

# VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS PARA UMA ECONOMIA CIRCULAR: O ESTADO DA ARTE EM PORTUGAL

**JOSÉ MANUEL NOVO FONSECA**

Outubro de 2020

# VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS PARA UMA ECONOMIA CIRCULAR: O ESTADO DA ARTE EM PORTUGAL

JOSÉ MANUEL NOVO FONSECA



Departamento de Engenharia Eletrotécnica  
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2020

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de  
DSEE - Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de  
Energia

Candidato: José Manuel Novo Fonseca, Nº 1120512, 1120512@isep.ipp.pt

Orientação científica: Carlos Jorge Pereira Freitas, cpf@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

**2020**



## *Agradecimentos*

Gostaria de agradecer aos meus pais por me terem proporcionado a oportunidade de estudar e à minha restante família e amigos pelo apoio e motivação constante ao longo destes anos.

Um agradecimento também ao Prof. Doutor Carlos Freitas pela orientação e disponibilidade prestada.



## *Resumo*

Em Portugal no ano de 2018 foram produzidas 5,213 milhões de toneladas de resíduos urbanos. O encaminhamento dado aos resíduos é já há muitos anos uma preocupação em todo o mundo devido aos elevados níveis de poluição ambiental. Neste contexto, Portugal luta para alcançar a desejada sustentabilidade ambiental, sendo um dos fatores fundamentais para atingir este objetivo o encaminhamento dado aos resíduos urbanos. Uma opção para este encaminhamento é a valorização energética através das tecnologias *Waste-to-Energy* que garantem que a partir dos resíduos urbanos seja possível gerar energia e desviar os resíduos da deposição em aterros sanitários. Nesta Dissertação são apresentadas as diferentes tecnologias *Waste-to-Energy*, sendo abordadas as dimensões, económica, ambiental e operacional, recorrendo-se à apresentação de casos de sucesso a nível mundial e sugerindo-se orientações estratégicas para o decisor político. O caso Português é abordado de forma extensa com enfoque no sistema de gestão de resíduos e nos diferentes processos de valorização. O sistema de gestão de resíduos deve respeitar a hierarquia de resíduos, estabelecida no quadro de boas práticas ambientais, devendo ser dada a prioridade à prevenção, à reutilização e à reciclagem antes de encaminhar os resíduos para valorização. No caso estudado, Portugal ainda apresenta uma percentagem reduzida de valorização energética de cerca de 20% para o ano de 2018. A componente de encaminhamento de resíduos para aterro sanitário, cerca de 32%, aproxima Portugal de uma economia linear, muito distante ainda do conceito de economia circular. Este conceito é baseado na estratégia de desenvolvimento sustentável em que o desenvolvimento económico é conseguido através de alta eficiência e baixas emissões, onde todas as matérias-primas e energia são mantidas e reutilizadas num ciclo fechado. O papel do *Waste-to-Energy* é crucial numa economia circular, não apenas por representar a última oportunidade de extrair valor dos resíduos, mas também por construir uma fonte de energia alternativa.

### ***Palavras-chave***

*Waste-to-Energy*, Valorização Energética, Resíduos Urbanos, Hierarquia de Resíduos, Economia Circular.



## *Abstract*

In Portugal in the year 2018, 5.213 million tons of municipal waste were produced. Waste disposal has been a concern worldwide for many years due to the high levels of environmental pollution. In this context, Portugal struggles to achieve the desired environmental sustainability, one of the fundamental factors to achieve this objective is the routing given to urban waste. An option for this route is the energy recovery through Waste-to-Energy technologies that ensure that from urban waste it is possible to generate energy and divert waste from landfill. In this Dissertation, the different Waste-to-Energy technologies are presented, addressing the economic, environmental and operational dimensions, resorting to the presentation of successful cases worldwide and suggesting strategic guidelines for the political decision-maker. The Portuguese case is approached extensively with a focus on the waste management system and the different recovery processes. The waste management system must respect the waste hierarchy, established in the framework of good environmental practices, and priority must be given to prevention, reuse and recycling before sending waste for recovery. In the case studied, Portugal still presents a reduced percentage of energy recovery of about 20% for the year 2018. The component of forwarding waste to landfill, about 32%, brings Portugal closer to a linear economy, still far from circular economy concept. This concept is based on the sustainable development strategy in which economic development is achieved through high efficiency and low emissions, where all raw materials and energy are maintained and reused in a closed cycle. The role of Waste-to-Energy is crucial in a circular economy, not only because it represents the last opportunity to extract value from waste, but also because it builds an alternative energy source.

### ***Keywords***

Waste-to-Energy, Energy Recovery, Urban Waste, Waste Hierarchy, Circular Economy.



# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>I</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>III</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>V</b>
<b>Índice</b> .....	<b>VII</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>X</b>
<b>Índice de Tabelas</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Acrónimos</b> .....	<b>XVI</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 Importância do Tema .....	1
1.2 Objetivos da Dissertação.....	2
1.3 Estrutura da Dissertação .....	2
<b>2. Gestão de Resíduos Urbanos</b> .....	<b>4</b>
2.1 Enquadramento Teórico.....	4
2.2 Em que consiste o <i>Waste-to-Energy</i> (WTE) .....	6
2.3 Conceitos e Princípios da Gestão de Resíduos.....	7
2.3.1 Enquadramento Estratégico e Legislativo .....	10
2.3.2 Padrões de Consumo.....	12
2.3.3 Gestão de Resíduos Urbanos .....	14
2.3.4 Gestão de Resíduos Não Urbanos .....	16
2.4 Objetivo Lixo Zero .....	17
2.5 Economia Circular .....	18
2.5.1 Modelo Linear vs Modelo Circular .....	21
2.5.2 Benefícios e Desafios de uma Economia Circular .....	22
2.6 Desperdício de Energia e <i>Waste-to-Energy</i> (WTE).....	24
<b>3. Opções Tecnológicas <i>Waste-to-Energy</i> (WTE)</b> .....	<b>26</b>
3.1 Incineração de Resíduos Sólidos .....	27
3.1.1 Descrição da Tecnologia.....	28
3.1.2 Frações Adequadas de Resíduos .....	29
3.1.3 Aspetos Operacionais.....	30
3.1.4 Aspetos Ambientais.....	31
3.1.5 Aspetos Económicos.....	31
3.1.6 Conclusões.....	32
3.2 Coprocessamento.....	33
3.2.1 Descrição da Tecnologia.....	33

3.2.2 Resíduos Adequados .....	35
3.2.3 Aspetos Operacionais.....	36
3.2.4 Aspetos Ambientais.....	36
3.2.5 Aspetos Económicos.....	37
3.2.6 Conclusões.....	38
3.3 Digestão Anaeróbica .....	39
3.3.1 Descrição de Tecnologia.....	40
3.3.2 Resíduos Adequados .....	41
3.3.3 Aspetos Operacionais.....	42
3.3.4 Aspetos Ambientais.....	43
3.3.6 Aspetos Económicos.....	43
3.3.7 Conclusões.....	44
3.4 Captação de Gás de Aterro .....	45
3.4.1 Descrição da Tecnologia.....	46
3.4.2 Resíduos Adequados .....	46
3.4.3 Aspetos Operacionais.....	47
3.4.4 Aspetos Ambientais.....	47
3.4.5 Aspetos Económicos.....	47
3.4.6 Conclusões.....	48
3.5 Tecnologias Alternativas: Pirólise e Gaseificação .....	48
3.5.1 Descrição da Tecnologia.....	49
3.5.2 Resíduos Adequados .....	50
3.5.3 Aspetos Operacionais.....	51
3.5.4 Aspetos Ambientais.....	51
3.5.5 Aspetos Económicos.....	51
3.5.6 Conclusões.....	52
3.6 Matriz de Apoio à Decisão.....	52
3.6.1 Objetivo .....	52
3.6.2 Matriz de Tomada de Decisão.....	55
3.7 Recomendações .....	58
<b>4. Waste-to-Energy (WTE) ao Nível Europeu e Mundial.....</b>	<b>61</b>
4.1 Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos.....	64
4.1.1 Contexto na União Europeia .....	64
4.1.2 Contexto na China .....	66
4.1.3 Contexto na Etiópia.....	67
4.2 Coprocessamento.....	67

4.2.1 Contexto no Brasil .....	68
4.3 Digestão Anaeróbia .....	70
4.3.1 Contexto nos Países em Desenvolvimento .....	71
4.3.2 Contexto nos Países Desenvolvidos .....	72
4.4 Captação de Gás de Aterro .....	72
4.4.1 Contexto nos EUA.....	73
4.4.2 Contexto na Austrália.....	73
4.5 Tecnologias Alternativas: Pirólise e Gaseificação .....	74
4.5.1 Contexto Mundial.....	74
<b>5. Waste-to-Energy (WTE) em Portugal .....</b>	<b>76</b>
5.1 Gestão de Resíduos em Portugal .....	77
5.1.1 Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos (SGRU) e Infraestruturas de Gestão de Resíduos Urbanos.....	79
5.2 Unidades de Grande Escala (> 1100 t/dia).....	82
5.2.1 Valorsul.....	82
5.2.2 Lipor.....	86
5.3 Unidades de Pequena Escala (< 1100 t/dia).....	91
5.3.1 Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos da Meia Serra .....	91
5.4 Materiais e Resíduos Resultantes do Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos.....	94
5.4.1 Recicláveis .....	95
5.4.2 Produção de Composto .....	96
5.4.3 Produção de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) e Material para CDR .....	96
<b>6. Conclusões .....</b>	<b>98</b>
6.1 Pistas para Investigação Futura.....	99
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>100</b>
<b>Anexo A: Descrição dos Parâmetros da Matriz de Decisão .....</b>	<b>106</b>
<b>Anexo B: Níveis de Produção e Encaminhamento dos Resíduos Sólidos Urbanos .....</b>	<b>113</b>
<b>Anexo C: Tabela Comparativa dos Sistemas de Gestão de Resíduos Urbanos Portugueses .</b>	<b>116</b>

## Índice de Figuras

Figura 1 - Nível de cumprimento das metas definidas no PERSU I para 2005 [3]	5
Figura 2 - Hierarquia de resíduos e os processos de desperdício de energia [5]	7
Figura 3 - Organização da gestão de resíduos [3]	8
Figura 4 - Proposta de estrutura para o PNGR [3]	9
Figura 5 - Hierarquia de resíduos [3]	10
Figura 6 - Balanço de materiais da economia Portuguesa (ano base: 2011) [8]	12
Figura 7 - Componente doméstica e importada do consumo de materiais em Portugal entre 1980-2011 [8]	13
Figura 8 - Produção e tratamento de resíduos em Portugal em 2012 [8]	14
Figura 9 - Produção de Resíduos Urbanos e Produto Interno Bruto (PIB) a preços de 2006, em Portugal [8]	15
Figura 10 - Diagrama de processos da Economia Circular [12]	20
Figura 11 - Vista geral do fluxo de material de resíduos sólidos urbanos e suas diferentes opções de utilização e de tratamento [29]	27
Figura 12 - Incineradora Municipal de Resíduos Sólidos – Ilha da Madeira [30]	28
Figura 13 - Componentes de uma central de incineração de resíduos sólidos com limpeza de gases de combustão [31]	29
Figura 14 - Fábrica de cimento com funcionalidade de coprocessamento [37]	33
Figura 15 - Fluxo de processo genérico do TMB (pré-processamento) para a produção de CDR [29]	34
Figura 16 - Componentes de um forno de cimento [40]	35
Figura 17 - CDR processado (esquerda), correia transportadora na instalação de produção de CDR (centro), dentro do forno de cimento (direita) [29]	36
Figura 18 - Instalação de digestão anaeróbica para a produção de biogás [46].	40
Figura 19 - Componentes e produtos finais da Digestão Anaeróbia [29]	41
Figura 20 - Aterro Sanitário com captação de Gás [52]	45
Figura 21 - Componentes do sistema de captura de gás de aterro com produção de eletricidade [29]	46
Figura 22 - Componentes de uma instalação de pirólise para tratamento específico de resíduos sólidos [56]	50
Figura 23 - Relação de produção de resíduos per capita (kg/dia) à renda nacional bruta (RNB) em 2014 nos Países selecionados [59]	63

Figura 24 - Capacidade Instalada e Produção de Eletricidade através Resíduos [64]	65
Figura 25 - Resíduos Coprocessados no Brasil [73]	69
Figura 26 - Capacidade de DA vs Resíduos de Alimentos "Realmente Disponíveis" no Reino Unido [59]	72
Figura 27 - Diferenciação das atividades dos Serviços em Baixa e Alta	79
Figura 28 - Mapa da distribuição dos SGRU em Portugal Continental [97]	80



## *Índice de Tabelas*

Tabela 1 - Principais documentos de natureza estratégica analisados para a definição de uma política de resíduos [3]	11
Tabela 2 - Planos de gestão de resíduos [3]	11
Tabela 3 - Quantitativos de Resíduos Urbanos por Operação de tratamento em Portugal [8]	16
Tabela 4 - Quantitativos de Resíduos Não Urbanos em Portugal, por operação de tratamento [8]	17
Tabela 5 - Influências da separação prévia de materiais recicláveis na incineração [29]	30
Tabela 6 - Exemplo de estimativas de custos individuais da IRS com base nos custos de países industrializados e em desenvolvimento [29]	32
Tabela 7 - Exemplo de estimativas de custo e receitas de uma central de coprocessamento. [29]	38
Tabela 8 - Exemplos indicativos de produção de metano e energia de matérias-primas orgânicas selecionadas através da DA [29]	42
Tabela 9 - Exemplos de elementos de custos individuais comparativos da digestão anaeróbica derivados de [50],[51]	44
Tabela 10 - Exemplo de elementos de custos individuais comparativos de um projeto de captura de LFG com produção de energia derivada do MDL em projetos no Brasil [54] e China [55]	48
Tabela 11 - Exemplo de elementos de custos individuais comparativos de uma instalação de pirólise na Alemanha [57]	51
Tabela 12 - Dados de Produção de Resíduos em 2012, por região [62]	62
Tabela 13 - Quantitativos de RU produzidos ( $10^3$ t) [97]	77
Tabela 14 - Tecnologias de Tratamentos Típicos Aplicados a uma massa de RU	78
Tabela 15 - Infraestruturas de gestão de RU [97]	81
Tabela 16 - Elementos Técnicos e de Atividade [100]	82
Tabela 17 - Características Técnicas da Central de Incineração da Valorsul [99]	83
Tabela 18 - Características Técnicas da Central de Digestão Anaeróbia da Valorsul [99]	85
Tabela 19 - Encaminhamento de Resíduos por Destino Final (t) [102]	87
Tabela 20 - Características Técnicas da Central de Incineração da Lipor	88
Tabela 21 - Características Técnicas da Central de Incineração da ETRS [105]	93
Tabela 22 - Quantitativos de resíduos recicláveis recuperados (t) em Portugal Continental [97]	95
Tabela 23 - Quantitativos de Composto produzido (t) [97]	96

Tabela 24 - Quantitativos de material para CDR produzido (t) [97]	96
Tabela 25 - Quantitativos de CDR produzido (t) [97]	97



## *Acrónimos*

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

ARM – Água e Resíduos da Madeira

CDR – Combustível Derivado de Resíduos

CE – Comissão Europeia

CEE – Comunidade Económica Europeia

CHP – *Combined Heat and Power*

DA – Digestão Anaeróbia

EC – Economia Circular

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

GEE – Gases de Efeito de Estufa

IMRS – Incineração Municipal de Resíduos Sólidos

INE – Instituto Nacional de Estatística

IRS – Incineração de Resíduos Sólidos

LCA - *Life cycle assessment*

LFG - *Landfill gas*

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MSWM – *Municipal Solid Waste Management*

MT – Milhões de Tonelada

PCI – Poder Calorífico Inferior

PERSU – Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos

PIB – Produto Interno Bruto

RGGR – Regime Geral de Gestão de Resíduos

RI – Resíduos Industriais

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

RU – Resíduos Urbanos

RUB – Resíduos Urbanos Biodegradáveis

SGRU – Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos

SLF - *Sanitary Landfill*

SWOT - *Strength, Weaknesses, Opportunities, Threats*

t – Tonelada

TA – Tecnologias Alternativas

TMB – Tratamento Mecânico e Biológico

TTA – Tratamento Térmicos Avançados

UE – União Europeia

WTE – *Waste-to-Energy*

WWF – *World Wide Fund for Nature*

# 1. Introdução

## 1.1 Importância do Tema

Os resíduos são uma problemática que acompanha a humanidade desde sempre, tendo, contudo, conhecido um incremento exponencial com a industrialização e a concentração das populações nas grandes cidades.

O lançamento dos resíduos sem qualquer controlo no ambiente tem sido uma fonte de libertação de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, contaminação do solo e das águas subterrâneas, assim como, local propício para proliferação de diversas patologias, visto que a natureza não tem capacidade para os processar à mesma velocidade que são produzidos e depositados no meio ambiente.

Portanto, a não produção, a redução e o reaproveitamento dos resíduos, assim como o seu destino final adequado, tem de se tornar uma das preocupações do poder público e da sociedade em todos os seus setores.

Por outro lado, a energia é um dos pilares do nosso modo de vida contemporâneo, pois é através do uso das mais diversas fontes de energia, com predominância atual para os combustíveis fósseis, que se viabilizam os meios de comunicação, o transporte de bens e pessoas, a prestação dos mais variados serviços e os processos de produção agrícola e industriais.

Neste contexto, o uso da energia pela humanidade encontra-se em franco crescimento, levando a uma utilização de recursos naturais crescente para atendê-la.

O uso dos combustíveis fósseis tem causado o incremento progressivo de carbono na atmosfera, potencializando o efeito estufa, que tem sido apontado como causador de várias alterações climáticas nos últimos anos.

Assim, na procura de segurança na produção e fornecimento de energia, diversos países têm investido na diversificação da matriz energética com a finalidade de incluir novas fontes de energia, com destaque para as fontes renováveis, como a eólica, solar e a biomassa, tendo como preocupação de fundo a redução das emissões de GEE na atmosfera.

Neste contexto, observa-se que entre a preocupação com a gestão dos resíduos, a produção de energia de forma diversificada e constante e a redução nas emissões de GEE, pode-se inferir a existência de conexões que atendam os fins específicos de cada uma destas áreas com sustentabilidade, ou seja, observando questões de ordem social, ambiental e económica.

A utilização dos resíduos como fonte de energia, processo geralmente designado de “*Waste-to-Energy*”, é já uma realidade em diversos países, com recurso aos mais diversos processos tecnológicos.

Assim, a valorização económica do resíduo como uma fonte de energia, a par da diversificação da matriz energética, traz ganhos sociais, ao criar um mercado de trabalho e toda uma cadeia produtiva direta e indireta, assim como, ganhos ambientais, ao reduzir a quantidade de produtos rejeitados pelos aterros sanitários, à redução da emissão de GEE na atmosfera e à reutilização de recursos em substituição do consumo de recursos naturais.

## **1.2 Objetivos da Dissertação**

O objetivo desta Dissertação passa por efetuar um estudo sobre o estado da arte em Portugal em relação às tecnologias *Waste-to-Energy* de forma a que seja possível identificar eventuais barreiras ou recomendações para a promoção destas tecnologias, inseridas num modelo de economia circular e de desenvolvimento sustentável. Desta forma, é importante fazer um enquadramento sobre o que é feito a nível nacional em relação à gestão de resíduos, à legislação aplicada e à temática do seu reaproveitamento e das vantagens ambientais e económicas que daí advém. Perceber quais são as tecnologias já implementadas em Portugal a este nível e fazer uma contextualização em relação ao que é praticado no resto do mundo, fazendo referência a casos de sucesso.

## **1.3 Estrutura da Dissertação**

A Dissertação está estruturada em seis capítulos: no primeiro é apresentado o tema, a sua relevância e os objetivos do trabalho; no segundo é feita uma contextualização onde é explicado onde se insere o *Waste-to-Energy* nas temáticas da gestão de resíduos, economia circular, objetivo lixo zero e ao nível do enquadramento legal.

No terceiro capítulo é efetuado uma revisão da literatura onde são apresentadas as várias tecnologias *Waste-to-Energy* existentes, inseridas em diferentes casos de estudo.

No quarto capítulo são abordados os exemplos de *Waste-to-Energy* existentes no mundo, fazendo referência a casos de sucesso e a dificuldades de implementação encontradas em diversos Países.

O capítulo cinco é preenchido pela análise feita à situação em Portugal, onde é apresentado o modelo de gestão de resíduos Português e a valorização de resíduos efetuada nos pequenos e grandes centros urbanos. Recorrendo a três casos concretos, são apresentadas as tecnologias *Waste-to-Energy* mais representativas do caso Português e as oportunidades e dificuldades encontradas na sua implementação.

No capítulo seis são apresentadas as conclusões da Dissertação, elencadas recomendações para a introdução de melhorias pelo decisor político e operadores e identificadas pistas para investigação futura.

# 2. Gestão de Resíduos Urbanos

## 2.1 Enquadramento Teórico

No início dos anos 90, embora já existissem alguns sistemas de tratamento de resíduos, a maioria do território era desprovido de sistemas de gestão de resíduos de qualidade, inferior a 29% [1]. No ano de 1995 o tratamento de resíduos em Portugal assentava maioritariamente em lixeiras a céu aberto, sendo que se verificava a existência apenas de algumas centrais de compostagem e aterros sanitários que representavam, respetivamente, 9 e 15% das opções de destino final [2].

Uma grande parte dos resíduos produzidos (60%), quer urbanos, quer resíduos de outra natureza (industriais, agrícolas, etc) eram à data depositados em lixeiras municipais isentas de qualquer tipo de valorização. Os resíduos, depois de depositados, permaneciam em estado de degradação a céu aberto, contaminando o solo devido à presença das águas lixiviantes e a atmosfera envolvente devido à emissão de gases tóxicos. Representavam, desta forma, sistemas de eliminação precária sem qualquer tipo de controlo de poluição [2].

Com a elaboração do Plano Estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU[3]), determinou-se a partir de 1996 o “encerramento e recuperação das lixeiras existentes”. Desta forma visava-se a substituição das lixeiras a céu aberto por sistemas de aterro

sanitário, que embora continuassem a representar sistemas de eliminação de resíduos, permitiam melhorar o nível de controlo de saúde pública (PERSU II).

No ano de 2000 deram entrada em funcionamento pleno os primeiros sistemas de tratamento térmico de resíduos por incineração, na área metropolitana de Lisboa - Norte (VALORSUL) e área metropolitana do Porto (LIPOR). Embora estes sistemas se distanciem dos sistemas de tratamento térmico atualmente existentes, representaram à data o primeiro passo para a introdução dos sistemas de tratamento térmico de resíduos na gestão dos resíduos por parte dos municípios.

De facto, à data a população dos municípios de Lisboa, Loures, Amadora e Vila Franca de Xira (1,4 milhões de habitantes) estava concentrada numa área equivalente a 0,5% da área do território nacional, no entanto, em conjunto era responsável por produzir 20% do total de resíduos urbanos, ou seja, cerca de 700.000 t/ano. Assim, face à necessidade de resolver a grande quantidade de resíduos gerados, concluiu-se que a incineração era a única solução de tratamento que evitava a disponibilização de grandes áreas (entre 190 e 340 hectares até 2020) o que nos referidos municípios se tornava uma matéria difícil de resolver (CE, 1999)[4]. Uma vez adotada essa solução, o PERSU I previa que as unidades de valorização energética da VALORSUL e LIPOR seriam, em conjunto, responsáveis por tratar 26% da produção de resíduos urbanos no ano 2000 (PERSU II).

Da mesma forma, previa-se a erradicação integral das lixeiras a céu aberto no país; meta que apenas foi atingida com sucesso no ano de 2002 (PERSU II).

Na figura 1 sistematiza-se o grau de cumprimento das metas propostas no PERSU I para o horizonte de 2005, verificando-se o não cumprimento das metas no que diz respeito, sobretudo às metas da reciclagem, da compostagem e da construção de novos aterros sanitários.

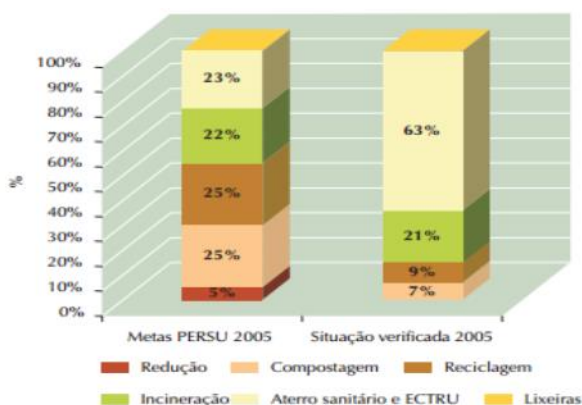


Figura 1

**Figura 1 - Nível de cumprimento das metas definidas no PERSU I para 2005 [3]**

Apesar dos desvios verificados, o PERSU revelou-se o primeiro marco relevante para reformular o quadro de políticas de resíduos em Portugal. Em 2007 o PERSU II, que vem substituir a primeira versão do plano, visava já um reforçar o “cumprimento de objetivos

estratégicos relativos à prevenção, reciclagem e valorização do resíduo enquanto recurso” (PERSU 2020). Nomeadamente, um dos principais objetivos do plano era relativo ao desvio de resíduos biodegradáveis de aterro, principalmente por via da valorização orgânica. Desta forma, o PERSU II veio articular as medidas e metas que vinham a ser impostas por parte da União Europeia nesta matéria, dando especial ênfase ao conceito de “valorização”.

## **2.2 Em que consiste o *Waste-to-Energy* (WTE)**

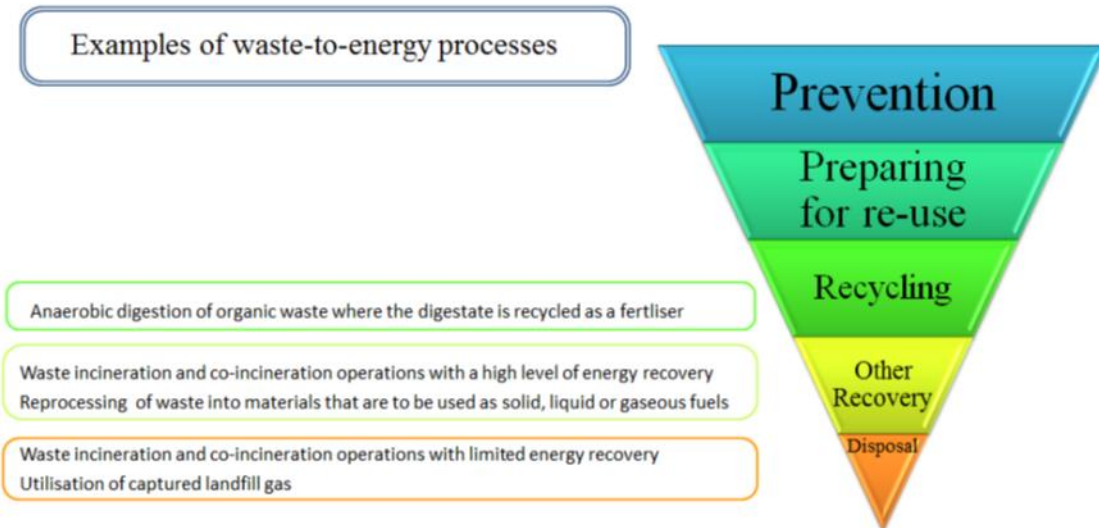
*Waste-to-Energy* é um termo amplo que abrange muito mais do que a incineração de resíduos. Abrange vários processos de tratamento de resíduos que têm como subproduto a produção de energia, seja sob a forma de produção de eletricidade ou calor, seja sob a forma de produção de Combustível Derivados de Resíduos (CDR), com impactos ambientais e potencial na economia circular distintos.

A hierarquia de resíduos é a pedra angular da política e legislação da União Europeia (EU) em matéria de resíduos e uma chave para a transição para a economia circular. O seu objetivo principal é estabelecer uma ordem de prioridades que minimize os efeitos ambientais adversos e otimize a eficiência dos recursos na prevenção e na gestão de resíduos.

Esta hierarquização abrange os seguintes processos principais de conversão de resíduos em energia:

- Coincinação de resíduos em instalações de combustão (por exemplo, centrais elétricas) e na produção de cimento e cal;
- Incineração de resíduos em instalações dedicadas;
- Digestão anaeróbica de resíduos biodegradáveis;
- Produção de combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos derivados de resíduos;
- Outros processos, incluindo a incineração indireta após um passo de pirólise ou gaseificação.

Esses processos têm diferentes impactos ambientais e são classificados de forma diferente na hierarquia de resíduos. De facto, os processos de desperdício de energia abrangem operações de tratamento de resíduos muito diferentes, que vão desde "deposição" e "recuperação" até "reciclagem". Por exemplo, processos como a digestão anaeróbica que resultam na produção de biogás e de um produto digerido são considerados pela legislação da UE sobre resíduos como uma operação de reciclagem. Por outro lado, a incineração de resíduos com recuperação limitada de energia é considerada como eliminação. A Figura 2 abaixo ilustra o posicionamento de diferentes processos WTE ao longo da hierarquia de resíduos da UE.



**Figura 2 - Hierarquia de resíduos e os processos de desperdício de energia [5]**

É importante ressaltar que a hierarquia de resíduos também reflete amplamente a opção preferida do meio ambiente a partir de uma perspectiva climática: deposição em aterros ou através de incineração com pouca ou nenhuma recuperação de energia, é geralmente a opção menos favorável para reduzir os gases de efeito estufa (GEE). Por outro lado, a prevenção de resíduos, reutilização e reciclagem têm o maior potencial para reduzir as emissões de GEE. Também vale a pena lembrar que os Estados-Membros têm alguma flexibilidade na aplicação da hierarquia, devendo, contudo, privilegiar as opções de gestão de resíduos que produzam o melhor resultado ambiental. Para alguns fluxos de resíduos específicos, conseguir o melhor resultado ambiental pode implicar afastar a ordem da hierarquia, quer por razões de exequibilidade técnica e viabilidade económica quer por proteção ambiental.

Para apoiar a transição para uma economia mais circular, o financiamento público da gestão de resíduos, quer a nível nacional quer a nível da UE, deve ser coerente com o objetivo de caminhar na direção ascendente na implementação da hierarquia de resíduos da UE.

