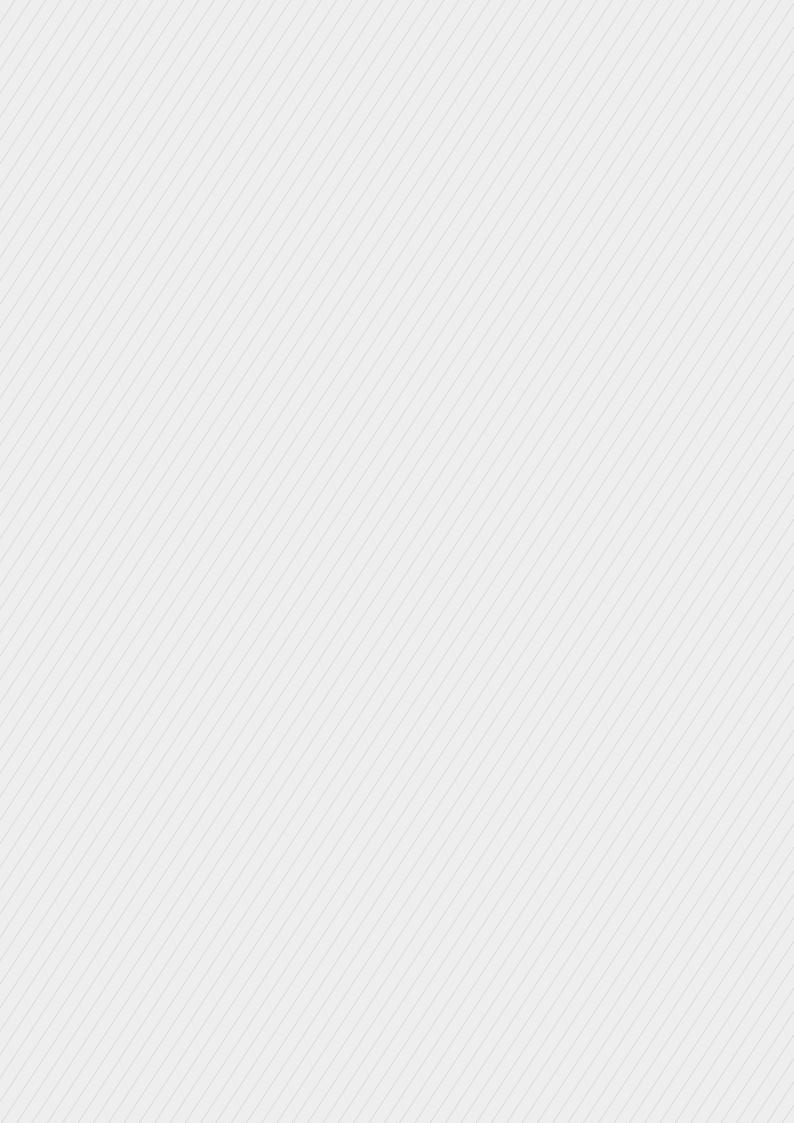
Para o Brasil, a combustão direta dos resíduos, tal como recebidos na planta, é viável e pode ser amplamente aplicada em cenários com capacidade a partir de 500 tons/dia (mais de 900.000 habitantes), sendo menos dispendioso de implementar do que a combinação de uma planta de produção de CDR combinada a uma planta de WtE para CDR. No entanto, é preciso ter em conta que o alto teor de umidade do resíduo brasileiro pode reduzir o VCL do insumo para a incineração e pode haver necessidade de pré-tratamento para secagem.



Para cidades com população abaixo de 100.000 habitantes, tecnologias WtE (mesmo DA) não são recomendadas como soluções de bom custo-benefício para tratamento de RSU, apesar de não excluídas. Em tais casos, pode ser mais sustentável a adoção de plantas TMB com compostagem aeróbia da fração orgânica, e eventualmente a produção de CDR com os rejeitos resultantes do processo.