### **2.3 Conceitos e Princípios da Gestão de Resíduos**

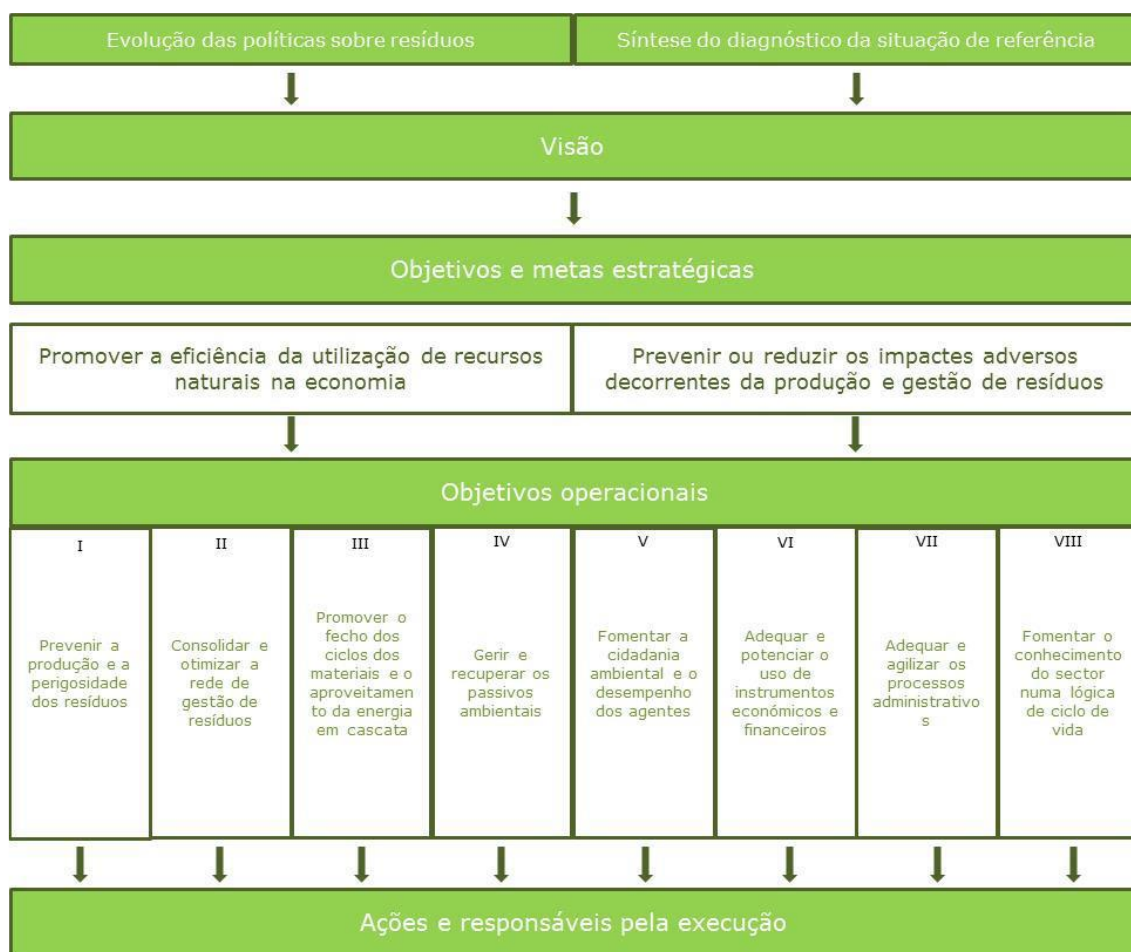
Resíduos são “quaisquer substâncias ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer”. (Decreto-Lei n.º178/2006, de 5 de setembro, alterado e republicado pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho)



**Figura 3 - Organização da gestão de resíduos [3]**

O Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de setembro, alterado pelos Decretos-Leis n.º 73/2011, de 17 de junho, n.º 67/2014, de 7 de maio e n.º 165/2014, de 5 de novembro, estabelece o regime geral aplicável à prevenção, produção e gestão de resíduos. Este diploma transpõe a Diretiva n.º 2008/98/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de novembro de 2008, relativa aos resíduos, que veio estabelecer a obrigação de os Estados-Membros elaborarem planos de gestão de resíduos, que isoladamente ou articulados entre si, devem abranger todo o território geográfico do Estado-Membro em causa.

Assim, prosseguindo este objetivo, o Plano Nacional de Gestão de Resíduos (PNGR 2014-2020) constitui-se como um instrumento de planeamento macro da política de resíduos estabelecendo as orientações estratégicas, de âmbito nacional, de prevenção e gestão de resíduos, no sentido da concretização dos princípios enunciados na legislação comunitária e nacional, numa ótica de proteção do ambiente e desenvolvimento do País. Este Plano vem preconizar uma mudança do paradigma atual em matéria de resíduos, consubstanciando a prevenção e a gestão de resíduos como uma forma de dar continuidade ao ciclo de vida dos materiais, constituindo um passo essencial para devolver materiais e energia úteis à economia.



**Figura 4 - Proposta de estrutura para o PNCR [3]**

Como pode ser observado na Figura 4, o PNCR 2014-2020 tem a visão de promover a prevenção e gestão de resíduos integradas no ciclo de vida dos produtos, centradas numa economia tendencialmente circular e que garantam uma maior eficiência na utilização dos recursos naturais, e assenta em dois objetivos estratégicos:

- Promover a eficiência da utilização de recursos naturais na economia;
- Prevenir ou reduzir os impactes adversos decorrentes da produção e gestão de resíduos:

A Gestão de Resíduos compreende a recolha, o transporte, a valorização e eliminação de resíduos, incluindo a supervisão dessas operações, a manutenção dos locais de eliminação no pós-encerramento, bem como as medidas adotadas na qualidade de comerciante ou corretor.

A gestão de resíduos é realizada de acordo com os princípios gerais estabelecidos no Regime Geral de Gestão de Resíduos (RGGR) e em respeito dos critérios qualitativos e quantitativos fixados nos instrumentos regulamentares e de planeamento (Princípio da regulação e gestão de resíduos – artigo 9.º do RGGR).

O Princípio da hierarquia dos resíduos (artigo 7.º do RGGR) estabelece que a política e a legislação em matéria de resíduos devem respeitar a ordem de prioridades apresentada

na Figura 5, no que se refere às opções de prevenção e gestão de resíduos. Refere ainda que a ordem de prioridades estabelecida pela hierarquia dos resíduos pode não ser observada, no caso dos fluxos específicos de resíduos, desde que as opções adotadas se justifiquem pela aplicação do conceito de ciclo de vida aos impactes globais da produção e gestão dos resíduos em causa.



**Figura 5 - Hierarquia de resíduos [3]**

### **2.3.1 Enquadramento Estratégico e Legislativo**

O desenvolvimento de uma estratégia para os resíduos em Portugal deve ter em conta os modelos organizativos existentes e os resultados alcançados ao nível da sua produção, recolha e tratamento, mas também os documentos legais e estratégicos (nacionais e comunitários). Na Tabela 1 apresentam-se os principais documentos de natureza estratégica que constituíram o referencial para a definição da atual política de resíduos.

**Tabela 1 - Principais documentos de natureza estratégica analisados para a definição de uma política de resíduos [3]**

Documentos de Natureza Estratégica
7º Programa Comunitário de Ação em Matéria de Ambiente (Decisão n.º 1386/2013/eu, do Parlamento Europeu e do conselho, de 20 de novembro de 2013)
Estratégia Nacional para o Desenvolvimento Sustentável 2015 (Resolução de Conselho de Ministros n.º 109/2007, de 20 de agosto)
Nova Estratégia da UE para o Desenvolvimento Sustentável (10917/06/CE, de 26 de junho)
PIP – Política integrada de produto (COM (2001)68)
Estratégia Temática sobre a Utilização Sustentável dos Recursos Naturais (CE, 2005a).
Estratégia Temática em matéria de prevenção e reciclagem de resíduos (Comissão Europeia, 2005b)
Diretiva Quadro “Resíduos” (DQR) (Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de novembro de 2008)
Convenção sobre o controlo dos movimentos transfronteiriços de resíduos perigosos e sua eliminação, de 22 de março de 1989 (Convenção de Basileia)
Decisão sobre o controlo dos movimentos transfronteiriços de resíduos destinados a operações de valorização (Decisão do Conselho da OCDE C (2001)107/final)

O quadro de legislação comunitária constitui a matriz de referência da política de resíduos a nível europeu, sendo complementado pelas ações desenvolvidas pelos Estados-Membros e pelas autoridades regionais e locais. A legislação europeia é transposta pelos Estados-Membros, os quais podem estabelecer normas e procedimentos mais restritivos, se assim o entenderem. Na Tabela 2 estão ainda consagrados os planos estratégicos sectoriais para resíduos.

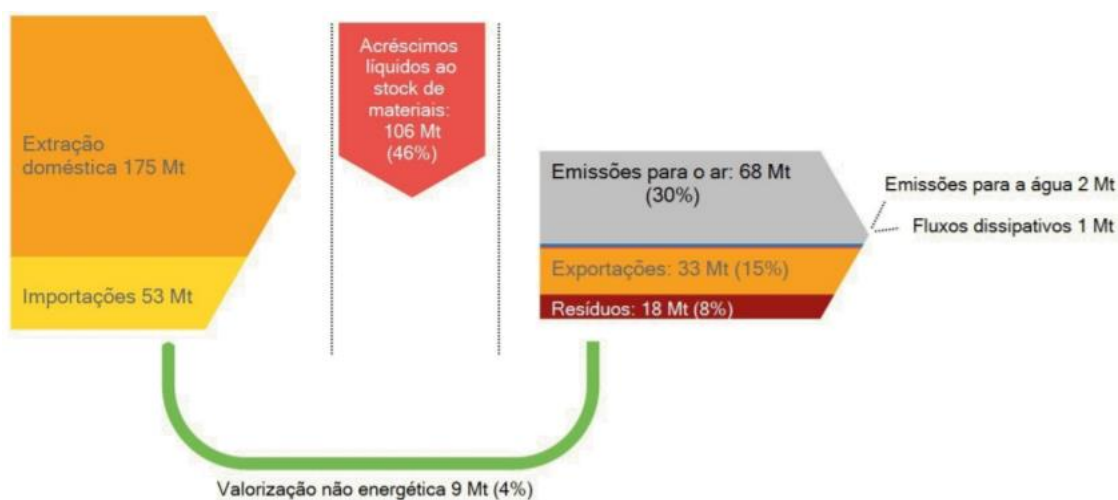
**Tabela 2 - Planos de gestão de resíduos [3]**

Resíduos sectoriais	Planos de gestão
Resíduos Urbanos	Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos Programa de Prevenção de Resíduos Urbanos (em revisão)
Resíduos Industriais	Plano Estratégico de Gestão de Resíduos Industriais Plano Nacional de Prevenção de Resíduos Industriais
Resíduos Hospitalares	Plano Estratégico de Resíduos Hospitalares

### 2.3.2 Padrões de Consumo

Os resíduos são originados pelas inúmeras atividades de produção e consumo que têm lugar na nossa sociedade. Estas atividades são alimentadas por recursos naturais (matérias-primas e energia) que entram no ciclo económico, desempenhando uma determinada função ou serviço. Os materiais daqui resultantes retornam ao ambiente, mas já sob a forma de resíduos ou emissões que constituem desperdícios das referidas atividades.

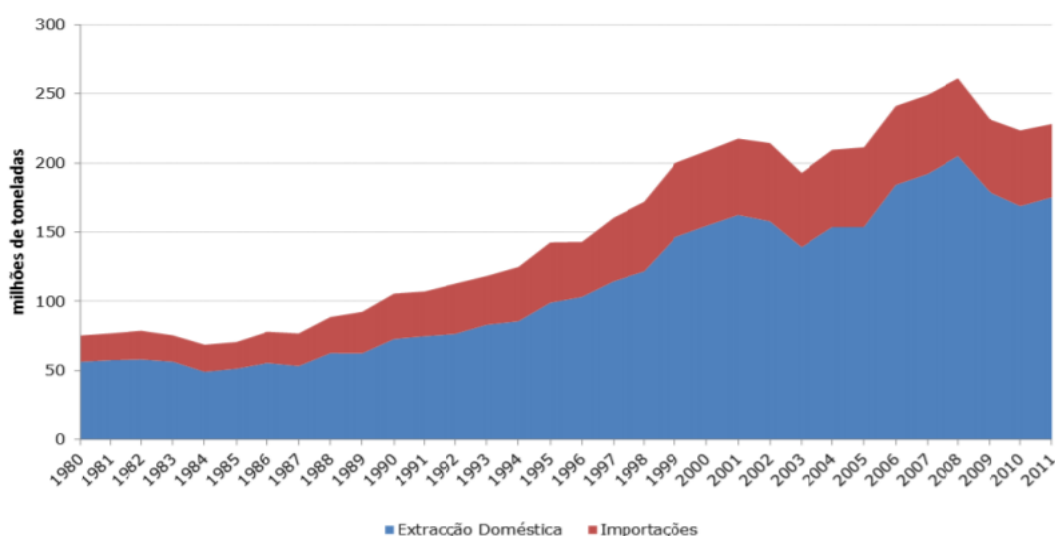
Existe assim uma relação estreita entre o consumo de matérias-primas e a produção de resíduos que depende de vários fatores, incluindo a estrutura da economia, os padrões de produção e consumo e os padrões de reutilização e reciclagem. Esta relação é desfasada no tempo devido ao período de vida útil dos produtos. Esta complexa interação é descrita pelo “Metabolismo da Economia”, que caracteriza os fluxos de materiais e energia inerentes às atividades económicas. A promoção da economia circular através do fecho dos ciclos dos materiais, garantindo uma gestão de resíduos mais sustentável, direcionando as perdas (materiais e energéticas) para novas aplicações produtivas, é fundamental para reduzir a pressão sobre os recursos naturais e sobre a capacidade da Natureza para regenerar os resíduos. O balanço de materiais de Portugal revela que no ano 2011 cerca de 50% do total de resíduos produzidos<sup>1</sup> [6][7], foram reempregues pelo sistema económico em aplicações úteis. Os números tornam-se mais significativos quando se compara com o total de materiais consumidos pelo sistema económico e se verifica que apenas 4% dos recursos consumidos foram valorizados não energeticamente, como pode ser observado na Figura 6.



**Figura 6 - Balanço de materiais da economia Portuguesa (ano base: 2011) [8]**

<sup>1</sup> A parcela *Resíduos* é a soma dos resíduos urbanos e não urbanos, conforme APA (2010a) e APA (2010b). Nesta parcela não estão incluídos os resíduos industriais que são resultantes das atividades de extração (ex. resíduos de pedreiras), que são contabilizados como “fluxos ocultos” em termos de entrada de materiais, e como tal, em termos de saídas. Os fluxos ocultos são os fluxos de materiais gerados para tornar disponíveis os materiais com valor económico, não possuindo qualquer valia económica, mas constituindo pressão ambiental (ex. escombros das minas e pedreiras, erosão ou dragagens).

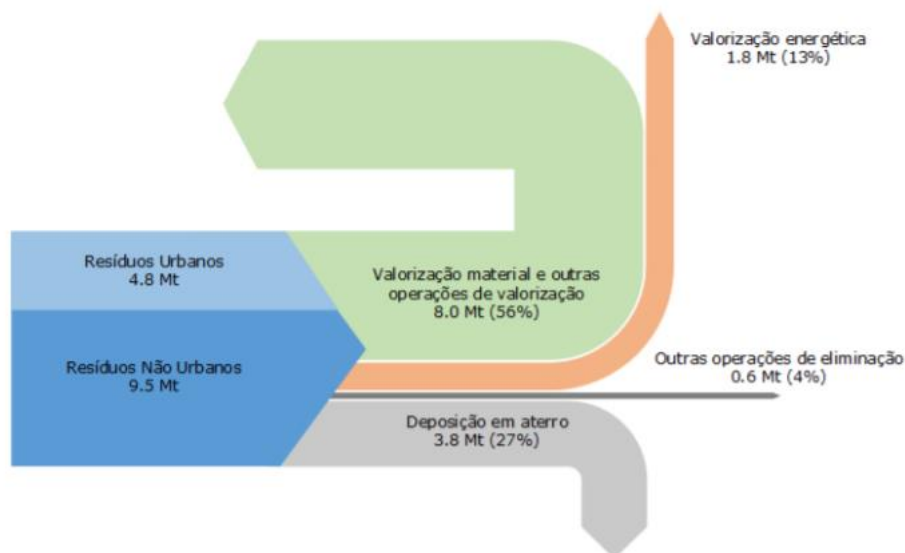
O consumo de materiais em Portugal é essencialmente de origem doméstica. A extração de recursos em Portugal aumentou continuamente entre 1980 (56 Mt) e 2001 (162 Mt), registando aumentos mais acentuados no período pós-adesão à CEE (1986) e em meados e finais dos anos 90. No início do novo século dá-se um decréscimo da extração seguido de novo acréscimo acentuado até 2008 (205 Mt), voltando a decair após este ano. As importações registaram um aumento de 66% entre 1980 e 2011. O aumento de consumo de matérias importadas deveu-se essencialmente à importação de combustíveis desde o início dos anos noventa e às importações de minerais metálicos e não metálicos no final desse período. Do total de materiais consumidos no país, aproximadamente 80% são recursos não renováveis (combustíveis fósseis e minerais metálicos e não metálicos).



**Figura 7 - Componente doméstica e importada do consumo de materiais em Portugal entre 1980-2011 [8]**

As últimas estimativas disponíveis apontam para que, em Portugal, em 2012 tenham sido produzidos 4,8 Mt de resíduos urbanos a que acrescem 9,5 Mt de resíduos não urbanos. A capitação nacional de produção de resíduos é assim de 1,4 t/(hab.ano)[3].

Considerando o total de resíduos, verifica-se que foram produzidos em Portugal, em 2012, 14,3 Mt de resíduos, sendo que destes, 27% foram depositados em aterro, 4% sujeitos a outras operações de eliminação, 13% valorizados energeticamente e 56% sujeitos a outras operações de valorização, que incluem, por exemplo, a reciclagem e a valorização orgânica, ou seja, neste caso os resíduos voltaram a ser reintroduzidos na economia como matérias-primas secundárias, evitando o consumo de recursos primários (Figura 8).



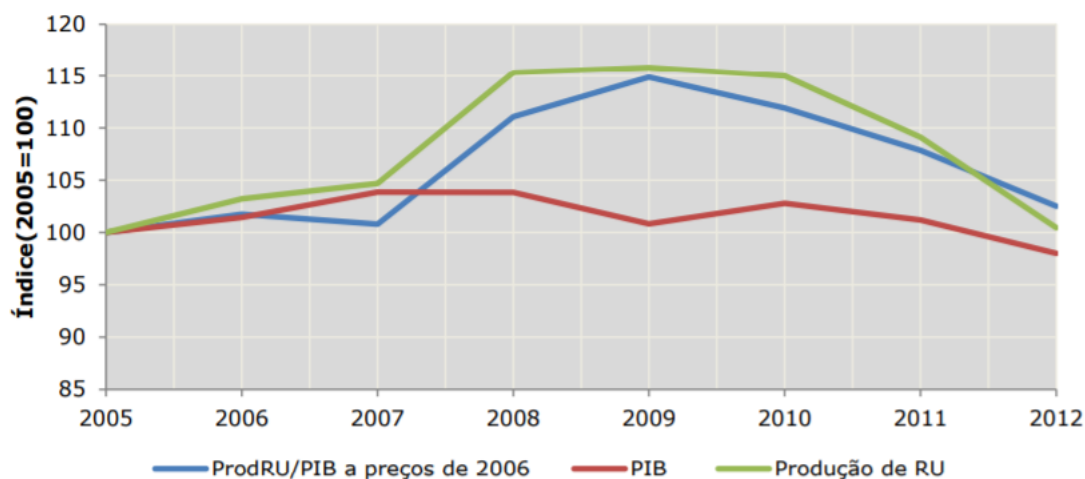
**Figura 8 - Produção e tratamento de resíduos em Portugal em 2012 [8]**

Esta evolução resulta da estratégia adotada a nível nacional centrada no “lado da oferta de resíduos” (“*waste push policies*”), ou seja, orientada para o estabelecimento de locais de receção de resíduos, promoção da sua separação na origem, construção de unidades de tratamento que privilegiam a hierarquia dos resíduos e estabelecimento de metas para a reciclagem de resíduos e outras formas de valorização.

### 2.3.3 Gestão de Resíduos Urbanos

Nos termos do Decreto-Lei n.º 73/2011 define-se Resíduos Urbanos (RU) como o “resíduo proveniente de habitações, bem como outro resíduo que pela sua natureza ou composição, seja semelhante ao resíduo proveniente de habitações”.

Contrariando a tendência de crescimento que se verificava desde 1995, Portugal apresenta uma diminuição na produção de resíduos urbanos desde 2010, em linha, embora de forma mais acentuada, com o abrandamento económico conforme ilustrado na Figura 9, atingindo em 2011 uma captação de 487 kg/(hab.ano), inferior à média europeia de 500 kg/(hab.ano) [9]. Em 2012 foram produzidos em Portugal 4,8 Mt de resíduos urbanos.



**Figura 9 - Produção de Resíduos Urbanos e Produto Interno Bruto (PIB) a preços de 2006, em Portugal [8]**

A gestão de RU em Portugal é da responsabilidade dos municípios e dos sistemas de gestão intermunicipais e multimunicipais, com exceção da Região Autónoma da Madeira. Em Portugal Continental existem 23 Sistemas de Gestão de RU, 12 multimunicipais e 11 intermunicipais, muito diversos no que respeita ao número de municípios que os integram, na área e população abrangida e igualmente nas condições socioeconómicas da população que servem. Esta diversidade reflete-se no fluxo de resíduos processado e, conseqüentemente, nas opções adotadas em termos de recolha e tratamento dos seus RU e também na rede de equipamentos e infraestruturas para a sua gestão.

Portugal apresenta um aumento progressivo dos quantitativos de RU valorizados (Tabela 3). Em 2012, 46% dos RU foram sujeitos a valorização. O contributo da valorização energética é significativo, mas tem-se mantido constante ao longo dos anos. Pelo contrário, o contributo da valorização orgânica tem vindo a aumentar, tendência que se prevê manter no horizonte temporal 2014-2020, fruto da entrada em pleno funcionamento das novas instalações de tratamento mecânico-biológico (TMB). Relativamente à rede de recolha seletiva, tem-se verificado um aumento substancial na quantidade de ecopontos com 3 contentores (verde, azul e amarelo). Entre 2000 e 2012, o número de ecopontos aumentou 325%. A rede de recolha seletiva é ainda constituída por milhares de outros contentores não agrupados em ecopontos (com apenas capacidade para armazenar um ou dois fluxos). A recolha Porta-a-Porta é essencialmente realizada nos grandes centros urbanos de Lisboa e do Porto.

**Tabela 3 - Quantitativos de Resíduos Urbanos por Operação de tratamento em Portugal [8]**

Ano	Deposição em Aterro		Valorização Energética		Valorização orgânica		Valorização multimaterial		Total
	(t)	%	(t)	%	(t)	%	(t)	%	
2012	2.592.797	54,4	929.808	19,5	693.833	14,6	549.485	11,5	4.765.923
2011	3.048.128	58,9	1.088.265	21,0	446.595	8,6	594.792	11,5	5.177.780
2010	3.380.815	62,0	1.058.376	19,4	398.593	7,3	619.353	11,3	5.457.138
2009	3.341.707	60,8	1.082.831	19,7	423.515	7,7	648.214	11,8	5.496.267
2008	3.530.220	64,5	992.953	18,1	382.025	7,0	566.647	10,4	5.471.845
2007	3.170.430	63,8	947.902	19,1	321.038	6,5	527.903	10,6	4.967.273
2006	3.142.766	64,2	978.077	20,0	301.885	6,2	475.349	9,7	4.898.076
2005	2.969.266	62,6	1.056.755	22,3	313.385	6,6	405.779	8,6	4.745.185

O planeamento da gestão de RU está consagrado em planos estratégicos específicos. O Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos para o horizonte 2014- 2020 (PERSU 2020), propõe uma gestão dos RU que garanta a proteção do ambiente e da saúde humana, minimizando os impactes resultantes da sua gestão, respeitando o princípio da hierarquia dos resíduos. Para tal, e em linha com o integral cumprimento da legislação nacional e das metas europeias estabelecidas, é fundamental a prevenção de resíduos, a diminuição da quantidade de RU depositados em aterro e sua valorização.

### 2.3.4 Gestão de Resíduos Não Urbanos

Os resíduos não urbanos incluem todos os outros resíduos que não os urbanos, ou seja, resíduos industriais, hospitalares, agrícolas e outros eventualmente não incluídos nestas categorias devido à sua especificidade, como por exemplo os Resíduos de Construção e Demolição (RCD). O denominador comum é o modelo que assume o produtor do resíduo como responsável pela sua gestão. Ao nível da produção de resíduos não urbanos, a informação disponível<sup>2</sup> [8], aponta para níveis de produção com pouca variação até ao ano 2012, no qual se verificou uma diminuição de 26% em relação a 2011 (Tabela 4). Esta diminuição deve-se essencialmente à diminuição da produção de resíduos no sector da construção, indústrias extrativas e comércio e serviços.

<sup>2</sup> Dados provisórios resultantes do tratamento estatístico pelo INE dos dados registados pelos produtores de resíduos, complementados pelos dados reportados pelos operadores de gestão de resíduos à APA.

**Tabela 4 - Quantitativos de Resíduos Não Urbanos em Portugal, por operação de tratamento [8]**

Ano	Valorização Energética		Outras Operações de Valorização		Deposição no solo (eliminação)		Outras operações de eliminação		Total (t)
	(t)	(%)	(t)	(%)	(t)	(%)	(t)	(%)	
2012	814.267	9%	6.788.070	72%	1.247.256	13%	603.441	6%	9.453.034
2011	832.622	7%	8.098.530	64%	2.647.106	21%	1.157.106	9%	12.735.365
2010	743.418	6%	7.690.870	65%	2.153.256	18%	1.284.136	11%	11.871.680
2009	565.102	5%	7.010.660	59%	3.114.693	26%	1.236.788	10%	11.927.243
2008	582.658	5%	6.313.907	55%	3.444.213	30%	1.075.836	9%	11.416.614

A gestão dos resíduos não urbanos é da responsabilidade do produtor do resíduo. Estes podem fazer o tratamento nas próprias instalações, que é comum nos casos da indústria extrativa ou atividades agrícolas, ou recorrendo a Operadores de Gestão de Resíduos (OGR), que se constituem como uma rede em todo o território nacional. Em 2012, 81% dos resíduos não urbanos produzidos foram alvo de valorização material ou energética, enquanto a restante fração foi sujeita a eliminação (Tabela 4).

## 2.4 Objetivo Lixo Zero

“Lixo Zero é uma meta que é ao mesmo tempo pragmática e visionária, de forma a orientar as pessoas a imitar ciclos naturais sustentáveis, onde todos os materiais descartados são recursos para que outros possam usar. “Lixo Zero” significa a conceção e gestão de produtos e processos para reduzir o volume e toxicidade dos resíduos e materiais, conservar e recuperar todos os recursos, e não queimar ou enterrar. A Implementação do conceito “Objetivo Lixo Zero” permitirá eliminar todas as descargas para a terra, água ou ar, que podem ser uma ameaça planetária para as espécies, humana, animal ou vegetal.” [10]

O desperdício zero é um sistema que abrange todo o ciclo de vida dos resíduos, não apenas a sua fase final de vida. Isto significa que o desperdício é eliminado em vez de ser gerido ao longo de todo o ciclo, ou seja, zero desperdício de recursos, zero emissões, zero resíduos na produção, transporte e fase final de vida. Importante para isto é maneira como os resíduos são considerados, em vez de um problema, devem ser considerados um recurso com potencial [11].

O termo “desperdício zero” só recebeu atenção do público através das diretivas publicadas pela Comissão Europeia chamadas “*Towards a circular economy: A zero waste program for Europe*” e “*The role of waste-to-energy in the circular economy*”.

Para se poder atingir a meta do lixo zero é necessário disciplinar a sociedade como por exemplo definir metas para uma sociedade de reciclagem. A Europa tem feito progressos substanciais em transformar resíduos em recursos e promover formas

sustentáveis de gestão de resíduos, tais como a reciclagem. No entanto, o desempenho varia consideravelmente entre os Estados-Membros. Seis já eliminaram a deposição em aterro de resíduos urbanos, reduzindo-a de 90% a 5% nos últimos 20 anos e alcançando taxas de reciclagem de 85% em certas regiões. Noutros países mais de 90% dos resíduos ainda são depositados em aterros e menos de 5% é reciclado [12].

São necessários sinais políticos fortes para criar previsibilidade de longo prazo para o investimento e mudança, de modo que os materiais, tais como o plástico, vidro, metais, papel, madeira, borracha e outros recicláveis se reintroduzam na economia como matérias-primas secundárias a preços competitivos. A recolha seletiva na fonte, irá garantir uma reciclagem de alta qualidade e contribuir para o desenvolvimento de mercados de matérias-primas secundárias de alta qualidade. É de esperar que se deixe de depositar resíduos recicláveis em aterro até 2025 e os Estados-Membros devem esforçar-se para eliminar os aterros até 2030. A recuperação de energia, incluindo a recuperação e utilização de biocombustíveis de resíduos em energia, terá um papel a desempenhar no que diz respeito aos resíduos não reutilizáveis e não-recicláveis. Isso vai exigir um uso mais eficiente da capacidade de recuperação de energia e propagação na UE [12].

A fim de aumentar os benefícios económicos, sociais e ambientais obtidos com a melhor gestão dos resíduos urbanos, a Comissão Europeia propõe [12]:

- Aumentar a reutilização e reciclagem de resíduos urbanos a um mínimo de 70% até 2030;
- Aumentar a taxa de reciclagem de resíduos de embalagens para 80% em 2030, com objetivos intercalares de 60% em 2020 e 70% por volta de 2025;
- Proibir a deposição em aterro de recicláveis plásticos, metais, vidro, papel e papelão, e os resíduos biodegradáveis em 2025, enquanto os Estados-Membros devem esforçar-se para eliminar os aterros em 2030;
- Promover o desenvolvimento dos mercados de alta qualidade de matérias-primas secundárias;
- Esclarecer o método de cálculo para materiais reciclados, a fim de garantir um nível de qualidade elevado de reciclagem.

A implementação bem-sucedida destas medidas pode criar mais de 180.000 postos de trabalho diretos na UE até 2030, além dos cerca de 400.000 postos de trabalho que serão criados pela implementação da legislação comunitária relativa aos resíduos. Eles vão levar à satisfação entre 10% a 40% da procura de matérias-primas na UE, contribuindo para atingir a meta para 2030 da UE para a redução das emissões de gases de efeito estufa em 40% (62 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> por ano seriam evitadas em 2030) [12].