21.2 Barreiras à adoção de plantas WtE

- As taxas de entrada são muito baixas no Brasil, de aprox. 15-20 dólares/ton, enquanto as taxas de plantas de WtE podem chegar a 70 dólares/ton.
- Alto teor de umidade com valor calorífico baixo de 8 MJ/Kg (3,439 Btu/lb), o que requer pré-tratamento de secagem.
- Impostos elevados sobre vendas de energia e serviços de gestão de resíduos que se aproximam de 20% da receita bruta total.
- Para instalações de pequeno e médio porte com renda bruta anual inferior a 28 milhões de dólares, os impostos totais caem para menos de 10% (esta é uma grande vantagem que deve ser explorada).
- Para plantas WtE com geração líquida inferior a 30 MW de eletricidade, as taxas de transmissão e distribuição (uso de fios) são zero se pelo menos 50% da energia vier de fonte renovável (Resolução Aneel nº 271).
- Os preços do gás natural são elevados, acima de 9 dólares/ MMBTU, tornando plantas híbridas de ciclo combinado de alta eficiência queimando RSU, e grande disponibilidade de gás natural, não atraentes. Os altos preços da energia termoelétrica estão em torno de 88 dólares/MWhe (o que favorece plantas de alta eficiência).
- O pouco conhecimento da população sobre as opções tecnológicas de recuperação energética ainda causa certa oposição social - o que pode mudar com um trabalho voltado à sensibilização da sociedade.
- O custo do crédito aliado a uma taxa de juros ainda alta tendo como referência o mercado internacional –, pode dificultar a atratividade de investidores.





ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017. 2018. Disponível em: <www.abrelpe.org. br>. Acesso em: 26 fev. 2019.

ADVANCED ENERGY STRATEGIES. Investigation into municipal solid waste gasification for power generation. 2004. Disponível em: http://www.alamedapt.com/newsroom/reports/gasification.pdf. Acesso em: 10 jul. 2018.

BECK, R. W. **Final report**: anaerobic digestion feasibility study for the bluestem solid waste agency and iowa department of natural resources. Iowa: Bluestem Solid Waste Agency, 2004.

BELGIORNO, V. Energy from gasification of solid wastes. Waste Management, v. 23, p. 1-15, 2003.

BILITEWSKI, B. et al. **Ersatzbrennstoffverbrennung in Deutschland**: aktueller stand, perspektiven. Dresden: Unweltbundesamt, 2007.

BOLZONELLA, D. et al. Dry anaerobic digestion of differently sorted organic municipal solid waste: a full-scale experience. **Water Science and Technology**, v. 53, n. 8, p. 23-32, 2006.

CEMEX. The use of climafuel as a fuel at rugby cement plant. [S.I.]: CEMEX UK, 2009. Disponível em: http://www.cemex.co.uk/su/pdf/CEMEX_Rugby_Plant_Draft_Climafuel_Trial_Report.pdf. Acesso em: 10 jul. 2018.

CONSONNI, S. Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste Part A: mass and energy balances. **Waste Management**, v. 25, p. 123-135, 2005.

DEFRA. **Energy from waste**: a guide to the debate. 2014. Disponível em: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/284612/pb14130-energy-waste-201402.pdf. Acesso em: 10 jul. 2018.

DUCHARME, C. **Technical and economic analysis of plasma-assisted waste-to-energy processes**. Tese (Mestrado em Engenharia e Ciência Aplicada)--Columbia University. Columbia, 2010.

EPEM. **Cost of waste treatment Technologies**. Disponível em: http://www.epem.gr/waste-c-control/database/html/costdata-00.htm. Acesso em: 10 jul. 2018

EUROPEAN COMMISSION. Integrated pollution prevention and control reference document on the best available techniques for waste incineration. [S.l.: s.n.], 2006.

FRITZ, Jack; GILLEN, William. Current and future prospects for modern solid waste management in the developing countries of east Asia. Disponível em: https://pdfs.semanticscholar.org/cfd8/eef0155a7ea4115d5009076fa0a47e5da2a3.pdf . Acesso em: 10 jul. 2018.

GALLERT, C.; HENNING, A.; WINTER, J. Scale-up of anaerobic digestion of the biowaste fraction from domestic wastes. **Water Research**, v. 37, n. 6, p. 1433-1441, 2003.

GENON, G.; BRIZIO, E. Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF. **Waste Management**, v. 28, n. 11, p. 2375-2385, 2008.

GIDARAKOS, E.; AIVALIOTI, M. **Thermal treatment methods for municipal solid waste**. 2007. (Notas de palestra para o curso "Management and Treatment of Municipal Waste").

GLORIUS, T. **Remondis**: SRF in a German power plant in First UK conference on solid recovered fuels, London: Resource Recovery Forum, 2008.

IEA BIOENERGY. Economic analysis of options for managing biodegradable municipal waste. **DEFRA REPORT.** 1997.

ISWA. **Circular economy**: energy & fuels. 2015. v. 5. Disponível em: https://issuu.com/ramboll/docs/iswa_circular_economy. Acesso em: 10 jul . 2018.

ISWA. **ISWA guidelines**: waste to in low and middle income countries. 2013. Disponível em: https://issuu.com/ramboll/docs/iswa_guidelines_ for_low_and_middle_>. Acesso em: 10 jul. 2018.

ISWA. International solid waste association. 2012. Disponível em: https://www.iswa.org/. Acesso em: 10 jul. 2018.

KLEIN, A. **Gasification**: an alternative process for energy recovery and disposal of municipal solid wastes. 2002. Tese (Mestrado)--Columbia University. Columbia, 2002. Disponível em: http://www.seas.columbia.edu/earth/kleinthesis.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2018.

LEME, M. M. V. Avaliação das opções tecnológicas para geração de energia a partir dos resíduos sólidos urbanos: estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Engenharia)--Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2010.

MATA-ALVAREZ, J. **Technologies and approaches for anaerobic digestion**. In: BEACON CONFERENCE ON BIOLOGICAL TREATMENT, 3. Perugia, 2010.

MURPHY, J. D.; MCKEOGH, E. Technical, economic, and environmental analysis of energy recovery from municipal solid waste. **Renewable Energy**, v. 29, p. 1043-1057, 2004.

NEIVA CORREIA, C.; VAZ, F.; TORRES, A. Anaerobic digestion of biodegradable waste: operational and stability parameters for stability control. In: Internat. SYMPOSIUM ON ANAEROBIC DIGESTION OF SOLID WASTES AND ENERGY CROPS, 5. **Anais**... Hammamet, maio, 2008.

PALEOLOGOS, E. K.; ECONOMOPOULOS, A. P.; RAMBOW, B. Waste-to-energy alternatives: an overview of technologies, regulatory framework, and economics. 2006. Disponível em: http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=13062. Acesso em: 10 jul. 2018.

PUCHELT, A. Dry stabilisation of residual waste: exemplary plant in Rennerod/ Westerwaldkreis. In: **Brandenburg Environmental Reports**, n. 6, 2000.

REITMAN, D.O. **CEWEP Energy Report II (Status 2004-2007)**. 2007. Disponívelem: http://www.cewep.eu/information/publicationsandstudies/studies/climate-protection/223.CEWEP_Energy_Efficiency_Report_Status - .html>. Acesso em: 10 jul. 2018.

RENOSAM; RAMBØLL. **Waste-to-energy in Denmark**. 2006. Disponível em: https://stateofgreen.com/files/download/275. Acesso em: 10 jul. 2018.

SAINT-JOLY, C.; DESBOIS, S; LOTTI, J. P. Determinant impact of waste collection and composition on anaerobic digestion performance: industrial results. **Water Science and Technology**, v. 41, n. 3, p. 291-297, 2000.

SALA, G.; CALCATERRA, E. Le processus Ecodeco Biocubi registered et son application pour optimiser le traitement et le devenir des dechets residuels. **Techniques sciences methods**: génie urbain-genie rural, v. 3, p. 57-62, 2004.

SECRETARIA DE ENERGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Maior termelétrica movida a biogás de resíduos sólidos urbanos do Brasil é inaugurada no Estado de São Paulo. 2016. Disponível em: http://www.energia.sp.gov.br/2016/09/maior-termeletrica-movida-biogas-de-residuos-solidos-urbanos-do-brasil-e-inaugurada-no-estado-de-sao-paulo/>. Acesso em: 26 fev. 2019.