## **2.5 Economia Circular**

O conceito de economia circular surgiu como resultado da perceção de que para viver da maneira que fazemos atualmente ao nível de extração e consumo de recursos,

poderíamos levar a que deixássemos as gerações futuras com uma menor capacidade de se sustentar [13].

O relatório do *World Wildlife Fund* (WWF) em 2014 confirmou [14] o temor de que a capacidade de suporte da Terra estava a ser ultrapassada. A fim de regenerar os recursos naturais usados atualmente seriam necessários 1,5 planetas Terra devido ao aumento da pegada ecológica do mundo. A pegada ecológica é a área total de hectares necessária para fornecer os bens e serviços ecológicos que os seres humanos usam [14]. A ligação entre consumo e deterioração ambiental é a razão pela qual o papel da economia está sob os holofotes. O papel da economia e como alterá-la está em debate, existe a opinião de que o crescimento económico precisa de se tornar numa economia estável que vai desacelerando até parar de crescer [15]. Por outro lado, existem opiniões que o crescimento contínuo é fundamental para proporcionar um futuro melhor para as gerações futuras [16].

A economia circular apresenta-se como uma resposta adequada sobre como manter o crescimento económico e simultaneamente diminuir os impactos ambientais negativos, uma vez que se baseia na estratégia de desenvolvimento sustentável em que o desenvolvimento económico é conseguido através de alta eficiência e baixas emissões, onde todas as matérias-primas e energia são mantidas e reutilizadas. A ideia é reduzir o impacto resultante das atividades económicas sobre o meio ambiente a um mínimo absoluto [17].

A origem do conceito de Economia Circular (EC) tem raízes em várias escolas de pensamento que ajudaram a tornar um conceito genérico numa ideologia desenvolvida e refinada que empresta aplicação prática em sistemas económicos modernos e em processos industriais.

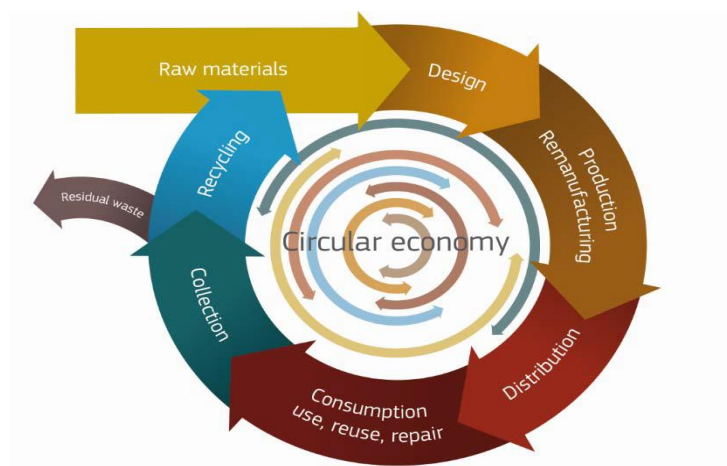
A EC tem abordagens que envolvem a inovação em toda a cadeia de valor do produto, em vez de depender exclusivamente de soluções no final de vida de um produto. Por exemplo, pode incluir:

- Reduzir a quantidade de materiais necessários para proporcionar um serviço específico (redução), prolongando a vida útil dos produtos (durabilidade);
- A redução do uso de energia e materiais, nas fases de produção e uso (eficiência);
- Redução da utilização de materiais que são perigosos ou de difícil reciclagem de produtos e processos de produção (substituição);
- Criação de mercados de matérias-primas secundárias (reciclados);
- Projetar produtos que são mais fáceis de manter, reparar, atualizar, remanufactura ou reciclagem (eco design), desenvolver os serviços necessários para os consumidores a este respeito (serviços de manutenção / reparação);
- Incentivar e apoiar a redução de resíduos e separação de alta qualidade por parte dos consumidores, incentivar a separação e sistemas de recolha que minimizem os custos de reciclagem e reutilização.

Um ponto de partida importante é o desenho de processos de produção, produtos e serviços. Os produtos podem ser redesenhados para ser usados mais tempo, reparados,

atualizados, remanufaturados ou, eventualmente, reciclados, em vez de ser deitados fora. Processos de produção podem ser baseados na reutilização de produtos e matérias-primas e na capacidade restauradora dos recursos naturais.

O diagrama conceptual apresentado na Figura 10 ilustra de forma simplificada as principais fases de um modelo de economia circular, com cada uma delas apresentando oportunidades em termos de redução de custos e dependência de recursos naturais, impulsionando o crescimento e o emprego, bem como limitar o desperdício e emissões nocivas para o meio ambiente. As fases são interligadas e o objetivo é o de minimizar os recursos que se escapam do círculo, de modo a que as funções do sistema sejam otimizadas.



**Figura 10 - Diagrama de processos da Economia Circular [12]**

Algumas políticas e instrumentos da UE já fornecem ferramentas e incentivos em linha com o modelo de economia circular. A hierarquia de resíduos que está subjacente à nossa legislação sobre resíduos está a levar progressivamente à adoção das opções preferenciais da prevenção de resíduos, preparação para a reutilização e a reciclagem, e desencoraja a deposição em aterro. A política de produtos químicos visa eliminar gradualmente as substâncias tóxicas. Algumas medidas de design ecológico para produtos relacionados com a energia incluem requisitos de durabilidade e facilidade de reciclagem. A estratégia de bio economia promove o uso sustentável e integrado de recursos biológicos e fluxos de resíduos para a produção de alimentos, energia e produtos de base biológica. A política climática cria incentivos para economizar energia e reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

No caso da UE a fim de apoiar o design e inovação para uma economia mais circular é proposto [12]:

- No âmbito do Programa de Pesquisa e Inovação da UE (Horizonte 2020)[18], que as oportunidades de transição para uma economia circular a nível europeu seja feita com projetos de inovação em grande escala voltados para a cooperação

dentro e entre as cadeias de valor, promovendo assim o desenvolvimento de competências e o apoio para aplicação de soluções inovadoras no mercado e estabelecer uma parceria reforçada para apoiar a investigação e políticas inovadoras para a economia circular;

- Facilitar o desenvolvimento de modelos mais circulares de produtos e serviços, através de uma política de produto mais coerente, e de forma a desenvolver ainda mais a aplicação da Diretiva Ecodesign[19], prestando mais atenção a critérios de eficiência de recursos, e incentivar o princípio de cascata na utilização sustentável da biomassa, tendo em conta que todos os sectores utilizadores de biomassa a possam utilizar de uma forma mais eficiente.

Os processos WTE podem desempenhar um papel na transição para uma economia circular desde que a hierarquia de resíduos da UE seja utilizada como um princípio orientador e que as escolhas feitas não impeçam o crescimento da prevenção, reutilização e reciclagem. Isto é essencial para assegurar o pleno potencial de uma economia circular, quer no plano ambiental e quer no plano económico, e reforçar a liderança europeia em tecnologia verde. Além disso, e só respeitando a hierarquia de resíduos é que se pode maximizar o contributo da economia circular à descarbonização, em linha com a Estratégia da União Energia e do acordo de Paris. Como mencionado anteriormente, é a prevenção e reciclagem de resíduos, que fornecem a maior contribuição em termos de poupança de energia e redução de emissões de GEE.

### **2.5.1 Modelo Linear vs Modelo Circular**

O atual modelo económico global pode ser denominado como um modelo de “pegar, fabricar, dispor” que depende de grandes quantidades de energia e matérias-primas baratas e facilmente acessíveis [20]. Este modelo linear levou diretamente ao esgotamento dos recursos, ao aumento da poluição e a uma rápida perda de biodiversidade que ameaça a própria existência da função do sistema terrestre [15].

A resposta para este problema pode ser encontrada no antónimo de linear; circular e nomeadamente na economia circular que como definição económica básica, pode ser denominada como:

“A Economia Circular é um modelo económico no qual o planeamento, recursos, aquisição, produção e reprocessamento são concebidos e geridos, tanto como processos quanto produto, para maximizar o funcionamento do ecossistema e bem-estar humano” [21].

A principal razão para a construção de uma economia circular é que, além de ser um modelo económico de melhor desempenho e mais relevante, é necessário para o desenvolvimento sustentável. Os chamados três pilares da sustentabilidade são aspetos económicos, ambientais e sociais que devem combinar para igualar um resultado sustentável a uma ação. O desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento capaz de

suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações. É o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro [22].

O conceito de economia circular é baseado em duas ideias de interconexão: economia de loop fechado e o pensamento para redesenhar o design (*“design out”*), que consiste em inovar em toda a cadeia de valor dos resíduos e não só no final da sua vida útil. As características de uma EC incluem baixos níveis de consumo de energia, baixas emissões de poluentes e uma alta eficiência de energia e materiais que levam a uma economia industrial que é por intenção e design, restauradora e generativa. A EC possui fluxos de materiais biológicos e técnicos. Os “nutrientes” biológicos são projetados para entrar novamente na biosfera com a maior segurança possível e os “nutrientes” técnicos são projetados para circular sem entrar na biosfera. Uma EC ideal será um sistema de redução de resíduos por meio da prevenção do projeto, da recaptura de nutrientes e da reciclagem de materiais, bem como o mais importante do uso de energia renovável [20][21].

### **2.5.2 Benefícios e Desafios de uma Economia Circular**

De acordo com a Comunicação da Comissão Europeia para uma Economia Circular (2014)[12], a EC é uma oportunidade para reinvestir na nossa economia, tornando-a mais competitiva e sustentável.

Os benefícios económicos e práticos de uma EC afetam três grupos, as empresas, o consumidor e a economia como um todo. No caso das empresas há que criar mercados de materiais secundários que funcionem e com isso deve ser prestada especial atenção à criação de condições que permitam aos empresários explorar novos potenciais mercados ligados à economia circular e garantir a disponibilidade necessária de competências no mercado de trabalho. Os consumidores devem poder fazer escolhas informadas com base em melhores informações sobre as credenciais «verdes» dos diferentes produtos. As economias irão beneficiar de uma EC isso irá implicar a redução de custos de material líquido que através da melhoria da produtividade dos recursos e eficiência de recursos ao longo da cadeia de valor irá diminuir o consumo de materiais em 17% a 24% até 2030 o que visa a representar um potencial de poupança de 630 € bilhões por ano para a indústria europeia[12]. Além disso o aumento do PIB em 3,9% é modelado para a Europa através da criação de novos mercados e novos produtos [12]. A segunda grande vantagem é a mitigação dos riscos de volatilidade de preços e fornecimento. Extração de matérias-primas que se estão a aproximar dos seus limites de fornecimento pode resultar em picos de preços e volatilidade, isto pode ser mitigado pela redução da procura a jusante através da introdução da circularidade de materiais que reduzem a procura a montante, evitando a perda de material devido a ineficiências na cadeia de valor linear [23].

A Fundação Ellen Macarthur [23] relata que existem meio milhão de empregos na indústria da reciclagem na Europa, o que iria aumentar significativamente sob condições da EC para uma estimativa de mais 400.000 postos de trabalho até 2030, dependendo do sucesso da implementação da legislação comunitária relativa aos resíduos.

Dos desafios para se poder avançar para uma economia circular, é geralmente reconhecido que, embora exista a necessidade de encontrar um novo sistema econômico que englobe os desafios da escassez de recursos e da mudança climática, ainda existe uma visão limitada de como essa economia seria abordada.

O problema, como Preston [24] afirma é que o termo é inconscientemente usado por governos e empresas e que, embora o conceito esteja a crescer em consciência, o nível de consciência parte de um ponto relativamente baixo. A razão para isto segundo a Fundação Ellen Macarthur [23] aponta, é que a EC em grande parte, ainda é uma construção teórica e que o foco até agora tem sido em casos de negócios de implementação da EC em empresas. A transição para uma EC prevê demorar muitos anos, assim como a estrutura dos sistemas existentes de valores, sociedade, organizações, instituições, métodos financeiros, políticas e regulamentos, que vão sofrer transições para eventualmente formar novas estruturas [12] [25].

Do ponto de vista de um obstáculo financeiro, há, em primeiro lugar, os significativos custos iniciais de investimento que as empresas podem não querer ter, uma vez que a economia imediata de custos pode não ser garantida. Isso cria um fosso que é ainda mais dificultado por um chamado lock-in, e que se não for mudado pode vir a tornar-se norma. Isso veio da mentalidade de curto prazo dos acionistas, na qual os resultados trimestrais são mais importantes do que a agenda de longo prazo. Isso está a mudar lentamente, no entanto, com uma mudança de pensamento de gestão linear para a gestão visionário de longo prazo [25]. Para transformar o principal modelo de negócios de uma empresa, é preciso haver uma plataforma de investimento e experimentação que, por sua vez, depende de uma estrutura de políticas clara, forte e previsível [24].

Do ponto de vista de obstáculos institucionais, ainda existem políticas governamentais e barreiras políticas que impedem a transição para a EC. Os recursos excessivos utilizados ainda são frequentemente incentivados devido a subsídios de mercado e subsídios às indústrias em atividade [24]. Além disso, as cadeias de valor são altamente complexas e, numa EC, muito provavelmente irão se tornar ainda mais, com a produção e o consumo ocorrendo globalmente, há então as complexidades legais, pois os governos nacionais não têm a capacidade de regular toda a cadeia de valor. Dentro da cadeia de valor, há a questão da propriedade em pontos específicos, participação de responsabilidades, custos e responsabilidades. A partir desse momento, será necessário uma forma de governação circular que apoie a ação autorreguladora por parte de empresas e atores sociais [25].

Do ponto de vista de um obstáculo infraestrutural, assim como os obstáculos institucionais, a cadeia de valor é o centro das atenções. As cadeias de valor são

projetadas para uma economia linear, a infraestrutura reversa e a troca de materiais são limitadas pela baixa capacidade de logística reversa. A adição de logística reversa aumenta ainda mais a complexidade das cadeias de valor. Há também uma falta de um sistema de troca de informações, bem como materiais entre as entidades, especialmente no caso de compartilhamento de informações, há a questão de confidencialidade e confiança, o que resulta em níveis mais baixos de partilha [25].

Do ponto de vista de um obstáculo social e de valor, encontra-se um problema, a nossa sociedade moderna valoriza a propriedade do produto e o consumo material o que faz com que a consciência pública para a importância da EC seja limitada. Existe uma falta de entusiasmo do consumidor pela chamada compra sustentável.

Do ponto de vista tecnológico, ainda existem numerosos obstáculos. Para começar, há pouca atenção aplicada à fase de fim de vida nos designs dos produtos atuais, que só atendem às necessidades do usuário durante o seu uso e não à sua eventual reutilização ou reciclagem. A reciclagem muitas vezes também leva a *downcycling*, onde os resíduos são convertidos em outros produtos de menor qualidade e de funcionalidade reduzida. Isso é mostrado no problema atual com plásticos biodegradáveis e convencionais, com os sacos de compras como um exemplo onde os sacos bioplásticos estão a contaminar a reciclagem de plásticos comuns [25].

## **2.6 Desperdício de Energia e *Waste-to-Energy* (WTE)**

A necessidade do WTE surgiu dos fenômenos interconectados que estão a acontecer no nosso planeta, que é a necessidade de energia e o problema do desperdício. À medida que a população global continua a crescer e os padrões de vida a aumentar, a dependência de combustíveis fósseis como fonte de energia está a tornar-se insustentável, pois a dependência de combustíveis fósseis está a causar efeitos prejudiciais como a exploração, a poluição e as emissões de GEE, ameaçando a sustentabilidade do planeta [26].

Políticas e sistemas de energia e resíduos compartilham preocupações mútuas com os impactos ambientais que incluem as reduções de GEE, contaminação do solo e contaminação do lençol freático. Um exemplo dessa preocupação mútua é uma lei de energia e clima apresentada pela Suécia em 2009, que integra as políticas de energia e clima como uma só. O problema do desperdício passa a ser visto como uma resposta às necessidades energéticas [27].

A importância do WTE é evidente quando se considera a política energética da UE, que inclui dois objetivos vinculativos para 2020 que consistem numa participação de 20% em fontes de energia renováveis e uma redução de 20% nas emissões de gases de efeito estufa em relação aos níveis de 1990. Importante notar é que a WTE está classificada como uma fonte de energia renovável pela Diretiva Europeia sobre fontes renováveis de energia, cuja definição de biomassa inclui a parte biodegradável dos resíduos urbanos e industriais. Além disso, estas metas devem atuar como trampolins para novas

reduções em 2050. Por exemplo, o roteiro da economia de baixo carbono 2050 enfatiza a importância da eletricidade, o que significa a necessidade de fontes de energia que não sejam de combustíveis fósseis, como o WTE.

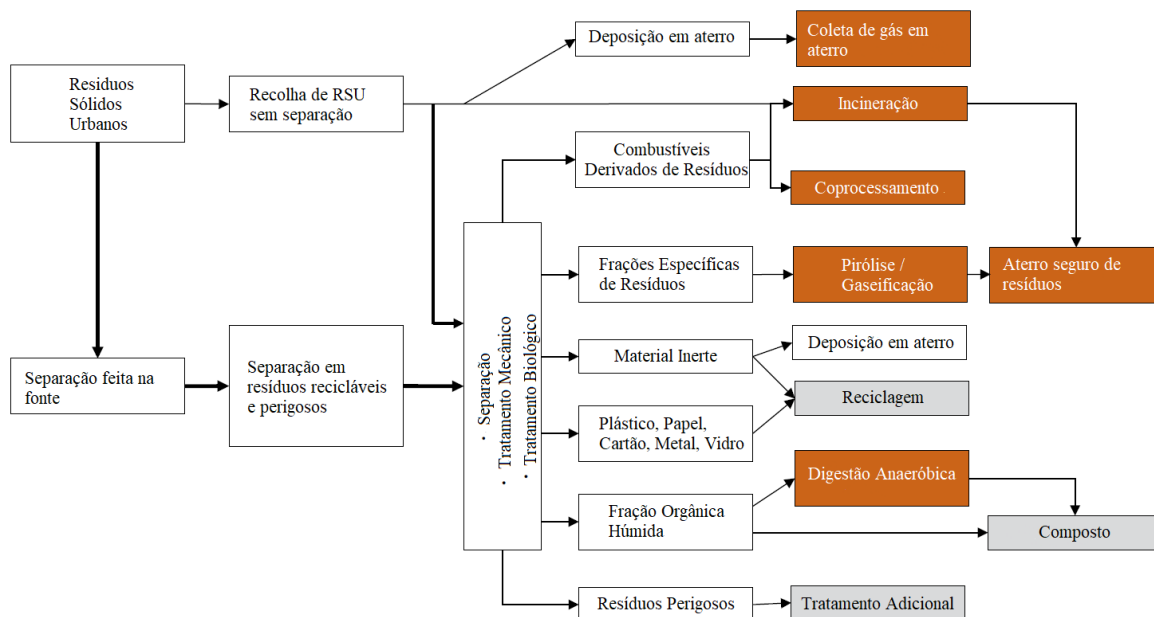
Além disso, existem outras duas políticas de resíduos que promovem o WTE. Uma delas é a Diretiva Aterros, em que os Estados Membros da UE têm a obrigação de reduzir a quantidade de resíduos urbanos biodegradáveis que vão para aterro. A outra é a Diretiva-Quadro Resíduos, que promove a reciclagem e a recuperação. O WTE é classificada como recuperação desde que o processo atenda a determinados níveis de eficiência [27].

Segundo Brunner & Rechberger [28], o WTE atende aos dois principais objetivos da gestão de resíduos. Primeiro, a proteção dos homens e do meio ambiente, como as emissões da incineração como exemplo, são tão avançadas tecnologicamente que os compostos liberados no ar, na água ou no solo não são ameaçadores para os seres humanos ou meio ambiente. O segundo objetivo é a conservação de recursos e a recuperação de materiais, que os processos WTE por natureza afetam positivamente.

### 3. Opções Tecnológicas *Waste-to-Energy* (WTE)

Este capítulo apresenta uma visão geral de cinco tecnologias WTE à escala municipal (figura 11): incineração, coprocessamento, digestão anaeróbica, gás de aterro e pirólise / gaseificação. Estas cinco tecnologias têm diferentes funções e aplicações no sistema de gestão de resíduos urbanos. A ordem das tecnologias não implica qualquer prioridade ou aplicação.

Para cada tecnologia, é fornecida alguma informação de natureza técnica, seguido por uma lista dos tipos de resíduos adequados e um resumo das questões operacionais, ambientais, legais e financeiras relacionadas. A entidade promotora do projeto deve ter um conhecimento de qual a tecnologia que melhor se encaixa para potenciar o tipo de fluxo de resíduos e as implicações ecológicas, jurídicas e financeiras que daí advém.



**Figura 11 - Vista geral do fluxo de material de resíduos sólidos urbanos e suas diferentes opções de utilização e de tratamento [29]**

### 3.1 Incineração de Resíduos Sólidos

A incineração de resíduos sólidos (IRS) é a queima de resíduos num processo controlado dentro de uma instalação específica que é construída para esse fim. O objetivo principal da IRS é reduzir o volume e a massa de RSU e também torná-lo quimicamente inerte num processo de combustão sem a necessidade de combustível adicional (combustão autotérmica). Como efeito colateral, também permite a recuperação de energia, minerais e metais do fluxo de resíduos. Cerca de 25% dos resíduos da incineração são escórias, cinzas de fundo (pesadas) e cinzas volantes (leves). As cinzas de fundo são compostas de finas partículas que caem no fundo do incinerador durante a combustão, enquanto as cinzas volantes, resultam da leveza das partículas, as quais, na ausência de dispositivos de filtração, podem ser arrastadas pelos gases para a atmosfera como fumo. Estas cinzas volantes são um pó mineral fino, gases de escape, que devem ser removidos no tratamento de gases de combustão. Esses resíduos precisam de uma maior atenção e, no caso da fração de cinzas volantes perigosas, um local seguro para a deposição final.

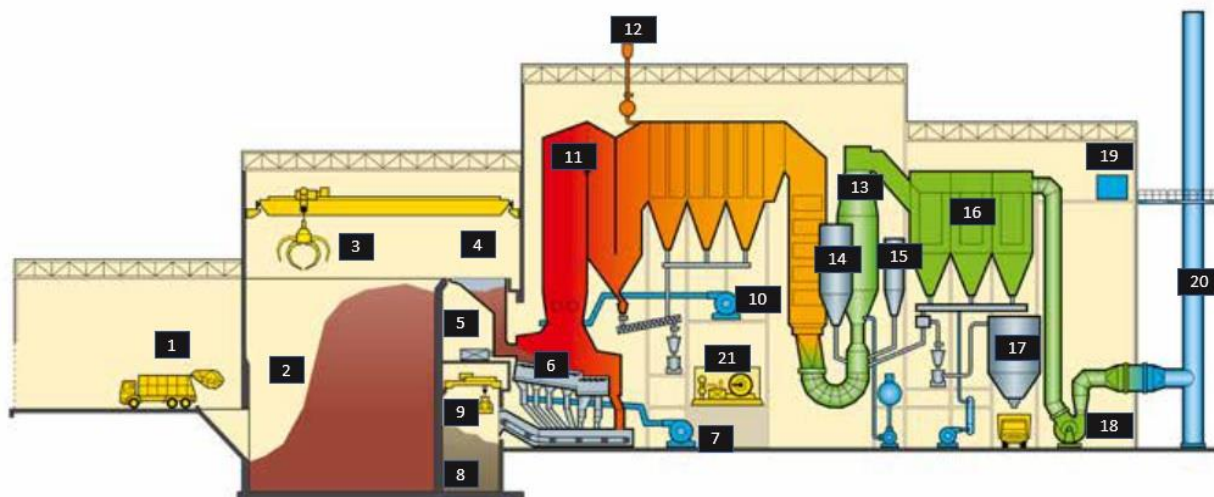


**Figura 12 - Incineradora Municipal de Resíduos Sólidos – Ilha da Madeira [30]**

### **3.1.1 Descrição da Tecnologia**

Os materiais combustíveis dos resíduos queimam quando atingem a temperatura de ignição necessária e entram em contato com oxigênio, passando por uma reação de oxidação. A temperatura da reação está entre os 850°C e 1450°C, e o processo de combustão ocorre na fase gasosa e sólida, libertando simultaneamente energia térmica. É necessário um valor mínimo calorífico dos resíduos para permitir uma reação térmica em cadeia e uma combustão autossustentável (a chamada combustão autotérmica), isto é, sem necessidade de adição de outros combustíveis.

Durante a incineração, são criados gases de escape que, após a limpeza, saem para a atmosfera por um tubo ou canal chamado de conduto. Esses gases de combustão contêm a maior parte da energia disponível como combustível, além de poeira e gases poluentes do ar que devem ser removidos através de um processo de purificação de gases de combustão. O excesso de calor da combustão pode ser usado para produzir vapor para a geração de eletricidade, aquecimento, resfriamento urbano ou fornecimento de vapor para um processo industrial próximo (os componentes da IRS são ilustrados na Figura 13). As Centrais que utilizam a cogeração de energia térmica (aquecimento e refrigeração), juntamente com a produção de eletricidade, podem atingir eficiências ótimas de 80%, enquanto a produção só de eletricidade alcançará eficiências máximas de cerca de 20%.



**Figura 13 - Componentes de uma central de incineração de resíduos sólidos com limpeza de gases de combustão [31]**

Entrega de Resíduos	Incineração	Limpeza de Gás	Recuperação de energia
1 Salão de tombamento	5 Alimentador	13 Reator de gás de combustão	21 Turbina a vapor /gerador
2 Depósito de resíduos	6 Grelha de incineração	14 Lima hidratada	
3 Guindaste	7 Ventilador de ar primário	15 Carvão ativado	
4 Calha de alimentação de resíduos	8 Depósito de cinzas	16 Filtro de mangas	
	9 Guindaste de freixo	17 Silo de resíduos (cinzas volantes)	
	10 Ventilador de ar secundário	18 Fã de identificação	
	11 Caldeira a vapor	19 Monitoramento de Emissões do Sistema (CEMS)	
	12 Válvula de segurança para caldeira	20 Pilha	

### 3.1.2 Frações Adequadas de Resíduos

A IRS foi projetada para tratar resíduos domésticos tipicamente misturados e em grande parte não tratados. Um parâmetro chave é o conteúdo energético, o chamado Poder Calorífico Inferior (PCI) em MJ / kg. Nos termos do Decreto-Lei n.º 78/2004 define-se PCI como “a quantidade de calor libertada pela combustão completa de uma unidade em volume ou massa de um combustível, quando queimado completamente a uma certa temperatura, permanecendo os produtos de combustão em fase gasosa

(sem condensação do vapor de água)”. Para garantir que a combustão é autotérmica o PCI não deve ser inferior a 7 MJ / kg, em média, durante um ano<sup>3</sup> [32]. Em alguns países, o PCI de RSU está frequentemente abaixo desse limite devido a um conteúdo orgânico dominante com alta humidade e um nível significativo de frações de resíduos inertes, como cinzas ou areia. No caso do teor de humidade presente nos RSU, estudos efetuados na Malásia revelam que a uma fração de RSU com um menor teor de humidade corresponde um aumento do potencial global de energia dos resíduos e a uma redução das emissões dos GEE [33]. A separação prévia de materiais recicláveis influencia as características dos resíduos restantes que seguem para incineração, conforme apresentado na Tabela 5.

**Tabela 5 - Influências da separação prévia de materiais recicláveis na incineração [29]**

Fração Removida	Principais Impactos da Remoção nos Resíduos Restantes
Vidros, metais, cinzas, minerais de construção e resíduos de demolição	Aumento do valor calorífico Diminuição da quantidade de escória e metais recuperáveis
Papel, cartão e plástico	Valor calorífico diminui Cargas de cloro (por exemplo, de PVC) diminui nas emissões
Resíduos orgânicos da cozinha e do jardim	Cargas de humidade reduzidas Maior poder calorífico
Resíduos volumosos	Reduzido esforço para a destruição de resíduos
Resíduos perigosos (por exemplo, baterias, componentes eletrónicos)	Esforço reduzido para remover os metais pesados tóxicos voláteis das emissões atmosféricas (por exemplo, mercúrio)

### 3.1.3 Aspetos Operacionais

A operação de uma central de incineração é altamente complexa, requer competências técnicas e de gestão bem desenvolvidas. É muito mais complexo do que a operação de

<sup>3</sup> para comparação: o PCI de 1 kg de óleo combustível é de cerca de 40 MJ / kg

um aterro sanitário. Os requisitos são: uma cadeia de suprimentos contínua de RSU, uma mistura de resíduos alimentada continuamente na câmara de combustão, parâmetros do processo e parâmetros de emissão ajustados, manutenção programada e controlada, compra de materiais auxiliares e peças de reposição, garantia de fornecimento de energia a clientes diretos, gestão dos resíduos ou uso posterior de resíduos do processo. A saúde e segurança operacional deve ser bem desenvolvida e o contacto frequente com as autoridades ambientais, o município, as comunidades locais, a sociedade civil e outros atores devem ser mantida. A localização da IRS deve estar em contextos onde o uso de energia térmica ou da eletricidade gerada possa ser valorizada de forma a garantir a rentabilidade da instalação. Por esse motivo, a IRS deve ser instalada em parques industriais, com distâncias curtas para fontes de resíduos.[29]

### **3.1.4 Aspetos Ambientais**

Um objetivo da IRS é contribuir para uma redução geral do impacto ambiental que de outra forma poderia provocar o despejo selvagem, queima aberta ou encaminhamento para aterros sanitários. A redução do volume de resíduos por incineração ajuda a economizar espaço escasso e valioso para aterro e proteger o meio ambiente. Contudo, as instalações IRS também geram grandes quantidades de gases de combustão que devem ser tratados, mesmo quando a incineração ocorreu sob condições ideais de combustão. Para evitar riscos irreversíveis à saúde das populações locais e do meio ambiente, a conformidade com normas internacionais de emissões é essencial e o monitoramento e relatórios contínuos das emissões deve ser garantido. Os poluentes dos gases de combustão assumem a forma de escória, cinzas e gases como cloreto de hidrogênio (HCl), fluoreto de hidrogênio (HF) e dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>). O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) só pode ser removido usando processos químicos altamente avançados, que aumentam substancialmente os custos do projeto [29].