SRI INTERNATIONAL. Data summary of municipal solid waste management alternatives. **National Renewable Energy Laboratory**. 1992. Disponível em: http://www.p2pays.org/ref/11/10516/>. Acesso em: 10 jul. 2018.

STRINGFELLOW, T. An independent engineering evaluation of waste-to-energy technologies, renewable energy world. 13 Jan. 2014, Disponível em: http://www.renewableenergyworld.com/articles/2014/01/ an-independent-engineering-evaluation-of-waste-to-energy-technologies. html>. Acesso em: 10 jul. 2018.

THE AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL. **Gasification of non-recycled plastics from municipal solid waste in the united states**. Fairfax: GBB, 2013. Disponível em: https://plastics.americanchemistry.com/Sustainability-Recycling/Energy-Recovery/Gasification-of-Non-Recycled-Plastics-from-Municipal-Solid-Waste-in-the-United-States.pdf. Acesso em: 10 jul. 2018

THEMELIS, N.; ULLOLA, P. Methane generation in landfills. **Renewable Energy**, v. 32, p. 1243-1257, 2007.

THIEL, S.; THOME-KOZMIENSKY, K. J. Co-combustion of solid recovered fuels in coal-fired power plants. **Waste Management & Research**, v. 30, n. 4, p. 392-403, 2012.

VELIS, C. Solid recovered fuels: key concept and research advances. 2012. Disponível em: http://www.d-waste.com/reports/solid-recovered-fuels-key-concepts-and-research-advances-detail.html. Acesso em: 10 jul. 2018.

VELIS, C. A. et al. Production and quality assurance of solid recovered fuels using mechanical-biological treatment (MBT) of waste: a comprehensive assessment. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 40, n. 12, p. 979-1105, 2010.

WAGLAND, S. T. et al. Comparison of coal/solid recovered fuel (SRF) with coal/refuse derived fuel (RDF) in a fluidised bed reactor. **Waste Management**, v. 31, n. 6, p. 1176-1183. 2011.

WASTE ATLAS. **Waste Atlas**. Disponível em: <www.atlas.d-waste.com>. Acesso em: 10 jul. 2018.

WTERT COLOMBIA. **WTERT Colombia**. Disponível em: <www.wtert.org>. Acesso em: 10 jul. 2018.

WU, H. et al. Trace elements in co-combustion of solid recovered fuel and coal. **Fuel Processing Technology.** v. 105, p. 212-221, 2013.

YOUNG, Gary C. **Municipal solid waste to energy conversion processes economic, technical, and renewable comparisons**. Hoboken: Wiley, 2010. Disponível em: http://energy.cleartheair.org.hk/wp-content/uploads/2012/01/Municipal-Solid-Waste-to-Energy-Conversion-Processes-Economic-Technical-And-Renewable-Comparisons-0470539674-Wiley-1.pdf. Acesso em: 10 jul. 2018.

CNI

Paulo Afonso Ferreira
Presidente em exercício

Diretoria de Relações Institucionais - DRI

*Mônica Messenberg Guimarães*Diretora de Relações Institucionais

Gerência Executiva de Meio Ambiente e Sustentabilidade - GEMAS

Davi Bomtempo

Gerente-Executivo de Meio Ambiente e Sustentabilidade

Wanderley Coelho Baptista Equipe Técnica

Superintendência de Relações Públicas

Ana Maria Curado Matta Superintendente de Relações Públicas

Andre Augusto de Oliveira Dias Produção Editorial

Diretoria de Serviços Corporativos - DSC

Fernando Augusto Trivellato
Diretor de Serviços Corporativos

Área de Administração, Documentação e Informação – ADINF

Maurício Vasconcelos de Carvalho Gerente Executivo de Administração, Documentação e Informação

Alberto Nemoto Yamaguti Normalização

D-Waste Hellas Consultoria

Gabriela GPO Sartini Tradução

Danúzia Queiroz e Fabiano Gama Revisão gramatical

Editorar Multimídia Projeto Gráfico e Diagramação









RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS UM GUIA PARA TOMADORES DE DECISÃO

portaldaindustria.com.br