### **3.1.5 Aspetos Económicos**

A IRS requer um grande investimento de capital e requer um complexo planeamento financeiro de longo prazo. Revela-se igualmente exigente em termos de recursos necessários para garantir a operação e manutenção contínua da instalação. De forma a comparar e avaliar a viabilidade financeira total da operação da IRS é necessário saber os custos de investimento inicial, as expectativas operacionais e os custos anuais. Na Tabela 6 são efetuadas estimativas de custos para uma IRS. No cálculo do custo de investimento, qualquer receita anual com vendas de energia e material pode ser subtraído ao investimento anual capitalizado e aos custos operacionais para se obter um custo total por tonelada de resíduos tratados anualmente. Essa estimativa é mostrada na Tabela 6 para uma IRS com capacidade de tratamento 150.000 toneladas de resíduos anualmente. A tabela mostra que as receitas do mercado de energia e de material por si só não cobrirão os custos anuais completos da central e os custos líquidos esperados de 40 a 80 EUR por tonelada de resíduos devem ser cobertas por outros meios de financiamento. São esperadas algumas receitas adicionais provenientes de taxas de entrada, subsídios públicos ou outros fundos e que são necessários para garantir que

esses custos totais sejam assegurados e que as operações possam ser financiadas de maneira sustentável a longo prazo.

As soluções de incineração levam a um aumento dos custos de tratamento de resíduos, em comparação com os aterros, o que pode fazer com que as entidades gestoras de resíduos prefiram usar a opção dos aterros. Enquanto as estimativas de custo estão relativamente bem estabelecidas para os países industrializados, é difícil fornecer custos representativos e informações para o contexto dos países em desenvolvimento. Os custos de investimento e operação listados na Tabela 6 fornecem números aproximados derivados de várias fontes em todo o mundo e, portanto, devem ser entendidos apenas como orientação [29].

**Tabela 6 - Exemplo de estimativas de custos individuais da IRS com base nos custos de países industrializados e em desenvolvimento [29]**

Estimativa de custo da IRS em países industrializados e em desenvolvimento - os números são apenas uma orientação aproximada						
Capacidade Inceneração 150.000 t/a	Investimento Inicial	Custos de Capital por tonelada de entrada de resíduos	Custos de operação e manutenção por tonelada	Custo total por tonelada	Receitas de vendas de energia por tonelada	Custos a ser cobertos por outros meios de financiamento por tonelada de entrada de resíduos
Custo base na UE (configurado para 2 linhas de forno)	135 – 185 milhões de euros	80 – 115 EUR/t	180 EUR/t	260 – 295 EUR/t	60 EUR/t (Calor e eletricidade) 27 EUR/t (eletricidade)	200 – 235 EUR/t
Custo base em países em desenvolvimento (configurado para 1 linha de forno)	30 – 75 milhões de euros	22 – 55 EUR/t	20 – 35 EUR/t	42 – 90 EUR/t	2 – 10 EUR/t (eletricidade)	40 – 80 EUR/t

Os valores apresentados são derivados da IRS Suíça caracterizada por um alto padrão técnico e foram feitas estimativas com base nesta IRS para os cálculos dos países em desenvolvimento. No caso dos custos de investimento são assumidos 20 a 40% dos custos Suíços, manutenção e materiais auxiliares 20 a 50%, custos de pessoal e descarte de escória 10 a 20% e um seguro de cerca de 50% do valor da IRS Suíça. Ambas as instalações devem atender aos padrões de emissões nacionais e internacionais. As principais diferenças entre as duas instalações são o projeto arquitetónico, o número de linhas do forno, o nível de automatização e a qualidade dos materiais aplicados na central. Premissas para estimativas: taxa de utilização de 100% ao longo da vida útil de 15 a 20 anos e taxa de juros 6% ao ano

### 3.1.6 Conclusões

A incineração deve ser considerada uma opção viável se os seguintes aspetos puderem ser garantidos:

- Pode representar a base para um sistema de monitorização ambiental;

- Devem ser garantidos meios financeiros para cobrir custos adicionais em comparação com o aterro;
- O fornecimento de RSU combustíveis deve atingir pelo menos 100.000 t/ano;
- O PCI deve ser, em média, pelo menos 7 MJ/kg e nunca cair abaixo de 6 MJ/kg;
- A escória pode ser usada após o processamento na construção;
- Capacidade para contratar funcionários qualificados;
- A comunidade que vive ao lado do local de uma IRS está envolvida e os seus interesses são considerado desde o início. Comunicação transparente e envolvimento adequado são uma pré-condição.

### 3.2 Coprocessamento

O Coprocessamento é o uso de materiais derivados de resíduos para substituir recursos minerais naturais e ou combustíveis fósseis tradicionais, quer como matéria-prima alternativa quer como combustível alternativo. O coprocessamento é aplicado mundialmente principalmente na indústria do cimento e em centrais termoelétricas. A convenção de Basileia definiu em 2011 o coprocessamento como o uso de combustíveis alternativos e/ou matérias-primas alternativas com o objetivo da recuperação energética e/ou material [34]. O coprocessamento é não só vantajoso na perspetiva ecológica da valorização de resíduos, como também na perspetiva da indústria cimenteira, que pode assim reduzir os custos de produção. Em centrais termoelétricas onde ocorre apenas a recuperação de energia, é chamado de coincineração. Na indústria europeia de cimento, a taxa de substituição térmica de combustíveis tradicionais por resíduos pode chegar a 80% em certas instalações (média ao longo do ano), enquanto a taxa média de substituição em toda a UE é de cerca de 39% [35]. O coprocessamento em fábricas de cimento também se tornou uma parte integrante dos sistemas de gestão de resíduos em vários países. São exemplos destes combustíveis alternativos as Farinhas Animais, os Resíduos de Veículos em Fim de Vida, os Pneus Usados e os Combustíveis Derivados de Resíduos [36].



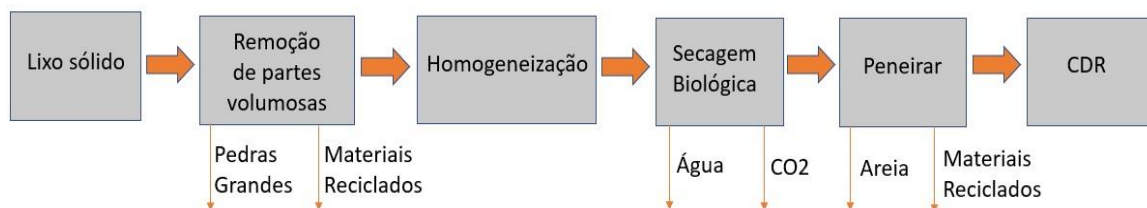
**Figura 14 - Fábrica de cimento com funcionalidade de coprocessamento [37]**

#### 3.2.1 Descrição da Tecnologia

A indústria do cimento é considerada uma das maiores consumidoras de energia do mundo, uma vez que os processos envolvidos, desde o desmonte da rocha, à britagem

das matérias-primas, à produção do clínquer, à moagem do cimento e até ao transporte do material, são dependentes de altos consumos energéticos. Esta indústria contribui para um consumo global de 2% da energia total e 5% da energia no sector industrial anualmente [38]. Deste modo, os custos relativos à energia podem ascender a 50 a 60% do total despendido pelo sector de produção de cimento, com os custos da energia térmica a poder atingir 20 a 25% do gasto total. Num processo de produção de cimento, até 75% das necessidades energéticas poderão estar dependentes do consumo de combustíveis fósseis, sendo as restantes suprimidas por energia elétrica [39]. A indústria cimenteira contribui também fortemente para as emissões atmosféricas, com 5% do total emitido de CO<sub>2</sub> a ser proveniente desta indústria. As emissões atmosféricas geradas na produção de cimento possuem diferentes origens, com 52% a serem oriundas do processo químico de produção de cimento, 36% a serem originadas na queima de combustíveis e 12% a serem emissões indiretas procedentes da aquisição de energia elétrica [38]. Deste modo, devido aos elevados custos monetários e ambientais desta indústria, é necessário que exista uma aposta constante em políticas sustentáveis de modo a minimizar o impacto destes fatores. Nestas políticas destaca-se o coprocessamento de diferentes resíduos.

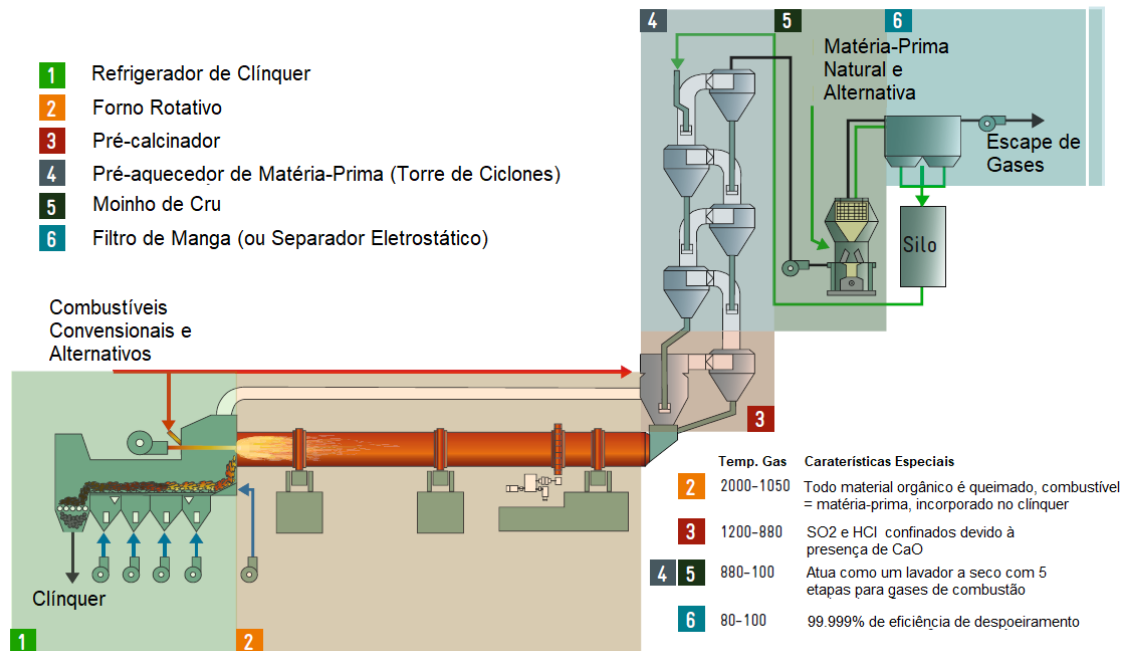
O coprocessamento requer fluxos de resíduos relativamente homogêneos com uma característica definida para garantir o controle da combustão. Através de diferentes processos de pré-tratamento (pré-processamento), os resíduos podem ser transformados no denominado Combustível Derivado de Resíduos (CDR). O termo CDR é utilizado maioritariamente para combustíveis produzidos com base em Resíduos Urbanos (RU) ou Resíduos Industriais (RI). Na Figura 15, o fluxograma de uma Central de Tratamento Mecânico e Biológico (TMB) é apresentado como um exemplo pré-processamento de resíduos sólidos urbanos para o CDR.



**Figura 15 - Fluxo de processo genérico do TMB (pré-processamento) para a produção de CDR [29]**

O CDR é acrescentado no processo de combustão através de um sistema de dosagem. O coprocessamento em fornos de cimento permite as reações de clínquer (matéria-prima básica do cimento) a 1450 °C fazendo com que ocorra uma incorporação completa de cinzas e, em particular, a ligação química de metais ao material do clínquer. Os compostos orgânicos tóxicos apresentam a vantagem de ser completamente destruídos na chama a temperaturas mais altas que 2000°C. A substituição direta de combustível primário no processo de produção representa uma recuperação de energia

significativamente mais eficiente do que outras tecnologias WTE, atingindo normalmente 85% a 95%, dependendo das características dos resíduos.



**Figura 16 - Componentes de um forno de cimento [40]**

### 3.2.2 Resíduos Adequados

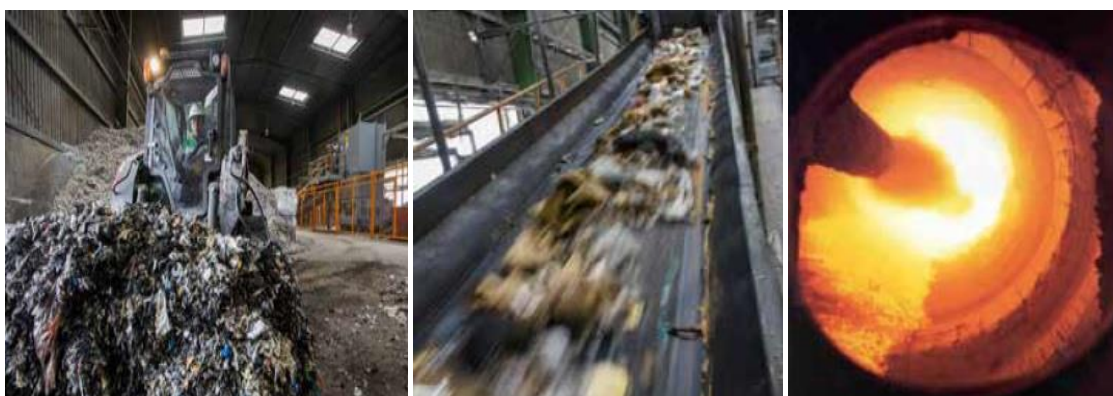
Na indústria do cimento, os combustíveis tradicionais utilizados poderão ser sólidos (carvão, petcoque), líquidos (fuel óleo) ou gasosos (gás natural). No caso dos combustíveis alternativos como o CDR a classificação apresentada na especificação CEN/TS 15359 [41], é composta por três parâmetros distintos, referentes às principais propriedades do CDR, que permitem avaliar a viabilidade da sua utilização e o impacto que a mesma poderá ter no processo de incineração ou coincineração. Os três parâmetros são: o PCI, um maior PCI indica uma maximização do rendimento térmico do CDR, o teor de Cloro(Cl), um baixo teor de Cl indica um baixo efeito de corrosão nas incineradoras ou menores agarramentos aquando da coincineração nos fornos de cimento, e o teor em Mercúrio<sup>4</sup> (Hg), a um baixo teor em mercúrio indica menores níveis de emissões. Um alto teor de cloro ou mercúrio nos resíduos pode causar problemas operacionais ou ambientais. Relativamente à origem do cloro presente no CDR, teorizasse que este possui duas proveniências principais: plásticos, principalmente PVC, fonte principal de cloro orgânico, e resíduos domésticos, fonte principal de cloro inorgânico (NaCl, KCl). No entanto, é importante sublinhar que que a percentagem de cloro presente nas frações compostas por plásticos é superior ao existente em frações orgânicas [42]. Portanto resíduos de plástico PVC não são adequados para

<sup>4</sup> O mercúrio é seleccionado entre os metais pesados presente nos CDR devido à sua baixa volatilidade.

coprocessamento. Um valor calorífico de CDR de cerca de 10 - 15 MJ / kg é desejável para uma operação economicamente sólida [29].

### 3.2.3 Aspectos Operacionais

O uso seguro e responsável dos resíduos requer uma seleção cuidadosa dos pontos de alimentação no sistema do forno, além de um amplo controle operacional de acordo com as características e volumes específicos de resíduos. A sua aplicação não deve afetar negativamente a operação contínua do forno, a qualidade do produto ou o desempenho ambiental. Portanto, a qualidade estável dos resíduos e a taxa de alimentação devem ser garantidos. A introdução de correias transportadoras e novas funções técnicas permitem a entrada de CDR no processo de combustão, bem como salas de armazenamento e medidas de segurança para reduzir o risco de incêndio. Os controles de entrega em operações de rotina devem ser realizados frequentemente para pré-processamento de resíduos ou produção de CDR. O pessoal operacional deve ser adequadamente treinado de acordo com as necessidades específicas e com a natureza dos resíduos ou do CDR. A saúde e segurança operacional devem estar bem desenvolvidas e em frequentes interações com as autoridades ambientais, o município, as comunidades vizinhas e outras partes interessadas. As fábricas de cimento geralmente pertencem a grupos internacionais que podem fornecer conhecimento e especialistas para operação da central.



**Figura 17 - CDR processado (esquerda), correia transportadora na instalação de produção de CDR (centro), dentro do forno de cimento (direita) [29]**

### 3.2.4 Aspectos Ambientais

O coprocessamento pode contribuir para a redução do impacto ambiental geral e impactos da produção de cimento, que é intensivo no consumo de combustíveis fósseis e causa várias emissões para o ar que precisam de ser monitorizadas e reduzidas abaixo dos limites legalmente prescritos. As emissões dos fornos de cimento incluem poeira,

óxidos de nitrogênio (NOx) e dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), além de dioxinas e furanos, óxidos de carbono (CO, CO<sub>2</sub>), compostos orgânicos voláteis, cloreto de hidrogênio (HCl), fluoreto de hidrogênio (HF) e metais pesados. Para garantir o coprocessamento ambientalmente correto de CDR em fornos de cimento, os operadores das fábricas precisam aderir a certos princípios, como os descritos na Convenção de Basileia (2012) [43]. Para que o uso do CDR seja ambientalmente defensável é necessário garantir que, as emissões derivadas da sua queima sejam iguais ou inferiores às que resultam da queima de combustíveis convencionais. Para esse fim, tecnologias e procedimentos de última geração, como uma alimentação direta nas zonas de alta temperatura do forno são obrigatórias. Além disso, a seleção de resíduos adequados, o seu transporte e armazenamento adequados bem como a sua preparação para CDR é crucial para minimizar os impactos ambientais. Os produtos finais de cimento devem ser testados quanto à possível lixiviação de metais pesados antes de serem usados em edifícios, estradas ou outras construções.

### **3.2.5 Aspectos Económicos**

O principal objetivo de um proprietário de uma fábrica de cimento que investe no coprocessamento é reduzir os custos de combustível e matéria-prima. Isso significa que a decisão de investimento depende dos preços do mercado de carvão, gás natural e matérias-primas ou outros incentivos económicos. Quanto mais altos os custos de combustíveis primários ou matérias-primas, mais atraente esse investimento será.

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

- Planeamento do projeto e de custos;
- Capacidade das instalações para manuseio, preparação e dosagem de resíduos no forno de cimento;
- Medidas operacionais de saúde, segurança e controle de emissões;
- Custos de capital, impostos e seguros;
- Taxa de utilização da central;
- Peças de reposição, manutenção e materiais auxiliares;
- Análise de laboratório para determinar a composição de resíduos e CDR;
- Administração, pessoal e salários.

**Tabela 7 - Exemplo de estimativas de custo e receitas de uma central de coprocessamento. [29]**

Estimativa de custo de uma central de coprocessamento de cimento - os números são apenas uma orientação aproximada								
Investimento Inicial	Custos de capital por tonelada de entrada de resíduos	Custos de operação e manutenção por tonelada	Custo total por tonelada	Receitas por tonelada*	Custo de entrada de resíduos por tonelada*	Observação		
5 – 25 milhões EUR incluindo pré-processamento	10 – 25 EUR/t	10 – 20 EUR/t	20 – 45 EUR/t	1 – 5 EUR/t	19 – 40 EUR/t	PCI 10 MJ/kg pré-classificados e capacidade de 50.000 t/a, 20 anos de operação e taxa de juro de 6% ao ano		

\* As receitas estão na forma de substituição de combustível fóssil. Sem subsídios.

\*\* Custos a serem cobertos pela taxa de entrada e subsídios.

Os custos indicados dependem da situação local e é difícil tirar conclusões amplas das informações disponíveis sobre as necessidades financeiras, que diferem substancialmente e dependem parcialmente dos negócios de diferentes empresas. Os investimentos iniciais incluem principalmente o pré-processamento para gerar um CDR. As novas fábricas de cimento podem exigir menos modificações se tiverem sido construídas com a previsão de existência de coprocessamento. Um dos maiores produtores de cimento mundiais considera que é necessária um “Custo de entrada de resíduos por tonelada” mínima de 20 a 30 euros por tonelada de RSU para ser viável o investimento numa instalação de pré-processamento e coprocessamento final em fábricas de cimento [29]. O “Custo de entrada de resíduos por tonelada” da Tabela 7 aponta para valores entre os 19 a 40 euros por tonelada após tratamento, o que significa que o “Custo total por tonelada” que é processada e a “Receita por tonelada” necessitam de ser nivelados de forma a tornar o investimento viável. Um exemplo de um projeto de coprocessamento na indústria do cimento no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) calcula custos de investimento de 3 milhões de euros se forem utilizadas até 60.000 toneladas por ano de diferentes tipos de resíduos e se consiga que cerca de 25% da energia primária de entrada seja substituída. Sendo que 50.000 toneladas (83%) dos resíduos são RSU. O projeto é calculado com custos de 45 euros por tonelada de RSU tratado [44].

### 3.2.6 Conclusões

O coprocessamento é uma tecnologia WTE que já ganhou ampla aceitação entre as comunidades empresariais e decisores políticos. Embora atualmente a sua aplicação

seja focada em produtos industriais altamente calóricos. Um fator limitador consiste no transporte de resíduos dos municípios para a fábrica de cimento. Distâncias acima de 200 km tornam toda a operação financeiramente e ecologicamente pouco viável. Outro fator limitador é a atratividade econômica dos combustíveis alternativos devido à volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis, bem como às baixas receitas das taxas de deposição de resíduos na maioria dos municípios de países em desenvolvimento e emergentes [29].

### **3.3 Digestão Anaeróbica**

A digestão anaeróbica (DA) é a decomposição da matéria orgânica através de microrganismos na ausência de oxigênio. A DA ocorre naturalmente sob condições privadas de oxigênio e pode ser usada sob condições controladas para produzir biogás. Para esse fim, um reator à prova de gás, o chamado digestor anaeróbico, é usado para fornecer condições favoráveis para os microrganismos se desenvolverem e transformarem a matéria orgânica em biogás e num resíduo sólido-líquido chamado digerido. O digerido pode ser usado como fertilizante orgânico. O biogás é uma mistura de diferentes gases que podem ser convertidos em energia térmica e ou elétrica. O gás metano inflamável (CH<sub>4</sub>) é o principal transportador de energia no biogás e o seu conteúdo varia entre 50% e 75%, dependendo da matéria-prima (resíduo) e das condições operacionais [45]. Devido ao seu menor teor de metano, o valor de aquecimento do biogás é cerca de dois terços do valor do gás natural (5,5 a 7,5 kWh / m<sup>3</sup>).

A DA é utilizada em contextos bastante diferentes. Em contextos rurais, são utilizados digestores de pequena escala onde se procura essencialmente converter a matéria-prima primária proveniente da agricultura, principalmente de esterco animal, em conteúdo energético. Este tipo de instalações é fácil de operar e adequado para pequenas escalas. À escala municipal, a DA surge crescentemente como uma opção possível para a recuperação de energia a partir de resíduos sólidos urbanos. No entanto, a operação de biogás em plantas de RSU heterogêneo é um grande desafio em termos de requisitos operacionais, de segurança e financeiros. Uma operação bem-sucedida da DA só é possível garantir se existir uma fração de resíduos orgânicos consistentemente bem separada. Em muitos países, o lixo orgânico é frequentemente misturado com matéria inorgânica, como plásticos, metais e outros contaminantes o que muitas vezes dificulta o sucesso da DA em escalas maiores. Ao contrário de outras centrais WTE, pode afirmar-se que pequenas centrais de biogás são uma opção viável.



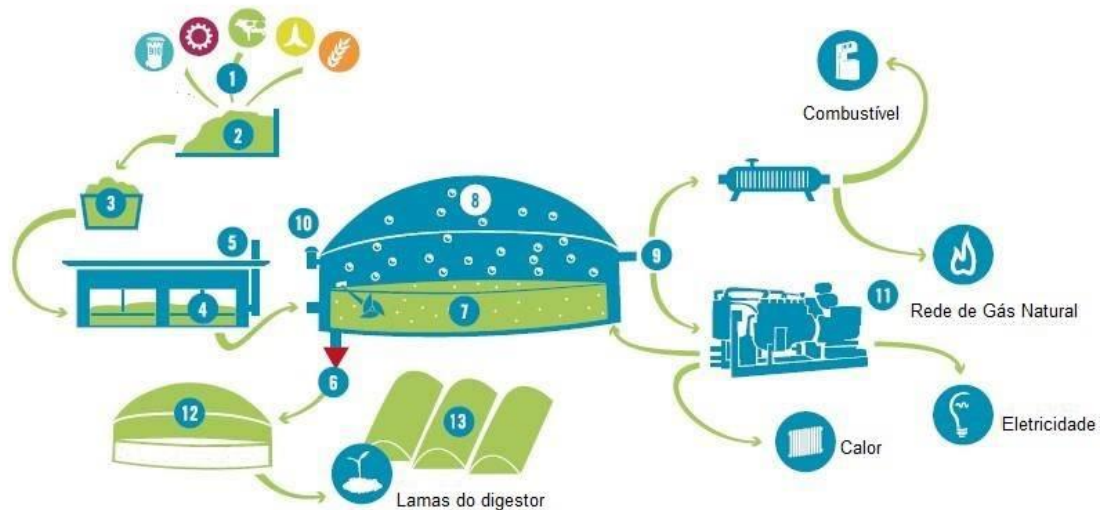
**Figura 18 - Instalação de digestão anaeróbica para a produção de biogás [46].**

### **3.3.1 Descrição de Tecnologia**

Um grande número de projetos diferentes de digestores anaeróbicos existe em todo o mundo com níveis variados de complexidade. De acordo com a [45],[47] DA pode ser classificado como:

- Modo de alimentação: lote ou alimentação contínua
- Faixa de temperatura: condições psicrófilas (<25°C), mesofílicas (35-48°C) e termofílicas (> 50°C), onde apenas os dois últimos são considerados economicamente viáveis. As condições termofílicas são recomendadas quando o risco de patógenos é prevalente. Alternativamente, uma pasteurização a 70°C por 1 hora ou uma compostagem termofílica pode ser usado para inativar patógenos em sistemas mesofílicos.
- Tipo de reator: Os reatores de tanque com agitação contínua são comuns para matéria-prima líquida, como resíduos de restauração ou águas residuais ou lodo industrial do processamento de alimentos, enquanto os digestores plug-flow e batch são usados para matéria-prima sólida. Embora a matéria-prima sólida possa ser desidratada para ser usada em reatores de tanque com agitação contínua.
- Número de estágios: é possível digestão de um a vários estágios.

O biogás pode ser usado diretamente para produzir calor ou convertido em calor e eletricidade usando uma combinação de calor e energia. Outra opção é converter o biogás em metano biológico que contem aproximadamente 98% de metano, que pode ser usado como substituto do gás natural [45]. A figura 19 mostra o processo de produção de biogás através da digestão anaeróbica a partir de resíduos orgânicos e adubos. O biogás gerado pode ser utilizado, por exemplo, num gerador combinado de calor e energia.



- |  |   |
|--|---|
| 1 Matérias-primas diferentes   | 8 Armazenamento de gases.   |
| 2 Receção e armazenamento de resíduos                                | 9 Sistema de purificação de gases   |
| 3 Preparação, processamento, separação e limpeza das matérias-primas | 10 Equipamentos de Segurança (Dispositivos de alívio de pressão, válvulas de segurança, etc.) |
| 4 Edifício fechado para preparação de resíduos putrescíveis          | 11 Unidade de energia e calor combinada   |
| 5 Bio-filtro para reduzir odores e compostos orgânicos               | 12 Armazenamento de lamas dos digestores  |
| 6 Unidade de Saneamento  | 13 Utilização das lamas para outros fins.   |
| 7 Digestor Anaeróbio   |   |

**Figura 19 - Componentes e produtos finais da Digestão Anaeróbia [29]**

### 3.3.2 Resíduos Adequados

A DA é adequada apenas para o processamento de matéria orgânica, isto é, biomassa. Além de usar a biomassa orgânica de "resíduos", como resíduos agrícolas ou frações orgânicas de RSU é possível usar culturas energéticas especialmente cultivadas, como o milho, para a produção de biogás. No entanto, isto pode levar a um potencial conflito com a produção de alimentos. A inclusão de matéria inorgânica ou perigosa na DA não é desejada no processo e pode restringir a degradação microbiana, obstruindo a operação ou limitando a usabilidade do digerido como fertilizante orgânico.

Os resíduos orgânicos municipais, como resíduos domésticos, de mercado e de jardim, separados por fontes, podem ser considerados adequados como fonte de matéria-prima na DA. Além disso, a codigestão com resíduos agrícolas, lamas do tratamento de águas residuais, plantas ou resíduos industriais ou comerciais orgânicos podem aumentar a disponibilidade de matéria-prima e, assim, a sua viabilidade. Os rendimentos de metano e energia da DA variam fortemente entre diferentes matérias-primas (exemplos indicativos na tabela 8).

**Tabela 8 - Exemplos indicativos de produção de metano e energia de matérias-primas orgânicas selecionadas através da DA [29]**

Matéria-Prima	Rendimento de Metano (Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> por tph)	Rendimento de Energia (MJ por tph)
<b>Municípios</b>		
• Águas residuais	15	570
• Resíduos de cozinha e jardim	40-100	1,510 – 3,780
<b>Indústrias</b>		
• Resíduos de frutas	60	2,270
• Resíduos de matadouros	50	1,890
<b>Agricultura</b>		
• Estrume de gado	32	1,210
• Relva	90	3,400

**Nota:** Rendimentos de metano na norma m<sup>3</sup> (Nm<sup>3</sup>, a 0°C, 1,01325 bar e humidade relativa do ar de 0%) por tonelada de peso húmido (tph) de matéria-prima e 37,8 MJ por Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> (maior valor de aquecimento).

### 3.3.3 Aspetos Operacionais

Os aspetos operacionais mais relevantes na gestão do processo de DA são os seguintes:

- Disponibilidade e composição de matéria-prima de resíduos orgânicos: a composição e as quantidades de resíduos orgânicos podem variar significativamente entre instalações, devido principalmente à disponibilidade de produtos agrícolas e seus resíduos. Isto precisa de ser considerado no planeamento de digestores anaeróbicos e inclui o dimensionamento e a possibilidade de instalações de armazenamento de matéria-prima para quando a disponibilidade de matéria-prima for superior à capacidade da central;
- Temperatura: O crescimento e a reprodução de microrganismos é mais rápido sob temperaturas mais altas, desde que não haja outras condições limitadoras. Na maioria dos casos, uma faixa de temperatura mesofílica entre os 35-48 °C é considerado mais estável. A operação em temperaturas mais altas na faixa termofílica > 50 °C pode eliminar patógenos e ajudam a diminuir o volume do reator, mas geralmente requerem aquecimento e isolamento. Em climas mais frios a DA psicofílica foi aplicada com sucesso em digestores de pequena escala [47], porém pode não ser economicamente viável para digestores de maior escala devido à necessidade de aquecimento e isolamento;
- Taxa de carregamento orgânico (TCO): A TCO quantifica a quantidade de matéria-prima que um reator específico pode degradar por unidade de tempo;

- Relação carbono: nitrogênio (C: N): A abundância relativa de carbono e nitrogênio é um parâmetro essencial do crescimento microbiano e deve estar na faixa de 16 - 25 para digestores anaeróbicos.

### **3.3.4 Aspectos Ambientais**

A conversão de resíduos orgânicos em biogás pode estar associada a vários benefícios ambientais. O biogás geralmente substitui outra forma de energia, nomeadamente combustível fóssil ou madeira. Um dos melhores exemplos que encontramos da utilização do biogás é na Suécia que começou a utilizar o biogás como combustível para abastecer os transportes públicos a partir do ano de 2000 [48]. Se um combustível fóssil for substituído por biogás dos resíduos orgânicos ele vai promover a redução da emissão de gases de efeito estufa adicionais para a atmosfera, porque o carbono contido na biomassa é originário do CO<sub>2</sub> atmosférico. Se a lenha for substituída, como é o caso em muitas áreas rurais, pelo biogás este pode reduzir o desmatamento da recolha de lenha. Estudos realizados no Irão concluíram que mesmo uma combinação de tecnologias DA com Incineração e DA com Pirolise/Gaseificação é viável e leva a reduções dos GEE libertados para atmosfera, através da substituição de combustíveis fosseis por RSU para a produção de energia elétrica [49]. O produto digerido da DA pode ser usado como fertilizante orgânico e pode substituir fertilizantes minerais intensivos. Usar o digerido como fertilizante também está dependente de que seja alcançada uma alta qualidade e esteja garantido que este não seja contaminado com, por exemplo, metais ou patógenos.

Um possível risco ambiental é o vazamento do biogás de digestores mal operados. O potencial de aquecimento da atmosfera pelo metano é aproximadamente 21 vezes maior que o do CO<sub>2</sub> o que significa que, tais vazamentos devem ser evitados a todo o custo.

### **3.3.6 Aspectos Económicos**

As receitas da DA dependem muito da qualidade da matéria-prima. A contaminação com substâncias inorgânicas aumenta os custos de separação e diminui os potenciais benefícios derivados dos resíduos e do processo de utilização como fertilizantes na agricultura. O uso direto do biogás requer investimentos adicionais mínimos. Com mais investimentos o biogás pode ser atualizado para bio-metano ou convertido em calor e energia. Na Tabela 9, um exemplo de comparação dos custos individuais da digestão anaeróbica de RSU pré-classificados com capacidade entre 50.000 a 150.000 toneladas de resíduos orgânicos por ano. Os dados foram derivados de [50],[51]. Os custos líquidos estimados de 14 a 18 EUR por tonelada métrica da entrada de resíduos orgânicos indica que só com a venda de energia, o custo total do tratamento dos resíduos não pode ser coberto.

**Tabela 9 - Exemplos de elementos de custos individuais comparativos da digestão anaeróbica derivados de [50],[51]**

Estimativas de custos de uma central de digestão anaeróbica - os números são apenas uma orientação aproximada						
Investimento Inicial	Custos de capital de entrada de resíduos por t/ano	Custos de Operação e Manutenção por tonelada	Total de Custos por tonelada	Receitas* por tonelada	Custos** por tonelada de entrada de resíduos	Observação
12-20 milhões de EUR	12-19 EUR/t	10-15 EUR/t	22-34 EUR/t	8-16 EUR/t	14-18 EUR/t	Capacidade 50.000-150.000 t / a, 20 anos de operação e taxa de juro de 6% ao ano

\* As receitas estão na forma de substituição de combustível fóssil. Sem subsídios.

\*\* Custos finais a serem cobertos pela taxa de entrada e subsídios.

Os benefícios da digestão anaeróbica de resíduos orgânicos podem derivar do biogás como fonte de energia ou como fertilizante. Os benefícios da produção de biogás dependem principalmente do preço da energia que irá substituir, fator esse que depende do valor de energia comercializada no país em que o projeto poderá vir a ser implementado. A possibilidade de usar o digestivo como fertilizante orgânico vai fazer com que o seu valor monetário dependa, entre outras coisas, da qualidade do digestivo, necessidades locais ou regionais, bem como aceitação pelos agricultores. Devido aos fatores referidos serem muito variáveis fez com que a receita obtida com a venda do fertilizante não fosse considerada nos cálculos da tabela o que faz com que o custo de 14 a 18 EUR de tonelada métrica de resíduos tratados seja inferior, com a receita gerada da venda do fertilizante. Os benefícios indiretos da DA derivam da significativa redução da massa de resíduos a ser depositada em aterros sanitários ou a deposição a céu aberto.

### 3.3.7 Conclusões

A fração de RSU nos países de clima quente e com uma maior produção agrícola, torna estes países mais favoráveis à utilização da DA, porque frequentemente existe maiores quantidades disponíveis de resíduos orgânicos e também porque o clima quente favorece o crescimento e a reprodução de microrganismos.

As práticas atuais de gestão de resíduos, principalmente a falta de separação na fonte, dificultam a captação e operação estável da tecnologia DA. Considerada uma solução de baixa tecnologia, os requisitos em termos de operação e mão de obra são frequentemente subestimados, levando a falhas na operação, o que provoca menores rendimentos do biogás do que o esperado e um digestivo de inferior qualidade para aplicação agrícola. Por fim, as receitas financeiras do biogás (eletricidade, calor, frio ou bio metano) dependem da produção a partir de resíduos orgânicos e a sua venda não pode exceder os custos de produção quando os custos de investimento são totalmente contabilizados, especialmente sem a existência de uma tarifa de alimentação especial

para eletricidade ou bio-metano vendido à rede de eletricidade ou gás natural. Integrado no planeamento completo da gestão de RSU, a DA pode complementar outras tecnologias e práticas.

### 3.4 Captação de Gás de Aterro

A captura de gás de aterro (*Landfill gas* - LFG) representa um tipo diferente de tecnologia WTE em comparação com as outras apresentadas. Deve ser visto como um componente essencial para mitigar parcialmente os impactos climáticos negativos na operação de aterros sanitários (*Sanitary Landfill* - SLF). O aterro sanitário é uma prática internacionalmente adotada e aceita nos países industrializados e em desenvolvimento e, em muitos casos, a única opção para tratar e armazenar os resíduos recolhidos de maneira controlada. Embora o aterro sanitário seja uma melhoria no despejo descontrolado a céu aberto, eles também têm impactos ambientais negativos a longo prazo, como a emissão de gás de aterro como o metano com alto potencial de aquecimento global para o meio ambiente, bem como a presença de odores e compostos tóxicos. Para reduzir as emissões de GEE dos aterros sanitários para a atmosfera, a captura de gás metano é essencial. Isso é possível através da captura de LFG, mas naturalmente com limitações no que respeita à capacidade para mitigar os impactos ambientais: devem ter-se em consideração as perdas significativas que ocorrem na fase inicial de um aterro, antes que o sistema de captura de metano esteja instalado e, em operação, quando, ainda não é possível capturar todo o gás emitido pelo aterro.



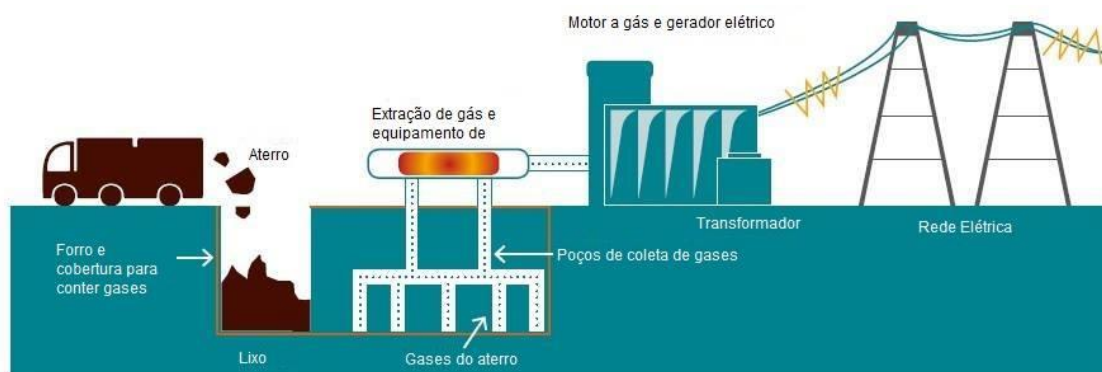
**Figura 20 - Aterro Sanitário com captação de Gás [52]**

### 3.4.1 Descrição da Tecnologia

O LFG consiste em 45% a 55% de gás metano e, portanto, é adequado como combustível para gerar calor ou energia, combinando a produção de calor e energia ou como combustível em formato de gás natural para o setor dos transportes, uma vez que o metano é o constituinte principal do gás natural, representando cerca de 70% da sua composição. O resto do LFG é principalmente CO<sub>2</sub>. O rendimento de LFG depende de um número vasto de fatores, nomeadamente:

- Composição dos Resíduos;
- A forma como os resíduos são colocados e compactados;
- Nível de compactação e altura das camadas individuais;
- Teor de água no aterro;
- Clima; a este propósito, uma análise da geração de biogás na Tailândia mostra que, em diferentes aterros, foram gerados 1,9 a 5,5 vezes mais biogás na estação chuvosa do que na estação seca [53];
- Recursos técnicos para capturar o gás metano no aterro sanitário.

Várias tecnologias de captura de LFG estão disponíveis e podem ser adicionadas ao aterro sanitário quer estando em fase de operação quer estando já encerrado. Todas as tecnologias coletam LFG de resíduos, evitando ao mesmo tempo a intrusão de água e ar no sistema. Para coletar o LFG, são inseridos tubos perfurados no lixo. Esses tubos podem ser instalados verticalmente ou horizontalmente. O gás entra nos tubos perfurados e é transferido para um sistema de purificação de gás para remover o sulfeto de hidrogênio em particular. Após a limpeza, o gás pode ser usado (ver Figura 20).



**Figura 21 - Componentes do sistema de captura de gás de aterro com produção de eletricidade [29]**

### 3.4.2 Resíduos Adequados

Os projetos de captura de biogás requerem um alto conteúdo de resíduos orgânicos reativos no corpo do aterro. Um alto conteúdo de resíduos minerais ou orgânicos de digestão lenta (por exemplo, madeira) reduzem o rendimento.

### 3.4.3 Aspetos Operacionais

Os operadores de SLF devem garantir que não haja risco significativo de migração de gás do aterro através da subsuperfície ou acumular-se fora do aterro numa mistura que possa ser explosiva ou causar asfixia. Eles devem garantir que a recolha, o tratamento e o uso de biogás minimizem a liberação de gases. Auditorias de coleta de gás devem ser realizados anualmente para avaliar a eficiência do sistema.

### 3.4.4 Aspetos Ambientais

A coleta e combustão de metano do LFG contribui para a mitigação dos gases de efeito estufa e outras emissões tóxicas. Se o LFG for usado para substituir combustíveis fósseis, como carvão ou óleo em processos de combustão ou como combustível para substituir o diesel no transporte irá contribuir para melhorar a qualidade do ar. Apesar disso, a experiência internacional tem mostrado desvantagens adicionais do LFG além dos riscos conhecidos dos aterros sanitários:

- A produção teórica de gás e a captura real de gás não coincidem. Em muitos casos, o rendimento real de gás revela-se abaixo das expectativas, o que significa que parte do metano escapa para o meio ambiente. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos estima que as eficiências de coleta variam de 60% a 85% [29]. No entanto, muitos SLF em países em desenvolvimento atingem uma taxa de captura que não chega aos 50% devido à redução de padrões técnicos e limitações de custos;
- Comparando a quantidade de gás realmente capturada e coletada em relação ao total de gás emitido por um SLF durante toda a sua vida útil, a taxa de eficiência cai para cerca de 20% a 30%;
- O LFG é gerado durante um período de 30 a 50 anos, num horizonte temporal que vai além da operação de um SLF;
- Vazamentos no sistema de LFG são um risco de segurança devido ao facto de o gás que escapa, poder ser acumulado nos edifícios das proximidades e poder levar a explosões.

### 3.4.5 Aspetos Económicos

No esquema do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)<sup>5</sup>, muitos projetos de captura de biogás com geração de energia foram realizados em países em desenvolvimento. Sem a receita adicional com as reduções certificadas de emissões (ou créditos de carbono) de CO<sub>2</sub> muitos projetos de LFG provavelmente não teriam sido implementados devido a razões económicas. A Tabela 10 fornece uma orientação sobre os custos de captura de biogás com base em informações de projetos de MDL do Brasil [54] e China [55]. Os custos dependem muito do design e da topografia do aterro sanitário. Os custos de construção e operação do próprio aterro não estão incluídos.

---

<sup>5</sup> O MDL é um dos mecanismos de flexibilização criados pelo Protocolo de Kyoto para auxiliar o processo de redução de emissões de gases do efeito estufa ou de captura de carbono.

**Tabela 10 - Exemplo de elementos de custos individuais comparativos de um projeto de captura de LFG com produção de energia derivada do MDL em projetos no Brasil [54] e China [55]**

Estimativas de custo da coleta de gás de aterro sanitário aplicada a aterros sanitários nos projetos de MDL no Brasil e na China						
Investimento Inicial	Custos de Capital de entrada de resíduos por t/ano	Custos de Operação e Manutenção por tonelada	Total de custos por tonelada	Receitas* por tonelada	Custos por tonelada de entrada de resíduos	Observação
6 milhões EUR (MDL-Brasil)	0.8 EUR/t	0.8 EUR/t	1.6 EUR/t	2.4 EUR/t	-0.8 EUR/t	Capacidade 390.000 – 850.000 t/ano, 21 anos de operação e taxa de juro de 8% e 12% ao ano
5.3 milhões EUR (MDL-China)	1.4 EUR/t	0.3 EUR/t	1.7 EUR/t	3.4 EUR/t	-1.7 EUR/t	

\*Da venda de gás/energia e incluindo receitas de créditos de MDL nos projetos em questão

**Nota:** Em cada caso, os custos de investimento são para geradores completos da instalação. Custos de construção e operação do SLF não estão incluídos.

### 3.4.6 Conclusões

A coleta de LFG não é a principal razão para a execução de um aterro sanitário, mas o LFG deve ser considerado como um subproduto da operação de um SLF. É sabido que os SLFs têm muitas desvantagens, como contaminação das águas subterrâneas e do ar, a geração de lixiviados, que devem ser tratados, e os maus odores. Portanto, o gás de aterro não deve ser considerado um WTE primário, mas sim uma componente que é recomendável que esteja presente na operação de SLFs quando as cidades não possuem alternativas a esta solução de tratamento de resíduos. A coleta de LFG é vista como uma oportunidade para aterros existentes, e não para novos projetos de WTE. A captura LFG pode mitigar alguns dos impactos climáticos do SLF, no entanto, a baixa taxa de eficiência da captura de gás ao longo de toda a vida útil do aterro, mostra a dificuldade de mitigar os impactos climáticos do SLF.

## 3.5 Tecnologias Alternativas: Pirólise e Gaseificação

Nos últimos 40 anos, o desenvolvimento das chamadas “Tecnologias Alternativas” (TA) para tratamento térmico dos desperdícios ocorreu em duas etapas principais. O primeiro passo foi nas décadas de 1970 e 1980 e foi caracterizado pela motivação para desenvolver uma tecnologia abrangente e eficiente para tratamento de resíduos com a máxima geração de produtos de processo, que resultam em diferentes combustíveis, e impactos ambientais negativos mínimos. O segundo passo em meados dos anos 90 foi dominado por estratégias de marketing, que se refere a uma abordagem de planeamento de longo prazo, com o objetivo de alcançar uma vantagem competitiva sustentável. Gasificação e pirólise, posteriormente pirólise plasmática, foram

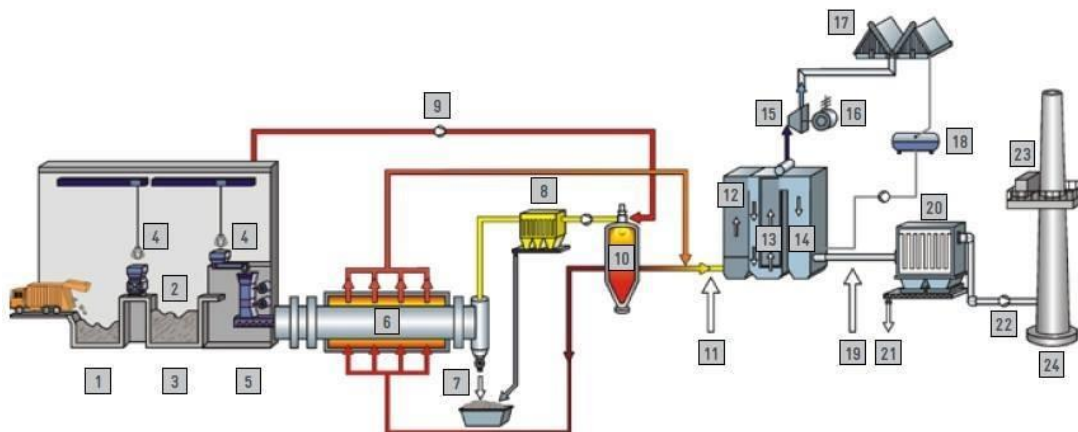
consideradas alternativas técnica e financeiramente viáveis à incineração de resíduos e foram rotuladas com a qualidade de “tecnologia não poluente”, comparativamente à incineração. Atualmente, nenhuma instalação de grande escala para o tratamento de RSU com recurso a estas tecnologias está em operação na Europa, África ou América Latina e as poucas são instalações que na Ásia, principalmente no Japão, e nos EUA estão a operar como um elemento integrado num sistema municipal de tratamento de resíduos mais complexo ou apenas para fluxos de resíduos específicos. Os requisitos avançados de tecnologia, operação e os altos custos de investimento inicial, dificultam a aplicação desta tecnologia em grande escala.

Como a incineração de resíduos, o objetivo da TA é tratar os resíduos para reduzir o seu volume e riscos. O processo também fornece um meio de ativar a recuperação de conteúdo energético, mineral e ou químico de resíduos, na forma de produtos úteis de "reciclagem", como gás de síntese, óleo, carvão ou coque (ver Figura 21).

### **3.5.1 Descrição da Tecnologia**

Pirólise / gaseificação é a desgaseificação de resíduos sob condições controladas por oxigênio, durante as quais o gás de pirólise e um coque sólido são formados. Os valores de calor do gás de pirólise geralmente situam-se entre os 5 e 15 MJ/m<sup>3</sup> com base em desperdício. Num sentido mais amplo, “pirólise” é um termo genérico que inclui várias combinações de diferentes tecnologias que constituem, em geral, as seguintes etapas tecnológicas:

- Processo de combustão lenta: Formação de gás a partir de partículas voláteis de resíduos a temperaturas entre 400°C e 600°C;
- Pirólise: decomposição térmica das moléculas orgânicas dos resíduos entre 500°C e 800°C, resultando na formação de gás e numa fração sólida;
- Gaseificação: Conversão da parcela de carbono restante no coque de pirólise entre os 800°C e 1000°C com a ajuda de uma substância da gaseificação (por exemplo, ar ou vapor);
- Incineração: Dependendo da combinação de tecnologia, o gás e o coque são queimados numa câmara de incineração.



- |                              |                                    |                                     |
|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 Depósito de Lixo Grossoiro | 9 Ventilador de Gases de Combustão | 17 Condensador                      |
| 2 Triturador Rotativo        | 10 Câmara de Combustão             | 18 Alimentação do Depósito de Água  |
| 3 Depósito de Lixo Triturado | 11 Redução não Catalítica Seletiva | 19 Tremonha de Medição Aditiva      |
| 4 Ponte Rolante              | 12 Evaporador                      | 20 Filtro Fibroso                   |
| 5 Sistema de Alimentação     | 13 Super-aquecedor                 | 21 Descarga de Partículas Filtradas |
| 6 Forno de Pirólise          | 14 Economizador                    | 22 Ventilador de Escoamento         |
| 7 Sistema de Descarga        | 15 Turbina                         | 23 Sistema de Monitorização         |
| 8 Filtro de Gases            | 16 Gerador                         | 24 Armazenamento                    |

**Figura 22 - Componentes de uma instalação de pirólise para tratamento específico de resíduos sólidos [56]**

Outros processos foram sendo desenvolvidos com base no desacoplamento das fases que também ocorrem num incinerador: secagem, volatilização, pirólise, carbonização e oxidação dos resíduos. Alguns desses desenvolvimentos enfrentaram problemas técnicos e económicos quando foram dimensionados para tamanhos comerciais e, como tal deixaram de ser utilizados. Alguns são usados comercialmente (por exemplo, no Japão) e outros estão a ser testados em instalações de demonstração em toda a Europa, mas ainda possuem apenas uma pequena parcela da capacidade total de tratamento quando comparada à incineração e são aplicados apenas para resíduos selecionados.

### 3.5.2 Resíduos Adequados

Não há experiências bem-sucedidas com o tratamento de volumes maiores de RSU misturados devido à heterogeneidade da sua composição. Por esse motivo, a pirólise pode ser uma opção para o tratamento final de fluxos de resíduos específicos, como solo contaminado, resíduos clínicos ou resíduos industriais e comerciais não perigosos. Não é recomendado para resíduos urbanos mistos ou para um ambiente em que são necessárias tecnologias robustas e comprovadas.

### 3.5.3 Aspetos Operacionais

A pirólise ou a gaseificação não podem ser consideradas fáceis de manusear, mas devem ser um componente dentro de um sistema geral de gerenciamento de resíduos. A operação requer um bom entendimento da composição dos resíduos recebidos e conhecimento do processo. A experiência mostrou que a operação sem problemas de uma instalação de pirólise requer técnicos altamente qualificados.

### 3.5.4 Aspetos Ambientais

As potenciais vantagens dos processos de pirólise podem incluir:

- Recuperação do valor do material da fração orgânica, como por exemplo o metanol;
- Aumento da geração de eletricidade usando motores a gás ou turbinas a gás;
- Volumes reduzidos de gases de combustão após combustão;
- Produção de carvão ou coque que pode ser usado como combustível em instalações de produção de energia ou cimento.

### 3.5.5 Aspetos Económicos

Devido aos altos custos de operação e manutenção, a sustentabilidade das TA só é considerada aceitável, se os produtos do processo (gás, coque) tenham um bom valor de mercado. Isso depende muito das condições do mercado e da necessidade para um consumidor final (por exemplo, fábrica de cimento) próximo à fábrica da TA. As experiências dos últimos 40 anos mostram que além dos desafios técnicos, as empresas de pirólise e gaseificação frequentemente precisam de lidar com problemas económicos. Desafios que levaram, em muitos casos, a paralisações em operação, uma vez que nenhuma receita adequada poderia ser obtida para os custos adicionais da preparação do produto. Comparada com todas as outras tecnologias WTE apresentadas, a pirólise e gaseificação são as mais caras. A Tabela 11 abaixo fornece uma orientação sobre os custos de uma instalação de tecnologia alternativa com uma entrada anual de 150.000 a 200.000 toneladas.

**Tabela 11 - Exemplo de elementos de custos individuais comparativos de uma instalação de pirólise na Alemanha [57]**

Estimativas de custo de uma central de pirólise/gaseificação - os números são apenas uma orientação aproximada						
Investimento Inicial	Custos de Capital de entrada de resíduos por t/ano	Custos de Operação e Manutenção por tonelada	Total de custos por tonelada	Receitas* por tonelada	Custos** por tonelada de entrada de resíduos	Observação
80 – 120 milhões de EUR	35 – 45 EUR/t	30 – 40 EUR/t	65 – 85 EUR/t	2 – 5 EUR/t	63 – 80 EUR/t	Capacidade 250.000 t/ano, 20 anos de operação e taxa de juro de 6% ao ano

\*Da venda de produtos finais

\*\*Custos a serem cobertos pela taxa de entrada e subsídios

### **3.5.6 Conclusões**

Os conceitos de gestão de resíduos orientados para o futuro devem atender às necessidades económicas e ecológicas. Dentro deste contexto, pirólise ou gaseificação de frações de alto teor calorífico podem oferecer, em combinação com centrais e fornos, uma solução técnica alternativa. A abordagem técnica representa uma opção possível dentro de uma gestão de resíduos já totalmente organizada.

Contudo, na maioria dos países, não existem condições numa instalação municipal que justifique a aplicação de pirólise ou gaseificação. Além disso, os custos de operação e o investimento relativamente alto, não justificam experimentar uma tecnologia de nicho para frações muito seletivas que raramente são encontrados no lixo municipal.

## **3.6 Matriz de Apoio à Decisão**

### **3.6.1 Objetivo**

Qualquer projeto de WTE é um empreendimento complexo e deve ser acompanhado por uma avaliação profissional e completa de viabilidade. A matriz de decisão apresentada neste capítulo procura ajudar a obter uma primeira ideia da adequação do potencial tecnológico para contextos específicos e os vários aspetos que os responsáveis de decisão devem observar nas discussões com os fornecedores das diferentes tecnologias[29]. A matriz tem três objetivos:

- Fornecer uma visão geral das pré-condições para a construção e operação de uma tecnologia WTE;
- Comparar a adequação das cinco tecnologias WTE apresentadas para diferentes condições estruturais;
- Para oferecer uma primeira orientação sobre se uma tecnologia WTE pretendida é aplicável.

A matriz consiste em 12 parâmetros essenciais a serem considerados no contexto local quando se olha para o futuro de um projeto WTE. Esses são:

1. Nível geral de gestão de resíduos
2. Composição de resíduos
3. Valor calorífico dos RSU para processos térmicos e conteúdo orgânico
4. Quantidades adequadas de resíduos para WTE
5. Operação eficiente de instalações de resíduos
6. Tempo e distância adicionais de transporte da central de RSU para a central WTE
7. Comercialização e ou destino final dos subprodutos do processo
8. Quadro jurídico e requisitos ambientais para a WTE
9. Financiamento da gestão de RSU
10. Acesso a peças de substituição
11. Acesso dos utilizadores finais à energia produzida nas centrais WTE
12. Incentivos à produção de energia com baixas emissões de carbono

Os parâmetros são parcialmente retirados do guia dos responsáveis de decisão do Banco Mundial [58] e modificados para atender às necessidades desta Dissertação. Cada parâmetro é descrito em mais detalhe no anexo A.

Para cada um dos doze parâmetros listados acima, os decisores devem avaliar as suas condições locais de acordo com as opções dadas horizontalmente da esquerda (altamente avançado) para a direita (muito subdesenvolvido) na matriz. O potencial da adequação das cinco tecnologias WTE é mostrada por uma cor diferente para cada um dos locais e condições:



### VERDE

A tecnologia WTE é a Provavelmente a mais adequada

### AMARELO

Mais informações e ou algumas melhorias nas condições locais são necessárias para obter êxito no planeamento e implementação de um Projeto WTE.

### VERMELHO

A tecnologia WTE não é adequada. É altamente recomendável melhorar ou alterar as condições locais específicas.

Após avaliar os doze parâmetros, o decisor terá uma visão geral da adequação de cada uma das tecnologias às condições locais. Como orientação, o número de campos vermelho, amarelo e verde para cada tecnologia WTE pode ser interpretada da seguinte forma:

Totais da Matriz	A tecnologia é adequada para o meu contexto?
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nove ou mais campos verdes</li> <li>• Todos os outros amarelos</li> </ul>	<p>Em princípio, a tecnologia parece aplicável. Contudo, parâmetros em amarelo devem ser investigados em mais detalhe e melhorias devem ser iniciadas.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menos de nove campos verdes</li> <li>• Todos os outros amarelos</li> </ul>	<p>A tecnologia pode ser adequada, mas a condição fornecida não favorece a sua aplicação.</p> <p>Os fabricantes devem avaliar as condições dadas antes de iniciar um projeto WTE ou se concentrar numa tecnologia que tem mais campos verdes.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Um ou mais campos vermelhos</li> </ul>	<p>Existem deficiências graves ao aplicar essa tecnologia</p> <p>Todas condições destacadas em vermelho devem ser melhoradas antes de iniciar um projeto para a tecnologia ou selecione uma tecnologia que aparece somente em campos amarelos e verdes.</p>

A aplicação da matriz permite que os utilizadores construam uma primeira avaliação transparente de opções realistas de WTE. A matriz fornece uma visão geral das condições prévias que exigem ser cumpridas para a região de destino de um projeto WTE e da lacuna de informações para uma avaliação mais abrangente. Para obter mais detalhes sobre cada parâmetro e os seus diferentes valores, consulte o Anexo A.

### 3.6.2 Matriz de Tomada de Decisão

#### 1. Nível geral de gestão de resíduos

1	Sistema avançado de gestão de resíduos baseado em fluxos de resíduos (por exemplo, biomassa, resíduos perigosos, recicláveis).	A recolha sistemática de resíduos é organizada. Algumas frações de resíduos são direcionadas (por exemplo, pneus, materiais recicláveis, biomassa) para a reciclagem e compostagem	Recolha sistemática de resíduos e disposição no aterro. A reciclagem não está organizada de forma sistemática.	Ausência sistemática de recolha de resíduos, reciclagem e deposição
	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

#### 2. Composição dos Resíduos

2	As frações orgânicas e não orgânicas são recolhidas separadamente. Resíduos minerais, perigosos e volumosos são tratados separadamente	RSU ou frações coletados separadamente de resíduos são às vezes misturados com pequenas frações de minerais e resíduos perigosos	Os RSU são regularmente misturados com frações de minerais ou resíduos perigosos	Os RSU são misturados com grandes quantidades de minerais e resíduos perigosos
	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

#### 3. Valor calorífico dos RSU para processos térmicos e conteúdo orgânico

3	O valor calorífico do RSU é em média > 8 MJ / kg.	O valor calorífico do RSU é em média entre 7 e 8 MJ / kg.	O valor calorífico do RSU é < 7 MJ / kg. Alto conteúdo de biomassa com elevada média de humidade	O valor calorífico do RSU é < 7 MJ / kg. O conteúdo de frações inorgânicas (por exemplo, cinzas, poeira, areia, vidro e metais) é alto.
	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

#### 4. Quantidades de resíduos adequados para WTE

	Disponibilidade >150.000 toneladas métricas de frações de resíduos adequados por ano	Disponibilidade de 50.000 a 150.000 toneladas métricas de frações de resíduos adequados por ano	Disponibilidade de 10.000 a 50.000 toneladas métricas de frações de resíduos adequados por ano	Disponibilidade de <10.000 toneladas métricas de frações de resíduos adequados por ano
4	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

#### 5. Operação eficiente das instalações de resíduos

	As entidades públicas e privadas são experientes na eficiente gestão de resíduos, instalações e na cooperação	As entidades públicas ou privadas são experientes na gestão de resíduos mas necessitam de uma melhoria das infraestruturas para gerir eficientemente as instalações WTE	As entidades públicas têm uma limitada experiência com WTE e o recrutamento de pessoal qualificado a nível nacional é difícil para setor público e privado	Nem as entidades públicas nem privadas têm experiência com a operação de sistemas WTE
5	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

#### 6. Tempo e distância adicional de transporte da central de RSU para central WTE

	Distância ou tempo de transporte dificilmente mudarão comparado com a situação atual	O tempo de transporte aumentará < 1 hora e a distância adicional < 50 km	O tempo de transporte aumentará > 1 hora e a distância adicional > 100 km	Distância de transporte adicional > 200 km e o transporte ferroviário não está disponível
6	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

#### 7. Comercialização e ou destino final dos subprodutos do processo

	Existe um mercado para os subprodutos do processo. Os subprodutos perigosos podem ser depositados com segurança num aterro sanitário controlado, próximo da central WTE	Não existe nenhum mercado para subprodutos do processo. Todos os subprodutos do processo podem ser depositados em segurança num aterro sanitário controlado próximo da central	Não existe nenhum mercado para subprodutos do processo. A eliminação segura requer transporte de grandes distâncias	Não existe nenhum mercado para subprodutos do processo e a deposição segura dos resíduos não pode ser disponibilizada
7	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

## 8. Quadro jurídico e requisitos ambientais para o WTE

8	Um sistema jurídico abrangente que considera todos os tipos de WTE existentes. As leis são aplicadas numa estratégia nacional de gestão de resíduos que também inclui o WTE	Existe um quadro jurídico nacional para o WTE. Todos os resíduos do processo podem ser depositados com segurança num aterro sanitário junto à planta	Um quadro jurídico nacional para WTE, não existe ou apenas existe parcialmente. Pode ser garantido que padrões internacionais sejam respeitados em Projetos	O quadro jurídico nacional proíbe o WTE térmico ou são indicados padrões de emissões que não podem ser aplicados
	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

## 9. Financiamento da Gestão de RSU

9	Custos de recolha e deposição dos RSU são sempre totalmente cobertos. Meios financeiros para cobrir custos adicionais de WTE são acessíveis.	Custos de recolha e deposição dos RSU são sempre totalmente cobertos. Custos adicionais para o WTE podem ser difíceis de cobrir.	Os custos de recolha e deposição de RSU não podem ser cobertos regularmente.	Frequentemente há falta de meios financeiros para cobrir os custos operacionais dos serviços de gestão de resíduos
	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

## 10. Acesso a peças de substituição

10	Peças de substituição podem ser adquiridas localmente.	A maioria das peças de substituição podem ser adquiridas localmente. Existem escritórios de venda de peças de substituição importadas que estão disponíveis localmente	A tecnologia chave da central deve ser importada. Existe atrasos no acesso a peças de substituição importadas	O acesso a peças de substituição importadas não é possível
	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

## 11. Acesso dos utilizadores finais à energia produzida nas centrais WTE

11	As instalações WTE ou CDR são localizadas perto de uma área industrial com necessidade de energia e calor. Existe fácil transporte e infraestruturas energéticas	As instalações WTE ou CDR são localizadas perto de uma área industrial com moderada necessidade de energia e calor. Existe fácil transporte e infraestruturas energéticas	As instalações WTE ou CDR são localizadas perto de uma grande rede de transmissão de energia. Não há necessidade de calor na área	As instalações WTE ou CDR são localizadas numa área onde existe má conexão para fornecer energia aos consumidores
	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

## 12. Incentivos à produção de energia com baixas emissões de carbono

	Incentivos económicos para baixas emissões de carbono na produção de calor e energia já são aplicadas com sucesso	Incentivos económicos para baixas emissões de carbono na produção de eletricidade proveniente de resíduos são regulados por lei, mas ainda não são aplicadas	A introdução a incentivos económicos é mais provável dentro de um ano	Não existem incentivos económicos
12	Incineração	Incineração	Incineração	Incineração
	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento	Coprocessamento
	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica	Digestão Anaeróbica
	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro	Captação de gás de aterro
	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação	Pirólise e Gaseificação

### 3.7 Recomendações

Algumas perguntas podem surgir depois de passar por este capítulo e de como utilizar a matriz de decisão. Estas recomendações podem fornecer alguma orientação adicional.

Para quem toma decisões a nível nacional e local:

- Avaliar se a WTE é a melhor solução em termos de hierarquia de resíduos e economia circular: a redução de resíduos através da prevenção deve ter prioridade, seguida da preparação para a reutilização e a reciclagem de resíduos. Avalie o fluxo de resíduos e identifique um potencial adicional de reutilização e reciclagem de frações específicas de resíduos.
- Tomar decisões com base num plano de MSWM: as decisões devem ser tomadas apenas com base num plano integrado de MSWM, baseado na análise de fluxo de material e que respeite o conceito da hierarquia de resíduos. O WTE não é uma solução independente, mas um elemento potencialmente interessante do sistema de tratamento de resíduos.
- Obtenha uma resposta para todos os campos marcados em amarelo na matriz de decisão: mesmo se a avaliação interna com a ajuda da matriz favorecer o WTE, ainda haverá pontos fracos que precisam de mais esclarecimentos por isso pedir ajuda a um consultor ou especialista independente para tirar dúvidas.
- Garantir que os padrões internacionais de emissões são atendidos pelo projeto: Os sistemas de monitorização de emissões devem estar em vigor antes de prosseguir com os projetos (particularmente para incineração, coprocessamento, tecnologias alternativas). Garantir que a aplicação dos padrões de emissões possa ser realizada por autoridades independentes. Isso pode exigir alterações na estrutura legal.
- Estabelecer um sistema de financiamento que permita a operação de cobertura de custos das centrais WTE: Como as centrais WTE precisam de fontes de financiamento adicionais para recuperar os custos totais, mecanismos adicionais

de financiamento devem ser aplicados. Além das receitas diretas das famílias por meio de impostos e tarifas de resíduos, existem três fontes adicionais de renda: subsídios, taxa de serviço ou tarifas de fornecimento de eletricidade.

- Garantir uma cooperação interinstitucional tranquila: em muitos países, a WTE é frequentemente associada a ministérios ou agências do setor de energia. No entanto, o seu interesse não deve ser maximizar a produção de energia a partir de resíduos, mas otimizar a recuperação de energia dessas frações de resíduos que não podem, do ponto de vista técnico ou comercial, ser recicladas. Portanto, é essencial uma estreita cooperação com as autoridades responsáveis pela gestão de resíduos e ou proteção do clima.
- Promover e oferecer capacitação: A escassez de especialistas para planejamento, operação e monitorização de centrais WTE tem um forte impacto sobre a MSWM. Dar aos funcionários municipais do departamento de resíduos a oportunidade de aumentar o seu conhecimento e apoiar iniciativas acadêmicas e científicas que promovam a educação no setor.
- Avaliar oportunidades de recolha de gás de aterro sanitário em aterros existentes: É importante reduzir os impactos climáticos dos aterros. As instalações de recolha de gás de aterro sanitário requerem uma projeção realista das quantidades futuras de produção de gás de aterro, levando em consideração as taxas futuras aumentadas de desvio de resíduos do aterro.
- No caso de experiências limitadas com tratamento térmico de resíduos, comece com o coprocessamento: como o coprocessamento de resíduos em fornos de cimento já é amplamente utilizado em muitos países, essa opção WTE pode ser realizada a curto prazo. As fábricas de cimento estão disponíveis em quase todos os países do mundo e podem ser atualizadas para o uso de CDR com investimentos limitados. Começar com o coprocessamento também ajuda a praticar a cooperação entre os municípios e o setor industrial e a usar uma experiência internacional substancial em coprocessamento. Os possíveis fatores limitantes são as baixas taxas de entrada para a deposição dos resíduos, a distância entre o local onde os resíduos são gerados e o local da fábrica de cimento e os preços baixos dos combustíveis fósseis.
- Promover a segregação de resíduos na fonte e centrais de digestão anaeróbica descentralizada para biomassa recolhida separadamente: Não começar em grande escala. Dar ao município e aos cidadãos a oportunidade de ganhar experiência com a segregação de resíduos e o planejamento e operação de centrais de biogás.
- Aumentar a cooperação com o setor privado: os municípios não serão capazes de enfrentar sozinhos os desafios do MSWM do futuro. Portanto, as autoridades locais precisam criar um ambiente de confiança e condições legais e financeiras confiáveis para que o setor de resíduos que se torne atraente para investidores e operadores privados.

Para empresas nacionais e internacionais:

- Desenvolver técnicas de incineração que atendam às condições locais: As instalações de incineração instaladas nos países industrializados são muito caras para a maioria das cidades dos países em desenvolvimento. Existe uma necessidade global de desenvolver novas e apropriadas tecnologias que respondam à composição de resíduos nas cidades dos países em desenvolvimento, para que os custos de investimento e operação possam ser financiados.
- Evite a criação de uma má reputação para o setor: O sucesso a médio e longo prazo da WTE depende da reputação adquirida pelas centrais bem operadas. Associações industriais e empresas individuais devem minimizar o risco das centrais WTE se tornarem um caro 'elefante branco'.

## 4. *Waste-to-Energy* (WTE) ao Nível Europeu e Mundial

O mercado global de WTE foi avaliado em 21,41 bilhões de Euros em 2013, um crescimento de 5,5% em relação ao ano anterior [59]. Este mercado deve manter o seu crescimento constante até 2023, quando se estima que valerá cerca de 34 bilhões de Euros, a uma taxa composta de crescimento anual de mais de 5,5% de 2016 a 2023 [59]. As tecnologias WTE baseadas na conversão de energia térmica, produção de calor, eletricidade e combustíveis alternativos, lideram o mercado e representaram 88,2% da receita total do mercado em 2013 [60], o restante é referente à produção de compostos e subprodutos.

A Europa é o maior e mais sofisticado mercado de tecnologias WTE, respondendo por 47,6% da receita total do mercado em 2013. O aumento dos resíduos industriais, juntamente com a rigorosa legislação de resíduos em toda a UE têm sido os principais impulsionadores do mercado europeu. Suíça, Alemanha, Suécia, Áustria e Holanda lideram a capacidade de instalação na Europa. O mercado da Ásia-Pacífico é dominado pelo Japão, que usa até 60% de seus resíduos sólidos para incineração. No entanto, o crescimento mais rápido do mercado foi testemunhado na China, que mais que dobrou sua capacidade WTE no período 2011-2015 [61].

Por outro lado, o crescimento do mercado nas economias em desenvolvimento da África Subsaariana foi amplamente inibido pelos grandes custos iniciais para WTE, bem como uma falta geral de consciência dos benefícios da implementação WTE. O aterro de baixo custo continua a ser a opção preferida para o processamento de resíduos nessas partes do mundo.

À medida que a sociedade moderna caminha em direção a um nível crescente de urbanização, e com uma população crescente que exige maior consumo de bens e maiores necessidades de energia, o tema da gestão de resíduos e recuperação de energia de resíduos torna-se central para futuros cenários de desenvolvimento sustentável.

Quando se trata da geração de resíduos como produto da sociedade (com destaque para os RSU), devem ser consideradas as características específicas de cada região, país e até mesmo cidade ou conurbação do mundo. Essas características incluem:

- Crescimento populacional;
- Taxa de urbanização;
- Produto interno bruto (PIB) e outros parâmetros de desenvolvimento econômico;
- Hábitos públicos, ou seja, diferentes taxas de consumo de diferentes bens;
- Clima local.

Um estudo recente realizado pelo Banco Mundial [62] mostra os níveis de produção de resíduos per capita, para diferentes regiões do mundo. Como pode ser visto na Tabela 12, regiões onde os padrões de vida são mais elevados e há maior consumo de bens (como os países da OCDE) produzem maiores quantidades de resíduos em per capita kg/dia, enquanto os países subdesenvolvidos como os da Região do Sul da Ásia apresentam menores níveis de produção de resíduos per capita. Além disso, dentro de cada região, pode haver grandes variações na produção de resíduos, dependendo das condições locais e dinâmicas específicas.

**Tabela 12 - Dados de Produção de Resíduos em 2012, por região [62]**

Região	População Urbana Total (Milhões)	Produção Total de RSU (t/dia)	Produção de RSU per capita (kg/dia)
África	261	169 120	0.65
Leste Asiático e Pacífico	777	738 959	0.95
Ásia Oriental e Central	227	254 389	1.12
América Latina e Caribe	400	437 545	1.09
Médio Oriente e Norte de África	162	173 545	1.07
OCDE	729	1 566 286	2.15
Sul da Ásia	426	192 411	0.45
<b>Total</b>	<b>2 982</b>	<b>3 532 255</b>	<b>1.19</b>

A Figura 23 prova explicitamente que o desenvolvimento econômico tem um impacto significativo sobre os níveis de resíduos gerados num determinado território. Mostra uma forte correlação entre a produção de resíduos per capita e a renda nacional bruta per capita (com base na paridade do poder de compra).



**Figura 23 - Relação de produção de resíduos per capita (kg/dia) à renda nacional bruta (RNB) em 2014 nos Países selecionados [59]**

Como resultado dessas taxas de produção de resíduos, e levando em consideração as projeções para o crescimento populacional e o aumento da urbanização, o Banco Mundial estima que a produção global de resíduos quase dobrará em 2025 para mais de 6 milhões de toneladas de resíduos por dia. A partir desses resultados, os países da OCDE até hoje produzem aproximadamente metade dos resíduos urbanos do mundo. No entanto, estima-se que em 2025 a influência desses países na produção global de resíduos será fortemente reduzida. Isso se deve aos esforços em termos de redução de resíduos e gestão de resíduos nos países da OCDE, e um aumento significativo na produção de resíduos per capita e produção geral de resíduos para países em regiões em desenvolvimento no mundo (por exemplo, na região do Leste Asiático e Pacífico) [62].

Nos países menos desenvolvidas do mundo, o acesso à energia continua a ser um grande desafio. Em 2013, 1,2 bilhão de pessoas ainda não tinham acesso à eletricidade para iluminação. Estima-se que mais de 95% das pessoas que não podem utilizar serviços de energia vivem nos Países menos desenvolvidos na África Subsaariana e na Ásia [63]. Muitos habitantes vivem em aldeias remotas e pequenas cidades que muitas vezes não estão conectados a uma rede elétrica. O investimento num sistema de transmissão de energia para cobrir as grandes distâncias entre os centros de produção de energia e os utilizadores finais provou ser muito caro para economias em desenvolvimento.

As tecnologias WTE ganham então força como um recurso de energia confiável em áreas rurais remotas e em países menos desenvolvidos, onde o sistema de energia não é suficientemente desenvolvido. Os investimentos necessários para construir e operar corretamente uma instalação WTE são significativamente menores do que aqueles necessários para implementar uma grande infraestrutura de transmissão de energia para conectar essas áreas a uma rede principal. Além disso, o combustível e a fonte de

energia primária para esses tipos de tecnologias muitas vezes já estão presentes no território local, portanto, os custos de transporte de combustível podem ser evitados. Este é o caso em áreas remotas que estão perto de uma fonte confiável de bioresíduos. A silvicultura, a agricultura e outros processos que produzem bioresíduos podem ser a fonte de energia para as comunidades locais situadas nas proximidades dessas atividades.

Dependendo das necessidades das comunidades locais em áreas rurais e descentralizadas, a forma de energia necessária pode variar. A produção de biocombustíveis, que é uma solução privilegiada em países em desenvolvimento específicos, muitas vezes não é importante nessas áreas onde o transporte motorizado é frequentemente limitado. Um exemplo interessante poderia ser o uso de instalações de digestão anaeróbia, que são capazes de tratar fluxos de resíduos com altas frações orgânicas e produzir biogás com conteúdo de energia relativamente alto, sendo o biogás usado localmente para cozinhar e / ou aquecimento. Esses tipos de WTE podem ser implementados como centrais de grande escala, que apresentam alto custo de capital, mas podem tratar grandes quantidades de resíduos, ou como centrais de pequena escala, que podem ser uma opção mais viável para pequenas comunidades em áreas rurais[59].

#### **4.1 Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos**

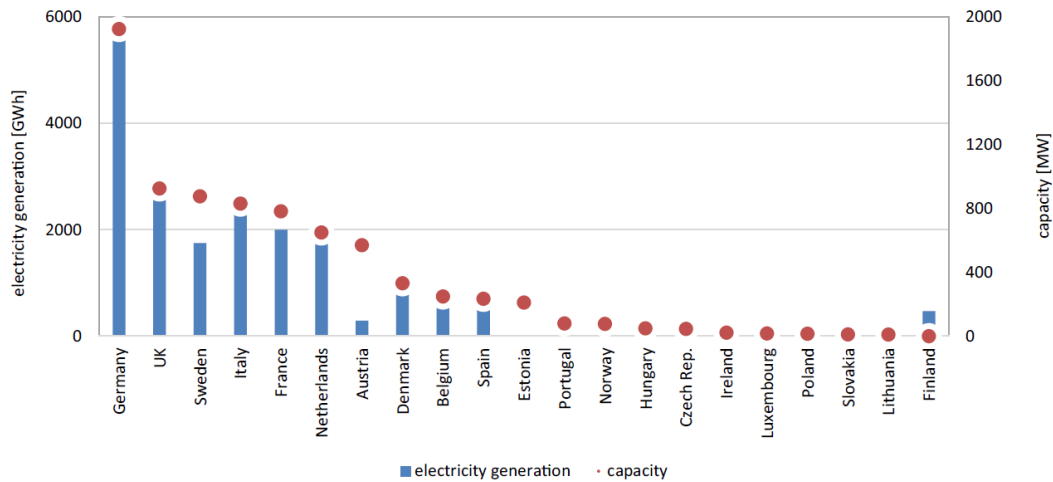
A recuperação de energia a partir de resíduos começou há muito tempo, com o primeiro incinerador de resíduos a ser construído em 1885 nos Estados Unidos. Em 2016, o número de instalações WTE para RSU atingiu 1.618 Centrais em todo o mundo, incluindo 512 Centrais na Europa, 822 Centrais no Japão, 88 nos Estados Unidos e 166 na China [64].

De todas as tecnologias WTE a incineração é a mais atrativa, porque gere diretamente o problema dos resíduos, produzindo energia e gerando um mínimo de GEE. São analisados no contexto da incineração a União Europeia como um caso de referência Mundial, a China que apresentou o crescimento de mercado mais rápido, quase dobrou a sua capacidade WTE no período de 2011 a 2015 [59]. E a Etiópia de forma a perceber como é que a Incineração surge nos países em desenvolvimento, visto que é uma tecnologia que necessita de um grande investimento financeiro que não está ao alcance deste tipo de Países.

##### **4.1.1 Contexto na União Europeia**

A recuperação de energia de RSU é direcionada na UE principalmente para a produção de eletricidade, em centrais combinadas de calor e energia (CHP) ou apenas eletricidade. Nesse contexto, as centrais de calor representam apenas 13% da capacidade de produção de energia a partir de resíduos. A produção de eletricidade e a capacidade de eletricidade das centrais de resíduos em 2015 mostraram diferenças significativas entre os Estados-Membros da UE (Figura 23). A Alemanha foi o país líder em termos de capacidade elétrica em centrais WTE, com 1925 MW, seguida pelo Reino Unido com 925

MW, Suécia com 876 MW e Itália com 830 MW. A produção de eletricidade a partir de resíduos foi a maior na Alemanha com 5768 GWh, seguida do Reino Unido com 2782 GWh, Itália com 2344 GWh, França com 1999 GWh e Holanda com 1997 GWh [64].



**Figura 24 - Capacidade Instalada e Produção de Eletricidade através Resíduos [64]**

A Alemanha e a França têm as maiores capacidades de incineração de RSU, com 24 milhões de toneladas e 16 milhões de toneladas, respetivamente. Vários países, como Suécia, Holanda, Dinamarca, Noruega e Áustria, têm uma grande capacidade de incineração em comparação com a quantidade que geram de RSU. Em países com uma grande capacidade de incineração em comparação com os RSU gerados, existe um grande risco de a incineração ultrapassar a reciclagem na hierarquia de gestão de resíduos o que deve ser muito bem gerido. Os países com uma parcela muito maior de capacidades de incineração, usam resíduos não municipais (por exemplo, combustível derivado de resíduos, resíduos de embalagens, resíduos de madeira, etc.) ou RSU importados como combustível.

Foi feito um levantamento das centrais de incineração existentes na Europa para identificar a capacidade, o tipo de central e a sua localização [64]. Os resultados desta análise mostram que havia 512 centrais de incineração na Europa em 2016, com 251 centrais produzindo CHP, 161 a produzir apenas eletricidade e 94 a gerar apenas calor. Não há informações precisas sobre o tipo de central das 6 restantes. A capacidade total de incineração foi estimada em 93 milhões de toneladas em 2016 [64].

Embora a Alemanha tenha uma capacidade de incineração de resíduos maior do que a França em 98 Centrais, a França possui um maior número de Centrais (121). Enquanto a capacidade média europeia de incineração de resíduos é de cerca de 170.000 toneladas de resíduos por ano, em alguns países (como Holanda, Portugal, Hungria, Espanha ou Áustria) centrais grandes (acima de 400.000 toneladas por ano) são comuns, enquanto em outros países (Noruega, Dinamarca, Suíça, França) centrais menores (80.000-120.000 toneladas por ano) são mais comuns. Atualmente, não existem instalações de incineração em vários países, como a Bulgária, Chipre, Estónia, Grécia, Croácia, Letónia, Liechtenstein, Lituânia, Malta, Roménia e Eslovénia.

O uso de RSU para produção de energia pode desempenhar um papel importante na transição para uma economia circular, desde que os processos de prevenção, reutilização e reciclagem sejam prioridades nos sistemas de gestão de resíduos. Além disso, a competição entre a incineração e a reciclagem de resíduos deve ser tratada de forma adequada e o risco de desvio de resíduos para a incineração em vez de reciclagem e recuperação deve ser gerido com cautela.

#### **4.1.2 Contexto na China**

Os resíduos são um assunto em crescente preocupação na China, como é o caso em muitas economias emergentes. O país gera cerca de 300 milhões de toneladas de RSU anualmente e espera-se que esse número exceda o meio bilhão de toneladas por ano até 2025[65]. Além disso, a simples deposição de resíduos em aterro está a levar a uma poluição secundária, seja por vazamentos de metano ou pela contaminação de águas subterrâneas.

Desde o início deste século, a China tem feito um esforço concentrado para utilizar a WTE como parte da sua estratégia de gestão de resíduos. Os RSU têm uma alta proporção de resíduos alimentares, resultando num alto teor de humidade e um poder calorífico relativamente baixo (3000 a 5000 kJ/kg em média, em comparação com os 8000 a 11000 kJ/kg na Europa)[59]. Os resíduos também apresentam variações sazonais, o que lhes confere propriedades de aquecimento complicadas.

A tecnologia de incineração de resíduos foi introduzida na China no final da década de 1980 e o número de centrais de incineração aumentou significativamente desde então. Entre 2013 e 2014, a capacidade total de WTE atingiu 46 milhões de toneladas por ano [66] e a produção de energia 18,7 bilhões de kWh.

A tecnologia de incineração originada na Europa não é adequada para tratar resíduos com as propriedades mencionadas. Portanto, pesquisas na China desenvolveram novas centrais de incineração baseadas na tecnologia de leito fluidizado circulante (LFC) para recuperar energia dos seus resíduos. A tecnologia LFC é comprovadamente mais adequada para resíduos com alto teor de humidade, tornando-a potencialmente atraente para a implementação noutras economias emergentes. Os níveis de dioxina relatados por estas novas centrais, são mais baixos do que os padrões da UE. As centrais também são capazes de processar lodo de esgoto e outros lodos de resíduos, dos quais a China produz 40 milhões de toneladas por ano, uma vez que os resíduos são pré-secos. Existe uma pesquisa em andamento que tem como objetivo reduzir a quantidade de cinza de lodo de esgoto produzida a partir da incineração e integrar a cinza pré-seca com os RSU, para produzir mais combustível para a central.

Existem atualmente 28 centrais de incineração LFC em operação na China, a maior das quais foi construída em 2012 e processa 800 toneladas de resíduos por dia [59].

### **4.1.3 Contexto na Etiópia**

A central de incineração WTE de 50 MW em construção em Addis Abeba é apresentada não apenas como uma solução muito necessária para o crescente problema de resíduos da cidade, mas também como a primeira de muitas a ser desenvolvida no país. O projeto de 102 milhões de Euros entrou em operação no início de 2017 e irá processar 350.000 toneladas de resíduos por ano. A estação de energia será a primeira central de carga de base da Etiópia, fornecendo eletricidade 24 horas por dia durante pelo menos 330 dias ao ano, e também será a primeira instalação WTE na África Subsaariana [67]. O Governo da Etiópia identificou o WTE como uma parte importante de sua estratégia para reduzir as emissões do país, e estudos de viabilidade sobre a adoção do WTE foram realizados noutras cidades, em Dire Dawa, Adama e Mekelle.

No entanto, o desenvolvimento do projeto e a operação bem-sucedida enfrentam uma série de desafios. A análise mostra que o baixo poder calorífico do fluxo de resíduos de entrada reduzirá a produção de energia da central em até 44% [59]. Também há falta de conhecimento técnico local necessário para operar a central. Embora a central seja parcialmente financiada pelo Banco Mundial, os baixos preços da energia e a ausência de fontes de renda suplementares e incentivos (por exemplo, taxas de depósito e créditos de carbono) significam que a central terá dificuldade para recuperar os seus custos ao longo da sua vida operacional.

O sistema de gestão de resíduos em Adis Abeba também está subdesenvolvido. Alimentos e resíduos de papel raramente são separados na origem. A grande maioria dos RSU gerados em Addis Abeba é recolhido informalmente. Existem empresas privadas que coletam resíduos na cidade por uma taxa de cerca de 10 ETB (0,40 €) por mês, mas são poucos os cidadãos que conseguem pagar esta mensalidade. Estas questões contribuem para tornar a incineração WTE particularmente inviável na cidade.

A esperança é que a operação da central leve ao desenvolvimento de um sistema de gestão de resíduos viável em Addis Abeba. A Ethiopian Electric Power Corporation (EEPCo), que administra a central, está a colaborar com a administração da cidade para garantir que a recolha de resíduos para a central seja agilizada. Embora a fábrica empregue 100 pessoas qualificadas, estima-se que milhares de empregos serão gerados com o novo sistema de recolha de lixo criado pela administração da cidade em conjunto com a EEPCo. Seria de interesse monitorar o desenvolvimento do projeto e a operação da central, especialmente nos primeiros 5 anos, para avaliar o sucesso do projeto [59].

## **4.2 Coprocessamento**

O Coprocessamento é o uso de materiais derivados de resíduos para substituir recursos minerais naturais e ou combustíveis fósseis tradicionais, quer como matéria-prima alternativa quer como combustível alternativo. O coprocessamento é aplicado mundialmente principalmente na indústria do cimento.

De acordo com dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC)[68], o Brasil é o quinto maior produtor de cimento do mundo, com uma produção de 57 milhões de toneladas em 2016 [68]. A atividade tem grande relevância na economia do Brasil.

No Brasil em 2016 estavam registados 100 empreendimentos de fabrico de cimento e moagem, controlados por 24 grupos industriais, sendo a região sudeste responsável por praticamente metade da produção nacional, seguida das regiões nordeste, sul, centro-oeste e norte. A faturação bruta do setor em 2012 foi de 3,5 bilhões de euros, com geração de 27 mil empregos [68].

O estado de Minas Gerais é o maior produtor de cimento do país, com capacidade instalada de 19,4 milhões toneladas de clínquer por ano (equivalente a cerca de 26 milhões toneladas de cimento por ano, considerando uso de 75% de clínquer no cimento), distribuída em doze indústrias, totalizando dezoito fornos rotativos, correspondente a 22,3% da produção nacional.

A capacidade instalada dos fornos rotativos em Minas Gerais varia de 1.266 t de clínquer/dia a 5.000 t de clínquer/dia, sendo a média igual a 2.951 t de clínquer /dia. Das doze unidades existentes, sete possuem apenas um forno.

#### **4.2.1 Contexto no Brasil**

Com o crescimento da população mundial aliado à industrialização, é crescente a quantidade de resíduos industriais produzidos no planeta, sendo que o seu destino final ainda apresenta dificuldades a serem atenuadas. A indústria do cimento surge neste contexto como uma alternativa para um correto destino dos resíduos, por meio da técnica do coprocessamento, que utiliza resíduos como substitutos de matérias-primas e combustíveis nos seus fornos de clínquer. Estes resíduos podem ser alimentados nos fornos separadamente, ou em forma de *blends*, que são misturas de vários resíduos, homogêneos em unidades específicas para esse fim. O estado de Minas Gerais tem um grande potencial para adoção da prática do coprocessamento, por ser o maior produtor de cimento do Brasil, possuindo, atualmente, doze indústrias em operação, totalizando dezoito fornos rotativos, que, juntos, são responsáveis por cerca de 20% da capacidade de coprocessamento instalado do país. Dados do World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) [69] indicam que para produzir uma tonelada de cimento, é necessário o equivalente a 60 a 130 kg de combustível e 110 kWh de energia elétrica, sendo que 40% dessa energia elétrica é usada nas operações de moagem [70]. Esse perfil de consumo justifica a preocupação do segmento cimenteiro com a procura por insumos energéticos alternativos, dado o peso da energia no custo final do produto [71]. Apesar do principal objetivo do setor ser o aproveitamento de resíduos nos fornos de clínquer em substituição dos combustíveis convencionais, o uso de resíduos como matérias-primas também é amplamente aplicado.

Uma vez que a atividade de coprocessamento está a crescer no mundo e no Brasil, o número de fábricas de cimento que adotam a prática do coprocessamento acompanha essa tendência. Em 2014, das 60 centrais existentes no país que possuíam fornos

rotativos para a produção de clínquer, 37 estavam licenciadas para o coprocessamento de resíduos, representando 62% do parque industrial brasileiro de produção de cimento [72].

Em Minas Gerais, das doze fábricas de cimento, dez possuem licença de operação para coprocessamento de resíduos e uma possui licença de instalação. Já dos dezoito fornos rotativos existentes, treze estão licenciados para realizar o coprocessamento.

Na figura 25 estão representados os resíduos coprocessados no Brasil e o peso percentual que cada um deles representa.



**Figura 25 - Resíduos Coprocessados no Brasil [73]**

As utilizações de combustíveis tradicionais correspondem de 20% a 40% das despesas de uma fábrica de cimento [74]. A substituição de combustíveis tradicionais por alternativos reduz os custos significativamente. Como exemplo, uma central na Europa, com produção anual de 1 milhão de toneladas e com taxa de substituição de 30% de combustíveis alternativos poderia economizar cerca de 2,4 milhões de euros por ano [74].

O consumo de combustíveis alternativos em fornos de clínquer varia muito entre países, sendo que a média mundial é de cerca de 13% [75]. Em 2014, a substituição térmica decorrente do uso de combustíveis alternativos no Brasil foi de 8,1% [72], valor muito inferior comparado a outros países, como exemplo da Holanda (83%) e Alemanha (53%) e a média na Europa, de aproximadamente 39% [29].

Ressalva-se que apesar dos fornos de clínquer serem tecnicamente capazes de utilizar até 100% de combustíveis alternativos, existem limitações práticas e legais.

Apesar do baixo percentual em relação aos combustíveis e matérias-primas convencionais, a utilização de combustíveis e matérias-primas alternativos na indústria

cimenteira no Brasil, aumentou 374% entre o ano 2000 e 2014, sendo que atualmente mais de 1 milhão de toneladas de resíduos são coprocessadas por ano [72].

Os resíduos utilizados nas indústrias cimenteiras como substitutos de matérias primas, representam 20% e aqueles com potencial energético correspondem a 80%. O resíduo mais utilizado nos fornos de clínquer é o pneu inservível [72].

O alto poder calorífico do pneu usado, similar ao do coque, faz dele um efetivo combustível alternativo. Os pneus usados requerem 1,2 kg a menos de material quando comparados ao carvão mineral para a produção de energia[76].

No caso dos RSU, para serem utilizados no coprocessamento em fornos de clínquer, não podem estar no seu estado bruto. Primeiramente, devem passar por um processo de caracterização física simplificado, onde são analisados a composição gravimétrica, o peso específico médio e o teor de umidade. Em seguida ocorrem os processos de triagem e compostagem para pré-tratamento e homogeneização das parcelas presentes no resíduo. Este processo pode ser manual ou mecânico, sendo o mecânico denominado Tratamento Mecânico e Biológico (TMB). Os RSU também podem passar pelo Processo de Estabilização Seca.

Ambos os métodos de tratamento resultam num material denominado Combustível Derivado de Resíduo (CDR), que possui poder calorífico superior ao RSU. Além disso, o CDR tem outras vantagens, pois é mais uniforme nos aspectos físicos e químicos que o RSU, sendo mais fácil de armazenar, manusear e transportar.

No Brasil, a prática de utilização de RSU como matéria-prima no coprocessamento é adotada somente no município de Cantagalo no Rio de Janeiro, na unidade da Lafarge Cimento. Todos os resíduos sólidos urbanos do município são direcionados para uma central de triagem, sendo parte dos resíduos destinados para reciclagem, compostagem, coprocessamento e aterro [77].

### **4.3 Digestão Anaeróbia**

A DA é uma tecnologia promissora com vários benefícios para uma ampla gama de partes interessadas, desde a comunidade local, agricultores e governo. É considerado o método ideal para lidar com resíduos alimentares de uma forma ambientalmente segura. Embora não seja uma tecnologia nova, visto que data de 1800 e experimentou crescimento e desenvolvimento técnico contínuos ao longo dos últimos anos, o mercado é bastante pequeno, com grande espaço para expansão.

De todas as tecnologias WTE a DA é a que está mais facilmente acessível aos países em desenvolvimento, visto que a matéria-prima orgânica está disponível localmente e é economicamente acessível a construção de centrais de pequena escala de baixa tecnologia, já que o investimento necessário é mínimo. Neste contexto os países desenvolvidos apresentam maiores dificuldades à utilização da DA porque o acesso a resíduos orgânicos é difícil devido à má separação na fonte, o que leva a que uma elevada percentagem de resíduos orgânicos seja encaminhada para aterros sanitários ou para outros processos.

### 4.3.1 Contexto nos Países em Desenvolvimento

O processo de digestão anaeróbia é praticado há décadas nos países em desenvolvimento. Existem relatórios que descrevem um digestor anaeróbico inicial em Mumbai, Índia, construído em 1859 para tratamento de esgoto [47]. Desde então, a tecnologia espalhou-se pela Ásia. Diferentes estudos de biogás enfocam famílias rurais com bovinos, onde o estrume animal e as fezes humanas são usados como matéria-prima junto com a adição de pequenas quantidades de resíduos de cozinha. Os motores de desenvolvimento para a introdução de tais sistemas de abastecimento de biogás às pessoas são a redução do consumo de lenha e o respetivo desmatamento, a diminuição da poluição do ar interior e a melhoria da fertilidade do solo [47].

Após cerca de 25 anos de melhorias graduais e experiência prática, a tecnologia atrai interesse como uma contribuição para a produção de energia renovável e criação de independência dos combustíveis fósseis. O Ministério da Agricultura da China adicionou cerca de 22 milhões de sistemas de biogás entre 2006 e 2010 para atingir um total de cerca de 40 milhões de sistemas instalados no início de 2011. A Índia possui aproximadamente 4 milhões de sistemas, e o Vietnã instalou 20.000 sistemas anualmente para chegar a mais de 100.000 em 2010. Camboja, Laos e Indonésia têm programas de biogás menores, mas instalaram cerca de 1.000 sistemas em cada país em 2010. O Programa de Apoio ao Biogás do Nepal, que envolve o setor privado, organizações, grupos comunitários e ONGs, resultou num aumento constante nos sistemas de biogás instalados durante a última década. Aproximadamente 25.000 sistemas foram construídos em 2010, elevando o total nacional para quase 225.000 [78].

Na África, onde a digestão anaeróbia é menos prevalente, com base na experiência asiática, foi lançado em 2007 um programa de apoio ao biogás, a iniciativa africana “Biogas for Better Life” visa instalar dois milhões de centrais de biogás em residências rurais até 2020. Na América Latina, além de pequenas centrais de biogás para residências rurais, inúmeros projetos de resíduos agrícolas foram implementados e no ambiente urbano o biogás está a ser extraído de vários aterros (captação de gás de aterro).

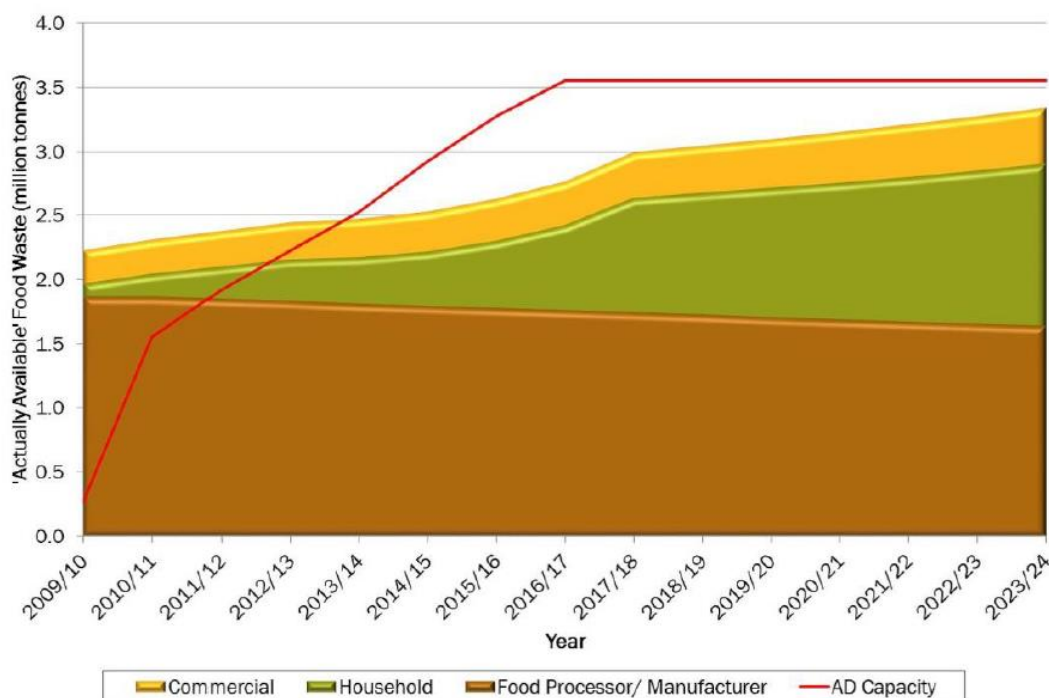
A escolha de um projeto básico de DA é influenciada pela adequação técnica, custo-benefício e disponibilidade de habilidades e materiais locais. Nos países em desenvolvimento, a seleção do projeto é amplamente determinada pelo projeto prevalecente e comprovado na região, que por sua vez depende das condições climáticas, econômicas e específicas do substrato [79].

Um sistema de DA deve ser compatível com o contexto local existente para garantir uma operação sustentável a longo prazo. Portanto, é essencial considerar todos os fatores de influência e maneiras pelas quais uma instalação do DA pode ser mantida localmente.

Os custos de uma central de DA variam amplamente dependendo do país, da tecnologia usada e de outros fatores, como fontes de financiamento, cadeia de suprimentos e situação da demanda do mercado.

### 4.3.2 Contexto nos Países Desenvolvidos

No Reino Unido, por exemplo, a maior desvantagem para o desenvolvimento da DA é a falta de acesso à matéria-prima. Isso não é dado pela falta de resíduos orgânicos em geral, mas pela incapacidade de aceder prontamente a esses fluxos de resíduos, uma grande proporção deles permanecendo nos fluxos de resíduos residuais. Foi observado que a capacidade de DA excede o desperdício alimentar "realmente disponível". Em 2014, havia 2,8 milhões de toneladas de capacidade de DA no Reino Unido destinadas a tratar resíduos orgânicos de processamento e fabricação de alimentos, residências e empresas comerciais. A capacidade aumentou para 3,5 milhões de toneladas em 2016/2017 e assim se prevê que se mantenha até 2023/2024. A Figura 26 abaixo mostra que já existe um excesso de capacidade de DA no mercado, e não há matéria-prima disponível para suportar prontamente as novas instalações. É necessária uma regulamentação adequada para incentivar a separação mais eficaz dos resíduos na origem e evitar a eliminação de resíduos orgânicos em aterros para aumentar a matéria-prima disponível, o que permitirá uma melhor utilização da capacidade de DA existente.



**Figura 26 - Capacidade de DA vs Resíduos de Alimentos "Realmente Disponíveis" no Reino Unido [59]**

### 4.4 Captação de Gás de Aterro

Os EUA são o maior produtor de RSU do mundo, em concordância com isso depositam cerca de metade dos resíduos produzidos em aterros sanitários, média muito superior em comparação com outros países industrializados como é caso da UE que tem uma média de 31% [80] de deposição em aterro para o ano de 2013. Daí a importância de

contextualizar a captação de gás dos aterros sanitários como forma de mitigar as consequências negativas da deposição em aterro nos EUA. A Austrália é também analisada neste contexto por surgir como um dos maiores produtores de RSU per capita do mundo.

#### **4.4.1 Contexto nos EUA**

Os Estados Unidos da América (EUA) com uma população de 316,5 milhões em 2013 gerou mais de 254,1 milhões de toneladas de RSU no mesmo ano, o que foi mais do dobro do valor gerado no ano de 1960 [81]. A produção de RSU per capita aumentou em dois terços durante o mesmo período. Na verdade, a produção, reciclagem, compostagem e deposição de RSU nos EUA mudaram substancialmente nas últimas décadas. Mais especificamente, a deposição de resíduos em aterros sanitários diminuiu de 93% (do total de RSU gerado) em 1960 para menos de 53% em 2013. Enquanto isso, a taxa de reciclagem de RSU aumentou de 5,6 milhões de toneladas em 1960 (menos de 10% de RSU gerado) para 87,6 milhões de toneladas (mais de 34% do RSU gerado) em 2013, dos quais 64,7 milhões de toneladas foram recuperados por meio de reciclagem e mais de 22 milhões de toneladas foram recuperados por compostagem. Portanto, 134,3 milhões de toneladas de RSU gerados em 2013 (ou seja, 52,8% do valor total) ainda foram depositados em aterros [81].

Com base nas estimativas apresentadas pela Agência de Proteção Ambiental (EPA), aproximadamente 560 aterros com recuperação de energia de gás de aterro sanitário (LFG) estavam operacionais nos EUA em julho de 2011. Esses projetos geraram aproximadamente 1.730 MW de eletricidade por ano e entregou 8,8 milhões de metros cúbicos por dia de LFG para aplicações de uso direto, enquanto 510 aterros sanitários adicionais foram identificados como oportunidades atraentes para o desenvolvimento de projetos futuros [82]. Todas estas estatísticas e projetos mostram que os Estados Unidos alcançaram um progresso notável na monitorização e gestão de resíduos ao ir de encontro com as metas de gestão de materiais sustentáveis para reduzir os encargos ambientais causados pelos RSU.

#### **4.4.2 Contexto na Austrália**

Os australianos geraram cerca de 15 milhões de toneladas de RSU no ano de 2013 com uma população de 23,1 milhões, o que foi mais 45,3% em comparação com os RSU gerado em 1980 [49]. No entanto, a produção de RSU per capita diminuiu 7,6% no mesmo período. No entanto, 1,77 kg de RSU por pessoa ainda é considerado alto, marcando a Austrália como um dos principais produtores de RSU per capita do mundo.

Os progressos alcançados no tratamento de RSU durante os anos de 1980 a 2013 fizeram com que os australianos passassem a uma gestão sustentável de RSU nos últimos anos, embora a um ritmo mais lento em comparação com os EUA e a UE [83][84]. Mais especificamente, a deposição dos RSU gerados nos aterros sanitários australianos diminuiu de 88% (do total de RSU gerado) em 1980 para 48,1% em 2013. Enquanto isso, a taxa de reciclagem / compostagem de RSU aumentou de 1,2 milhão de toneladas em

1980 (12% do RSU gerado) para 6,54 milhões de toneladas (mais de 43% do RSU gerado) em 2013. Além disso, a recuperação de energia apresentou o menor nível de aumento no período de referência, apenas 8,2%. Entre os aproximadamente 458 aterros operacionais na Austrália, 65 aterros constam com recuperação de energia de LFG (variando em tamanho de 400 kW a 13 MW) e 250 aterros com captura e queima de gás estão operacionais [85]. Portanto, a recuperação de energia do LFG é um recurso de energia promissor para uma vasta proporção de operadores de aterros sanitários. No geral, as conquistas obtidas na implementação de leis e regulamentos ambientais na Austrália, tais como, política nacional de resíduos, *ACT No Waste Strategy*, o esquema de redução de gases de efeito estufa de NSW (GGAS), o sistema nacional de relatórios de efeito estufa e energia (Lei de 2007) e a legislação federal de metas de energia renovável obrigatória levou a um progresso impressionante na recuperação de recursos na última década [49].

#### **4.5 Tecnologias Alternativas: Pirólise e Gaseificação**

Como já foi referido anteriormente, não foram encontrados registos da existência de centrais de produção de pirólise e gaseificação em grande escala para tratamento de RSU. Estas técnicas estão associadas a grandes centrais, mas fazendo parte do processo, podendo se dizer que funcionam como pequenas centrais integradas num processo de grande escala. Estas tecnologias estão associadas ao tratamento de fluxos de resíduos específicos. Os requisitos avançados de tecnologia, operação e os altos custos de investimento inicial, dificultam a aplicação destas tecnologias em grande escala.

##### **4.5.1 Contexto Mundial**

Além da tecnologia de incineração, a pirólise e a gaseificação são também outros dos principais processos de conversão termoquímica disponíveis e que podem ser combinados com outros tratamentos, como por exemplo, fusão, plasma, destilação, etc. [86], [87]. Embora estas tecnologias estejam bem estabelecidas nas indústrias petroquímica e de energia, bem como na produção de combustível, como coque e gás de cidade, há muitos anos que o número de centrais de gaseificação ou pirólise de RSU em grande escala é muito limitado. Portanto, esforços de pesquisa estão a ser realizados, de forma a adotar ainda mais essas tecnologias com tratamento de RSU grande escala.

WANG et al. [88] investigaram a implementação de cinco centrais de pirólise para o aproveitamento de resíduos sólidos urbanos no estado da Carolina do Norte, Estados Unidos da América. Para verificar o balanço energético do processo, os autores informam que se torna importante determinar o rendimento do bio-óleo obtido na central pirolítica e da produção de diesel através do melhoramento do líquido. De acordo com os dados apresentados, a energia obtida no processo é de 0,0035 kg diesel/kg RSU e a taxa de conversão de resíduos sólidos em bio-óleo é de 50%. Segundo a investigação, durante o melhoramento do bio-óleo, são formados também hidrogênio e carvão, com um poder calorífico de 5,5 e 2,7 MJ/kg RSU, respetivamente.

Estudo realizado por CHEN et al. [89] revela que o número de centrais de pirólise está a aumentar na China devido à vantagem de se converter os RSU em energia. Esta tecnologia está a receber maior atenção em muitos povos e cidades da China, porque o gás, petróleo e carvão ainda são necessários em pequenas cidades e vilas onde a escassez de combustíveis comerciais é frequente e também devido à dificuldade de encontrar novos locais para a deposição dos resíduos sólidos. Os autores informam que as frações submetidas ao processo de pirólise são principalmente papel, tecido, plástico e resíduos de quintais. Resíduos de alimentos altamente húmidos devem ser separados antes da degradação térmica, evitando assim, o gasto energético para a vaporização da água presente na biomassa. De acordo com os autores, os reatores de pirólise normalmente instalados são: leito fixo, forno rotativo, leito fluidizado e reatores tubulares. No entanto, apenas fornos rotativos e reatores tubulares são aplicados às instalações de maior escala.

Encontra-se também em estudo no Brasil [90] um projeto de desenvolvimento de uma Unidade de Aproveitamento Energético de Resíduos por meio da Tecnologia de Pirólise em reator de tambor Rotativo. Irá ser realizado em escala piloto no município de Boa Esperança em Minas Gerais. O objetivo principal do projeto é apresentar uma nova solução técnica para o tratamento de RSU, combinada com a capacidade de minigeração de energia.

Embora a pirólise e a gaseificação pareçam atraentes do ponto de vista da eficiência e das emissões ambientais, centrais de RSU em larga escala caracterizadas por alta eficiência de gaseificação e alta recuperação de energia ainda estão para ser estabelecidas em todo o mundo[91],[92]. Na verdade, isso deve-se à inconsistência da composição do RSU, bem como às suas variações no tamanho e no teor de humidade, que podem afetar adversamente esses processos, uma vez que a pirólise e a gaseificação requerem uma preparação muito cuidadosa da matéria-prima. Além disso, a eficiência dos gaseificadores atuais, bem como dos sistemas de limpeza de gases (separação do alcatrão), precisa ser melhorada para fins comerciais [93].

## 5. *Waste-to-Energy* (WTE) em Portugal

Portugal luta para alcançar a desejada sustentabilidade ambiental, pelo que se têm registado progressos nos últimos anos. Em 2006, Magrinho et al. [94] numa revisão feita sobre o destino dos resíduos municipais, concluiu que desde 1998, a recolha seletiva de resíduos foi crescendo como a forma mais comum de deposição, até 2002, quando as centrais WTE se tornaram o meio de deposição mais importante. Em 2009, Ferreira et al. [95] realizaram uma visão geral da produção de bioenergia destacando que, embora naquela época o país fosse a quarta maior parcela da produção de eletricidade renovável na Europa, a produção de bioenergia não estava no nível desejado. Os autores sugeriram que a energia de origem animal tinha alto potencial, mas ainda não estava bem desenvolvida. Em relação à biomassa, foi e ainda é um recurso altamente disponível, possibilitando o uso de diversas tecnologias para a produção de energia. Mais recentemente, Margallo et al. [96] avaliaram a incineração na Península Ibérica, para que o processo global fosse mais bem conhecido e discutido, de forma a compreender a influência de alguns fatores críticos como a composição dos resíduos, a humidade e o valor calorífico de cada fração. O sinal para este comportamento consciente em relação ao meio ambiente e à proteção da saúde pública, bem como ao retorno de materiais e energia foi dado pelo acordo do PERSU I (plano estratégico de gestão de resíduos sólidos urbanos entre 1996 e 2006, estabelecendo grandes objetivos

como acabar com a deposição de resíduos na Natureza, criando centrais de valorização de resíduos e aterros sanitários, entre outros), seguindo-se o PERSU II (proceder à gestão dos resíduos sólidos urbanos entre 2007 e 2016 e retificar possíveis falhas do plano anterior) [94]. Atualmente o plano em vigor é o PERSU 2020, que constitui uma melhoria do PERSU II para o período entre 2014 e 2020 visando metas específicas como reduzir a deposição de resíduos de 63% para 35% dos valores de referência de 1995, aumentando as taxas de reutilização e reciclagem de 24% para 50% e também garantindo níveis de recolha seletiva de 47 kg/habitante/ano [3].

## 5.1 Gestão de Resíduos em Portugal

Em Portugal no ano de 2018 foram produzidos, 5,213 milhões de toneladas de resíduos urbanos (RU) mais 4% do que em 2017, sendo que em Portugal Continental foram produzidas 4.945 mil toneladas de RU. A meta de resíduos produzidos por habitante para o ano de 2020, que são 410 kg/hab.Ano, dificilmente será alcançada uma vez que no período de 2012 para 2018 se observou um acréscimo dos 456 kg/hab.Ano para os 507 kg/hab.Ano [97].

Na tabela 12 apresentam-se as quantidades de RU produzida e a variação verificada face aos anos anteriores.

**Tabela 13 - Quantitativos de RU produzidos (10<sup>3</sup> t) [97]**

Região	2014	2015	2016	2017	2018
<b>Portugal Continental</b>	4 474	4 523	4 640	4 745	4 945
<b>Região Autónoma da Madeira</b>	110	110	119	124	126
<b>Região Autónoma dos Açores</b>	136	132	132	137	142
<b>Total</b>	<b>4 719</b>	<b>4 765</b>	<b>4 891</b>	<b>5 007</b>	<b>5 213</b>
<b>Variação face ao ano anterior</b>	↔ 2%	↔ 1%	↔ 3%	↔ 2%	↔ 4%

O aumento verificado poderá estar relacionado com uma melhoria da situação económica, o que evidencia, no contexto dos RU, a tendência de afastamento do objetivo de dissociar a produção de resíduos do crescimento económico. Por outro lado, constata-se também que a estratégia de prevenção da produção de resíduos não está a ter os resultados esperados.

O aumento das quantidades produzidas de RU em Portugal tem tido como resultado o reforço da implementação de opções de tratamento de valorização de resíduos em detrimento do encaminhamento para aterro sanitário. Na Tabela 13 são apresentadas as tecnologias de tratamentos típicos aplicados a uma massa de resíduos urbanos.

**Tabela 14 - Tecnologias de Tratamentos Típicos Aplicados a uma massa de RU**

<b>Tecnologias de Tratamento Típico de RU</b>	<b>Natureza dos Processos Envolvidos</b>	<b>Operação de Gestão</b>
Compostagem	Deterioração de Resíduos	Valorização Orgânica
Digestão Anaeróbia	Processamento Biomecânico	Valorização Orgânica / Energética
Coprocessamento	Processamento Biomecânico	Valorização Energética
Captação de Gás de Aterro	Processamento Biomecânico	Valorização Energética
Incineração	Processamento Termoquímico	Valorização Energética
Pirólise / Gaseificação	Processamento Termoquímico	Valorização Energética
Reciclagem	Reprocessamento de Materiais	Valorização Material
Aterro Sanitário	Operação de Deposição no Solo	Eliminação

No que respeita ao encaminhamento direto de RU para as principais operações de gestão, em Portugal Continental, verifica-se que o aterro sanitário embora seja o destino menos recomendável, continua a representar 32% do destino final dado aos resíduos urbanos. De ressaltar que este facto representa um avanço estratégico consolidado, sendo a primeira vez que a maioria dos resíduos urbanos (menos de 50%) não foi encaminhada para aterro sanitário foi em 2013 [9]. Por outro lado, esta diminuição do encaminhamento para aterro foi compensada pelo aumento das unidades de tratamento mecânico-biológico, representando, atualmente cerca de 25% e as unidades para o tratamento mecânico cerca de 10% dos destinos finais dados aos RU. No caso da valorização energética representou em 2018 cerca de 20% o que se deve à escala dos sistemas de incineração implementados, em Lisboa (VALORSUL) e no Porto (LIPOR), que permite tratar grandes quantidades de resíduos dos principais centros urbanos. Ao analisar o destino final direto do resíduo por sistema de gestão, verifica-se que na VALORSUL (na área Metropolitana de Lisboa – Norte) e LIPOR (na área metropolitana do Porto), a incineração corresponde a cerca de 60% e 80%, respetivamente. O tratamento por valorização orgânica (Compostagem e Digestão anaeróbica) representa apenas 3% no território nacional e a valorização material (Reciclagem), não obstante da sua importância na gestão de RU, por enquanto representa apenas 10%, num quadro de evolução muito reduzido ao longo dos últimos anos e cuja tendência deve ser invertida.

Desta forma, torna-se visível a importância que deve ser dada a outro tipo de tratamento ou planeamento de resíduos no quadro de políticas de gestão de resíduos urbanos, tendo em vista que a solução de aterro, apesar de necessária, não permite valorizar os resíduos, constituindo, por si, uma solução de eliminação a ter conta em estrita necessidade.

### 5.1.1 Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos (SGRU) e Infraestruturas de Gestão de Resíduos Urbanos

Os serviços de gestão de resíduos urbanos englobam as seguintes fases:

- Recolha
- Transporte
- Triagem
- Valorização/Eliminação

Considera-se que a recolha de resíduos provenientes de habitações constitui uma atividade em baixa, sendo as entidades gestoras do serviço em baixa responsáveis pela recolha indiferenciada e seletiva de resíduos urbanos. As restantes etapas do processo, como a triagem, a reciclagem, a valorização energética ou orgânica e a deposição em aterro, são geridas pelas entidades gestoras do serviço em alta (Figura 27).

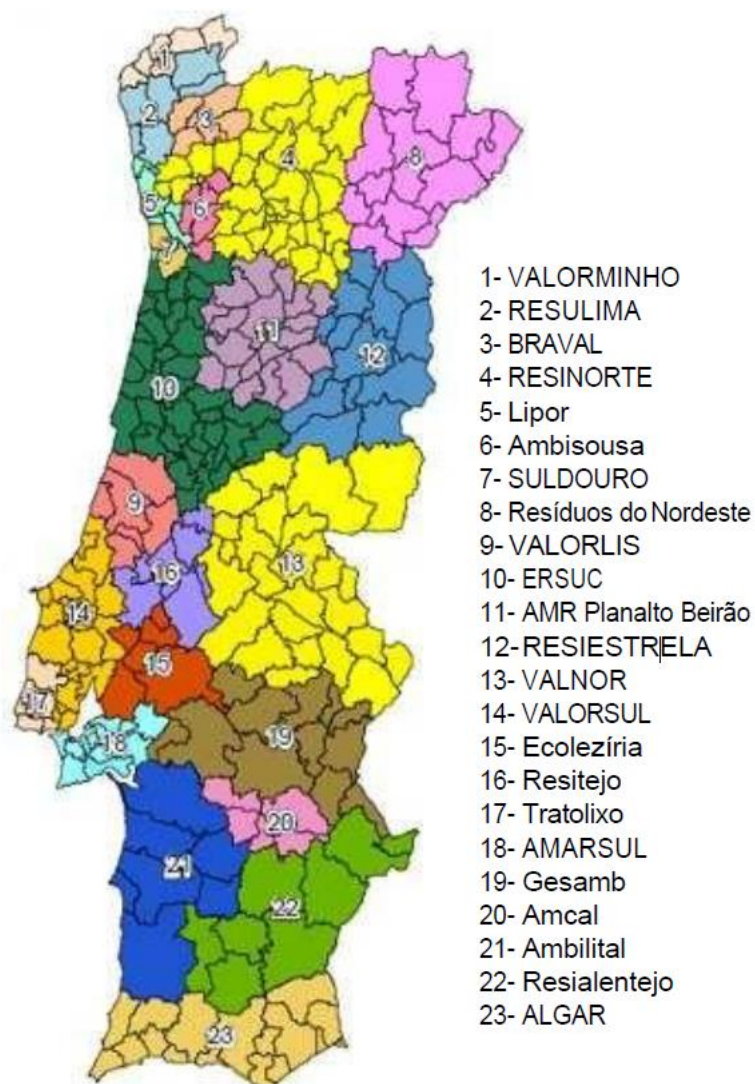


**Figura 27 - Diferenciação das atividades dos Serviços em Baixa e Alta**

Existem 255 entidades gestoras de serviços em baixa e 23 entidades gestoras de serviços em alta segundo a Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR) no relatório anual dos serviços de águas e resíduos em Portugal de 2019 (RASARP 2019) [98]. Destas 23 entidades, 12 são multimunicipais<sup>6</sup> e 11 são intermunicipais<sup>7</sup>. Os 12 SGRU multimunicipais gerem cerca de 66% dos RSU produzidos[97]. Na figura 28 pode encontrar-se a distribuição dos SGRU em Portugal Continental.

<sup>6</sup> São considerados multimunicipais os SGRU de titularidade estatal que sirvam pelo menos dois municípios e exijam a intervenção do Estado em função de razões de interesse nacional.

<sup>7</sup> São considerados SGRU intermunicipais/municipais aqueles aos quais cabe aos municípios, isoladamente ou em conjunto, através de associações de municípios, ou em parceria com o Estado, definir o modo de organização e gestão-conceitos presentes no relatório da ERSAR



**Figura 28 - Mapa da distribuição dos SGRU em Portugal Continental [97]**

Verifica-se uma grande heterogeneidade entre SGRU no que respeita ao número de municípios abrangidos, dispersão geográfica, demografia e condições socioeconómicas, o que se reflete nas opções adotadas em termos de recolha e tratamento dos seus RU, bem como na rede de equipamentos e infraestruturas de gestão de resíduos e fluxos de resíduos. Estas variáveis condicionam os custos associados à gestão de resíduos.

Na tabela 15 estão identificadas as infraestruturas de gestão de RU existentes em Portugal Continental.

**Tabela 15 - Infraestruturas de gestão de RU [97]**

Principais infraestruturas	Existentes
Aterros	32
Tratamento Mecânico	64
Tratamento Mecânico e Biológico	18
Central de Valorização Orgânica (RInd)	16
Central de Valorização Orgânica (RSel)	5
Central de Valorização Energética	2
Estação de triagem	30
Estação de Transferência	90
Ecocentros	197

\*RInd – Resíduos Indiferenciados; RSel – Resíduos Seleccionados

Enquanto as centrais de valorização energética continuam em funcionamento apenas em dois sistemas em Portugal Continental, exploradas pela Valorsul e Lipor, localizando-se estas infraestruturas nos dois grandes centros urbanos do país, respetivamente Lisboa e Porto. Nos arquipélagos existe também uma unidade na Região Autónoma da Madeira, da empresa Águas e Resíduos da Madeira, outra da empresa Teramb, na Ilha Terceira da Região Autónoma dos Açores. Todas as unidades de valorização energética de resíduos em Portugal fazem parte de sistemas integrados de gestão de resíduos urbanos, que incluem também a preparação para reciclagem, a valorização de bioresíduos, o tratamento e valorização de escórias, a gestão de aterros e a educação e sensibilização ambiental das populações servidas.

Existem 23 centrais de valorização orgânica distribuídas por 16 SGRU. As Centrais de Valorização Orgânica apresentam diferentes modos de funcionamento, sendo que, a sua maioria (16) caracterizam-se por terem a montante do tratamento biológico um tratamento mecânico destinado a receber resíduos provenientes da recolha indiferenciada. Apenas duas recebem exclusivamente resíduos de recolha seletiva de RU (Lipor e VALORSUL), para além da ALGAR que explora três infraestruturas que recebem apenas resíduos verdes de recolha seletiva.

Quanto ao tipo de tratamento dos resíduos orgânicos, 10 efetuam apenas compostagem e 12 efetuam digestão anaeróbia seguida de compostagem.

Existem ainda trinta estações de triagem e 197 ecocentros em atividade distribuídos pela área geográfica dos SGRU.

Os esforços dos Sistemas centram-se em incrementar o desvio de resíduos de aterro e o aumento da quantidade de resíduos a enviar para reciclagem, investindo na otimização da eficiência das instalações em funcionamento. A curto prazo, os SGRU ficarão dotados de infraestruturas de tratamento de RU que lhes permitem atingir estes dois objetivos, embora persistam ainda alguns casos em que serão necessários novos investimentos ou, em alternativa, o recurso à utilização de infraestruturas vizinhas.

## 5.2 Unidades de Grande Escala (> 1100 t/dia)

Neste subcapítulo são apresentados os dois grandes sistemas de valorização de RSU em Portugal, Valorsul em Lisboa e Lipor no Porto. São apresentadas e caracterizadas as tecnologias WTE que os constituem e a forma como são geridos os resíduos e os materiais resultantes dos processos.

### 5.2.1 Valorsul

A Valorsul entrou em funcionamento em 1994 e faz parte do SGRU nacional, o seu modelo de negócio consiste em criar valor a partir do tratamento e transformação dos resíduos sólidos urbanos. Abrange 19 municípios da Grande Lisboa e da Região Oeste (Alcobaça, Alenquer, Amadora, Arruda dos Vinhos, Azambuja, Bombarral, Cadaval, Caldas da Rainha, Lisboa, Loures, Lourinhã, Nazaré, Óbidos, Odivelas, Peniche, Rio Maior, Sobral de Monte Agraço, Torres Vedras, Vila Franca de Xira) e gere os resíduos de 1,5 Milhões de habitantes o que é equivalente a dizer que trata cerca de 900 mil toneladas de resíduos urbanos anualmente [99]. A sua área de intervenção corresponde a menos de 4% da área total do país, mas valoriza mais de um quinto de todo o lixo doméstico produzido em Portugal. A valorização dos resíduos é feita em cinco áreas operacionais distintas com o objetivo de garantir a sua Valorização Energética, Orgânica e Material. O modelo de gestão de resíduos da Valorsul é composto pela Central de Valorização Energética, pela Estação de Tratamento e Valorização Orgânica, por 2 Centros de Triagem para os 3 fluxos dos Ecopontos, por 8 Ecocentros para vários materiais recicláveis, por 6 Estações de Transferência para otimização de transporte e recursos e por 2 Aterros Sanitários como apoio ao sistema de gestão de resíduos e com aproveitamento energético do gás de aterro [99]. O total dos rendimentos da venda de energia cifrou-se em 28 Milhões de Euros num volume de negócios de 60 Milhões de Euros da Valorsul, o que corresponde a venda de energia a 47% do volume de negócios da Valorsul. Os rendimentos provenientes do tratamento de RU, incluindo clientes municipais e particulares, totalizaram 17,3 Milhões de Euros e a venda de materiais recicláveis ascendeu aos 13 Milhões de Euros [100]. Na tabela 16 estão representados os valores de resíduos geridos por fração e a energia produzida no ano de 2018.

**Tabela 16 - Elementos Técnicos e de Atividade [100]**

Elementos técnicos e de atividade	2018	Unidade
Municípios Servidos	19	
População Servida	1,6	Milhões de habitantes
RU Municipais Indiferenciados	663.580	t
RU Indiferenciados grandes produtores	32.546	t
RU Recolhidos seletivamente Multi-material	85.532	t
Venda de recicláveis fração embalagem	61.541	t
Venda de recicláveis fração não embalagem	16.136	t
Venda de Energia	309	GW/h

Relativamente ao sistema de gestão integrado, são consideradas quatro fases principais desde a produção dos resíduos até à sua valorização final. A Fase I corresponde à produção de resíduos em residências, empresas ou instituições públicas. Na Fase II os municípios têm a função de disponibilizar os contentores necessários e recipientes diferenciados para cada tipo de resíduo, bem como cuidar da sua recolha e transporte para as instalações da Valorsul, acabando aqui o trabalho sobre a responsabilidades das entidades do serviço em baixa. Na fase III decorrem os processos relativos aos serviços em alta, a valorização energética, orgânica e multimaterial. No final temos a etapa IV que consiste na venda dos produtos valiosos resultantes das etapas anteriores, como a eletricidade, o composto e os fertilizantes.

### 5.2.1.1 Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos

Na central de incineração os resíduos que não são separados no serviço de recolha em baixa, começam por receber um tratamento antes de entrarem para a valorização energética. Esta unidade recebe perto de 2000 toneladas de resíduos por dia e produz energia suficiente para abastecer uma cidade de 150 mil habitantes [99].

O valor da venda de eletricidade proveniente da Incineração representou 24,5 Milhões de Euros no ano de 2018, representando este valor cerca de 41% do volume de negócios total da empresa [100].

Na tabela 17 são apresentadas as principais características técnicas da central de Incineração da Valorsul.

**Tabela 17 - Características Técnicas da Central de Incineração da Valorsul [99]**

Combustível	Resíduos Sólidos Urbanos
Processo de Tratamento	Incineração em massa
Capacidade de Incineração	3 linhas x 28 t/horas
Capacidade nominal de processamento	662 000 t/ano
Poder Calorífico dos Resíduos (PCI nominal)	7820 kJ/kg
Regime de Exploração	24 h/dia, 365 dias por ano
Produção de Energia Elétrica	587 kWh/t de RSU (PCI nominal)
Escórias Produzidas	200 kg/t
Cinzas e Resíduos do tratamento de gases	30 kg/t

Os produtos resultantes do processo de incineração, como é o caso das escórias, são enviadas para a Instalação de Tratamento e Valorização de Escórias (ITVE) no Aterro Sanitário de Mato da Cruz e, após maturação adequada, podem ser utilizadas como inerte para a construção civil, obras públicas e eventual recuperação paisagística de pedreiras e minas quando concluído o período de exploração. Contudo, as instalações Inceneração também geram grandes quantidades de gases de combustão que devem ser tratados, mesmo quando a incineração ocorreu sob condições ideais de combustão.

Para evitar riscos irreversíveis à saúde das populações locais e do meio ambiente, a conformidade com normas internacionais de emissões é essencial e o monitoramento e relatórios contínuos das emissões deve ser garantido. Os poluentes dos gases de combustão assumem a forma de escória, cinzas e gases. No caso das cinzas e resíduos do tratamento de gases estes são inertizados e enviados para uma célula própria do Aterro Sanitário de Mato da Cruz. Existe também a recuperação de produtos da combustão, metais ferrosos na Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (CTRSU) e de metais ferrosos e não ferrosos na ITVE.

#### **5.2.1.2 Valorização de Escórias**

A Instalação de Tratamento e Valorização de Escórias (ITVE) recebe as escórias, ou seja, o lixo depois de queimado na Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos, e separa o metal ferroso, o não ferroso e os inertes. O metal é encaminhado para a reciclagem e os inertes podem ser utilizados na construção de estradas. Por ano, são retirados das escórias material ferroso suficiente para a construção de 16.500 automóveis [99].

O produto a ser valorizado, o material inerte, é estudado pelo LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) para ser utilizado em obras de terraplanagem (aterros e leitos de pavimento), em camadas de sub-base de estradas e como material de enchimento para a recuperação paisagística de pedreiras ou minas a céu aberto. No processo de extração são recuperados cerca de 100% dos metais ferrosos e 70% de metais não ferrosos contidos nas escórias. A capacidade de processamento é de 200 mil toneladas por ano [99].

#### **5.2.1.3 Valorização Multimaterial**

A triagem de materiais recicláveis (vidro, papel/cartão e plástico/metal) colocados nos ecopontos ou recolhidos porta-a-porta nos 19 municípios da área da Valorsul, são encaminhados para os dois Centros de Triagem.

Nestas instalações são separados por tipo de material por forma a serem encaminhados para a indústria da reciclagem. Desta forma os materiais separados por todos nós nos ecopontos podem ser transformados no futuro em novos objetos.

Os Centros de Triagem da Valorsul, localizados no Lumiar e no Cadaval, são unidades industriais que, através de processos mecânicos e manuais, separam materiais para posterior reciclagem.

Para além dos dois Centros de Triagem, a Valorsul dispõe ainda de seis Ecocentros abertos ao público onde os cidadãos podem depositar materiais e objetos que não podem ser colocados nos ecopontos e que assim também podem ser reciclados.

#### **5.2.1.4 Estação de Tratamento e Valorização Orgânica**

A Estação de Tratamento e Valorização Orgânica (ETVO) trata, pelo processo de Digestão Anaeróbia, resíduos orgânicos recolhidos seletivamente nos setores da restauração,

hotelaria, mercados abastecedores e retalhistas, limpeza de jardins, entre outros. Produz fertilizante para uso agrícola e doméstico (composto) e energia, a partir do aproveitamento do biogás produzido no processo. Numa primeira fase, a ETVO trata 40 mil toneladas de matéria orgânica por ano, estando previsto no futuro, e caso se justifique, o aumento de capacidade para 60 mil toneladas por ano [99]. O processo de tratamento consiste numa Digestão Anaeróbia, seguida de um Pós-Tratamento Aeróbio em área fechada. Utiliza-se um processo de digestão anaeróbia, via húmida, termófilo, em duas fases.

Inicia-se o processo com um pré-tratamento dos resíduos, com a finalidade de remoção de materiais indesejáveis (vidros, pedras, plásticos, etc.). Posteriormente os resíduos são misturados com material digerido e alimentados ao reator, existindo na 1ª fase de operação, dois reatores de digestão anaeróbia. O biogás produzido é armazenado num reservatório com uma dimensão de 3.000 m<sup>3</sup> [99]. O produto digerido e desidratado passa a uma fase de pré-compostagem fechada, com arejamento forçado, seguindo-se uma pós-compostagem aberta. O período total de retenção é de 13 semanas. Todo o ar contaminado da instalação é recolhido (6 renovações de ar/hora) e tratado no biofiltro, evitando-se deste modo, a propagação de odores na ETVO e na vizinhança.

A opção pela recolha seletiva na origem tem como finalidade a obtenção de uma melhor qualidade de composto. As origens dos resíduos orgânicos a processar distribuem-se da seguinte forma:

- Restaurantes - 35% a 50%
- Mercados - 30% a 45%
- Cantinas - 10% a 20%
- Jardins/Cemitérios/Parques - 0% a 10% [99]

A Estação compreende uma unidade de receção e preparação dos resíduos, uma unidade de hidrólise e metanização, uma unidade de estabilização e afinação do composto e uma unidade de afinação do biogás. Na tabela 18 são apresentadas as principais características técnicas da central de Digestão Anaeróbia da Valorsul.

**Tabela 18 - Características Técnicas da Central de Digestão Anaeróbia da Valorsul [99]**

Combustível	Resíduos Orgânicos
Processo de tratamento	Digestão Anaeróbia
Capacidade Máxima de Processamento	40.000 t/ano
Energia Elétrica Produzida	8.000 a 12.000 MWh/ano
Autoconsumo Elétrico	4.000 a 6.000 MWh/ano
Composto Produzido	9,8 a 14,7 t/ano

A venda de energia da estação de tratamento e valorização orgânica ascendeu a 1,2 Milhões de Euros em 2018, o que representa 4,3% da venda total de eletricidade da Valorsul [100].

#### **5.2.1.5 Deposição em Aterro com Captação de Biogás**

Um Aterro Sanitário é um espaço destinado à deposição final de resíduos sólidos gerados pela atividade humana. A base do aterro sanitário é revestida por um sistema de proteção ambiental constituído por uma barreira de impermeabilização artificial e por um sistema de drenagem de lixiviados (líquido proveniente da biodegradação da massa de resíduos), de modo a impedir que estes líquidos se infiltrem no solo, encaminhando-os para tratamento adequado. Os taludes do aterro são igualmente revestidos por uma barreira de impermeabilização artificial.

Num aterro sanitário existe também uma rede de drenagem do biogás (gases provenientes da biodegradação da massa de resíduos), o qual é encaminhado para valorização energética ou queima.

Um aterro sanitário deve também ter um sistema de monitorização ambiental, o qual engloba o controlo dos lixiviados, do biogás, das águas subterrâneas, das águas superficiais e das alterações topográficas. Quando atinge o limite da sua capacidade, o aterro sanitário é alvo de um processo rigoroso de encerramento e arranjo paisagístico adequado, podendo ser, posteriormente, um espaço verde ou um parque de lazer para usufruto pela população, em boas condições de segurança e ambientais.

No Aterro Sanitário do Oeste (ASO) – Cadaval existe uma unidade de valorização energética do biogás. Além da produção de eletricidade, é efetuado o aproveitamento da energia térmica para aquecimento do ar ambiente e das águas do balneário. Em 2018 a venda de eletricidade à rede nacional teve um valor de 892 Mil Euros o que corresponde a 15.540 MWh<sup>8</sup> e um valor percentual de 3,2% da eletricidade vendida pela Valorsul [100].

No Aterro Sanitário de Mato da Cruz (ASMC) - Vila Franca de Xira também existe uma unidade de valorização energética a partir do Biogás. Em 2018 a venda de eletricidade à rede nacional teve um valor de 1,2 Milhões de Euros o que corresponde a 20.906 MWh<sup>9</sup> e um valor percentual de 4,3% da eletricidade vendida pela Valorsul [100].

### **5.2.2 Lipor**

A LIPOR – Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto – foi fundada em 1982 como Associação de Municípios que gere, valoriza e trata resíduos urbanos produzidos pelos oito municípios (Espinho, Gondomar, Maia, Matosinhos,

---

<sup>8</sup> Calculado a partir do valor médio de venda de eletricidade para o ano de 2018 (57,4€/MWh)

<sup>9</sup> Calculado a partir do valor médio de venda de eletricidade para o ano de 2018 (57,4€/MWh)

Porto, Póvoa de Varzim, Valongo e Vila do Conde) que a integram. São tratados, todos os anos, cerca de 500 mil toneladas de resíduos urbanos produzidos por cerca de 1 milhão de habitantes[101]. É desenvolvida uma estratégia integrada de gestão baseada em quatro componentes principais: a Valorização Multimaterial, a Valorização Orgânica e a Valorização Energética, complementadas por um Aterro Sanitário para receção dos rejeitados dos processos e de resíduos previamente preparados. Esta gestão baseia-se nos princípios da Economia Circular e, assim, são geridos diariamente os resíduos, respeitando a hierarquia de gestão de resíduos e agregados a três pilares do Desenvolvimento Sustentável: ambiental, económico e social. Na tabela 19 está representado o encaminhamento dado aos resíduos por destino final.

**Tabela 19 - Encaminhamento de Resíduos por Destino Final (t) [102]**

Destino Final	2018	% Peso
Valorização Multimaterial	62 285	11,7%
Valorização Orgânica	56 479	10,6%
Valorização Energética	402 151	75,5%
Confinamento Técnico	12 059	2,3%
<b>TOTAL</b>	<b>532 973</b>	<b>100,0%</b>

O volume de negócios da Lipor ascendeu a cerca de 39,5 Milhões de euros no ano de 2018. Desse valor, 15 Milhões são referentes à venda de energia o que representa 38% do volume de negócios da Lipor. A restante faturação corresponde à venda de produtos, os recicláveis registam 6,5 Milhões de euros em vendas, os Compostos 666 Mil euros e outros produtos 391 Mil euros. A faturação correspondente à prestação de serviços foi de 16,5 Milhões de euros [102].

Relativamente ao sistema de gestão integrado, são consideradas quatro fases principais desde a produção dos resíduos até à sua valorização final. A fase I refere-se à produção de resíduos que ocorre em residências, pequenos negócios e empresas ou instituições públicas. Os municípios têm então um papel fundamental na fase II, disponibilizando os contentores necessários e recipientes diferenciados para cada tipo de resíduo, bem como cuidando da sua recolha e transporte para as instalações da LIPOR, onde a fase III decorre em subprocessos como energético, orgânico e valorização multimaterial. Na verdade, os três sistemas centrais de gestão de resíduos incluem a planta de triagem (onde os materiais dos ecopontos são recebidos e uma separação adicional é realizada de acordo com sua natureza - metal, plástico, vidro, papel e papelão), a compostagem (onde a fração orgânica dos resíduos recolhidos como galhos de árvores, arbustos e grama é compostada) e a central de recuperação de energia (onde ocorre a incineração de resíduos). Além disso, existe um aterro onde são depositados subprodutos da central de incineração, como escória (previamente separada da fração ferrosa por segregação magnética), cinzas inertes e também resíduos brutos que não atendem a nenhum dos processos de tratamento oferecidos por esta unidade. Por fim, a etapa IV corresponde à obtenção e comercialização dos produtos valiosos resultantes das etapas anteriores, como eletricidade, composto e fertilizantes.

### 5.2.2.1 Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos

A Central de Valorização Energética, situada na Maia, tem como objetivo a valorização, na forma de energia elétrica, da fração de resíduos que não possa ser aproveitada através dos processos de compostagem e reciclagem. Com duas linhas de tratamento em operação contínua e praticamente automática, a Central tem uma capacidade de tratamento de 405.000 toneladas de resíduos por ano, tratando, em média, cerca de 1.100 toneladas de resíduos por dia e produzindo cerca de 170.000 MWh de energia elétrica por ano, dos quais cerca de 90% é fornecido à rede elétrica nacional, permitindo abastecer um aglomerado populacional da ordem de 150 mil habitantes[101]. A Central é autossuficiente em termos energéticos, isto é, utiliza cerca de 10% da energia total produzida para o seu próprio funcionamento, debitando assim, cerca de 90% da sua produção na Rede Elétrica Nacional [101].

Esta unidade possui um rigoroso esquema de operacionalidade e controlo, de acordo com as mais exigentes normas ambientais. Os gases e os materiais inertes resultantes do processo de combustão são submetidos a um rigoroso sistema de controlo e monitorização ambiental. Os gases, antes da sua evacuação para a atmosfera, são neutralizados e filtrados em equipamentos de elevada eficiência. As cinzas produzidas ao longo do processo de tratamento de gases, desde o início da atividade da Central foram submetidas a um processo de inertização com ligantes hidráulicos, em unidade dedicada, tendo como destino final a deposição em Aterro. Tendo sido atingida a conta máxima do Alvéolo Norte do Aterro Sanitário, local destinado à deposição de cinzas inertizadas, procedeu-se à suspensão do processo de inertização instalado, iniciando-se o encaminhamento das cinzas resultantes do sistema de tratamento de gases para um Centro Integrado de Recuperação, Valorização e Eliminação de Resíduos (CIRVER). Do processo de combustão de resíduos resultam ainda escórias e materiais ferrosos que são separadamente recuperados, sendo estes materiais ferrosos encaminhados para posterior reciclagem.

Na tabela 20 são apresentadas as principais características técnicas da central de Incineração da Lipor.

**Tabela 20 - Características Técnicas da Central de Incineração da Lipor**

Combustível	Resíduos Sólidos Urbanos
Processo de tratamento	Incineração em massa
Capacidade de Incineração	2 linhas x 23 t/hora
Capacidade Nominal de Processamento	405 000 t/ano
Poder Calorífico dos Resíduos (PCI nominal)	7700 kJ/kg
Regime de Exploração	24 horas por dia, 365 por ano
Produção de Energia Elétrica	447 kWh/t de RSU (PCI Nominal)
Escórias Produzidas	175 kg/t
Cinzas e Resíduos do tratamento de Gases	45 kg/t

Ramos et al. [103] fizeram um estudo de caso para avaliar o impacto ambiental do processo de valorização energética do sistema integrado de gestão de resíduos da Lipor ao longo de 2015, utilizando uma metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para avaliar o desempenho de cada instalação participante e o seu contributo no impacto total ponderado. Os impactos ambientais foram avaliados e os resultados foram comparados com duas situações médias europeias (instalação de incineração típica e aterro sanitário sem pré-tratamento de resíduos), que mostraram que estas instalações apresentam um desempenho melhor ou ao mesmo nível da situação europeia média, principalmente devido à elevada eficiência observada no sistema integrado de gestão de resíduos e à produção de eletricidade no processo de incineração. Uma análise detalhada concluiu que estes ajudaram a mitigar os impactos ambientais causados por alguns dos processos envolvidos na tecnologia de resíduos para energia (aterro apresentando os impactos mais duros), poupando recursos materiais, bem como evitando emissões para água doce e ar. O desempenho geral da central de recuperação de energia foi relevante, 1 tonelada de resíduos valorizados energeticamente economiza cerca de 1,3 milhões de kg de recursos e materiais, sendo o aterro o ponto fraco de todo o sistema. Quando é feita uma comparação dos resultados alcançados com a literatura publicada recentemente, esta central apresenta um perfil ambiental verdadeiramente favorável, mantendo uma posição sólida entre os resultados concorrentes. Outra conclusão importante a se tirar desta avaliação é que a inclusão da instalação de tratamento de águas residuais afeta negativamente o desempenho da central de incineração, enquanto a inclusão do transporte de resíduos para as instalações de incineração, bem como o uso de um aterro menos restritivo não influenciam significativamente o resultado.

#### **5.2.2.2 Valorização de Escórias**

Do tratamento dos Resíduos Urbanos (RU) na Central de Valorização Energética resultam dois tipos de subprodutos: as cinzas volantes e as escórias (cinzas de fundo). Os principais componentes das escórias correspondem, essencialmente, à fração de materiais não combustíveis e potenciam uma utilização como material granular, substituindo os solos ou os agregados naturais obtidos na indústria extrativa.

As aplicações mais usuais incluem utilizações como:

- Material granular para aterros: coberturas intermédias de outros resíduos;
- Agregados em trabalhos de pavimentação, incluindo bases granulares e misturas com ligantes betuminosos ou hidráulicos;
- Agregados em aplicações cimentícias, nomeadamente blocos de betão e elementos pré-fabricados ou betonados.

#### **5.2.2.3 Valorização Multimaterial**

O Centro de Triagem da LIPOR é uma unidade que tem como objetivo realizar uma triagem complementar mais fina dos materiais provenientes dos diferentes circuitos de recolha seletiva de materiais, nomeadamente os ecopontos, os ecocentros, os circuitos

de recolha seletiva Porta-a-Porta e os circuitos especiais, de forma a poderem ser encaminhados para a reciclagem.

O Centro de Triagem ocupa uma nave coberta de 4.000 m<sup>2</sup> e tem uma capacidade de tratamento instalada de cerca de 50.000 toneladas/ano [101].

#### **5.2.2.4 Estação de Tratamento e Valorização Orgânica**

Na Central de Valorização Orgânica, situada em Baguim do Monte, existe capacidade para valorizar 60 mil toneladas/ano de Biorresíduos (resíduos alimentares e resíduos verdes) provenientes de recolha seletiva. A Central utiliza o processo de compostagem em túnel, produzindo cerca de 13 mil toneladas/ano de corretivo orgânico de alta qualidade. Esta central de valorização orgânica não possui tratamento por Digestão Anaeróbia para a produção de energia elétrica [101].

Uma das características mais relevantes desta Central é a seleção criteriosa dos biorresíduos aceites no processo de compostagem, influenciando a qualidade do composto produzido. Os biorresíduos valorizados na Central são provenientes dos seguintes circuitos de recolha seletiva:

- Recolha Seletiva Porta-a-Porta Residencial (resíduos alimentares de habitações);
- Recolha Seletiva Porta-a-Porta Não Residencial (resíduos alimentares de restaurantes e similares);
- Outros circuitos de Recolha Seletiva dedicados (resíduos alimentares de diferentes origens, incluindo mercados e feiras, festas, romarias, eventos, etc.);
- Recolha Seletiva de Resíduos Verdes (porta-a-porta, de proximidade e ecocentros);
- Recolha Seletiva de Resíduos Verdes de Cemitério.

A pureza dos biorresíduos recolhidos (ausência de contaminantes) é um aspeto fundamental para a viabilidade e sucesso de todo o projeto.

- Todo o processo desenhado na Central de Valorização Orgânica responde a duas premissas fundamentais: por um lado, assegurar uma ótima qualidade do produto;
- E, por outro lado, o tratamento integral dos odores, diminuindo o seu impacto no exterior da Central.

#### **5.2.2.5 Deposição em Aterro com Captação de Biogás**

A deposição de resíduos alimentares e biodegradáveis em Aterro e o seu encerramento, uma prática comum no passado, cria as condições adequadas para uma decomposição em regime de anaerobiose, o que origina a produção de um conjunto de gases de aterro - o biogás.

No entanto, este mesmo biogás pode ser usado, em determinadas condições, como combustível de motores de combustão interna associados a geradores para produção de energia elétrica, o que se apresenta como uma excelente opção de aproveitamento de uma fonte renovável e contribui para a redução da emissão de gases com efeito de estufa.

Após a recuperação dos antigos Aterros de Ermesinde e Matosinhos e a sua reconversão em espaços para a utilização lúdica pela comunidade, estes espaços foram também potencializados através do aproveitamento energético do biogás.

Na central do Aterro de Ermesinde desde a entrada em funcionamento, em junho de 2008, até 2019, foram produzidos cerca de 19.000 MWh de energia elétrica permitindo evitar a emissão de cerca de 12.600 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. A produção anual ronda os 1.700 MWh o que equivale ao consumo elétrico de cerca de 1.000 habitações [101].

Na central do Aterro de Matosinhos também o Biogás gerado no antigo Aterro ofereceu uma oportunidade ótima para o aproveitamento e produção de energia. Assim, desde 2009 que o Biogás gerado no Aterro foi aproveitado para a produção de energia elétrica que é exportada para a rede elétrica nacional.

Desde a entrada em funcionamento até ao momento da sua desativação, dado que foi atingido nos finais de 2019 o limiar mínimo de funcionamento da unidade pela desgaseificação da massa de resíduos depositada no Aterro, foram produzidas cerca de 3.000 MWh de energia elétrica correspondendo a 2.000 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente de emissão evitadas. Esta produção é equivalente ao consumo elétrico de um aglomerado de aproximadamente 1750 habitações [101].

### **5.3 Unidades de Pequena Escala (< 1100 t/dia)**

Neste subcapítulo é apresentado um sistema de valorização de RSU de pequena escala na Ilha da Madeira. São apresentadas e caracterizadas as tecnologias WTE que o constituem e a forma como são geridos os resíduos e os materiais resultantes dos processos.

#### **5.3.1 Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos da Meia Serra**

A Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos (ETRS) da Meia Serra constitui a principal infraestrutura do Sistema de Transferência, Triagem, Tratamento e Valorização de Resíduos Urbanos da Região Autónoma da Madeira e integra soluções de valorização, tratamento e destino final de resíduos existentes na Região.

A construção da Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos (ETRS) da Meia Serra foi iniciada no final da década de 80, com conclusão em 1991, sendo nessa altura o primeiro sistema integrado de tratamento e destino final de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) do País. No entanto, com a necessidade de adequar os tratamentos aí existentes às diretrizes europeias e nacionais, bem como, adotar uma solução integrada para a valorização, tratamento e confinamento dos resíduos, devidamente articulada com a

valorização multimaterial (através de recolha seletiva e de reciclagem dos materiais), em 1998 deu-se início a obras de ampliação e remodelação, incluindo de valorização da área envolvente.

Os processos de gestão de resíduos que integram a ETRS são:

- Instalação de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos (IIRSU)
- Instalação de Incineração de Resíduos Hospitalares e de Matadouro (IIRHM)
- Instalação de Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos (ICRSU)
- Aterros Sanitários (AS)

Para complementar as principais instalações, a ETRS inclui ainda instalações de apoio, designadamente:

- Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR)
- Parque de Armazenagem, Trituração e Acondicionamento de Pneus Usados
- Plataforma de Armazenagem, Trituração e Acondicionamento de Madeiras de Embalagens
- Edifício de Compactação de Metais Ferrosos
- Edifício de Armazenamento de Escórias

#### **5.3.1.1 Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos**

A Instalação de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos (IIRSU) visa a valorização energética de resíduos urbanos, através de um processo controlado e automatizado que, para além de tratar os resíduos termicamente, possibilita a produção de energia elétrica.

Esta instalação, constituída por duas linhas de incineração independentes, com capacidade unitária de 8 toneladas/hora e funciona 24 horas por dia, encontrando-se dotada de dois sistemas forno-caldeira e dois sistemas de tratamento de gases (um por linha).

A energia elétrica produzida pela IIRSU é assegurada pelo grupo turbogerador, que possui uma capacidade nominal de 8 MWh. Uma parte da energia produzida é encaminhada para autoconsumo na ETRS, enquanto a restante é direcionada para a rede de distribuição pública. Durante o ano de 2016 a central de incineração recebeu 107.833 toneladas de RSU para tratamento por incineração, incluindo 15.946 toneladas de resíduos verdes de origem florestal (biomassa). Foram produzidos pela unidade 47,5 GWh de energia elétrica dos quais 35,57 GWh foram injetados na rede de distribuição pública mediante venda à Empresa de Eletricidade da Madeira [104].

As escórias produzidas na incineração são sujeitas a uma triagem eletromagnética, para remoção dos materiais ferrosos (que são enviados para reciclagem), sendo a fração inerte depositada em aterro sanitário (AS).

As cinzas volantes resultantes do sistema de tratamento de gases são sujeitas a um processo químico de inertização e posteriormente depositadas em células de apoio específicas do AS.

Na tabela 21 são apresentadas as principais características técnicas da central de Incineração da ETRS.

**Tabela 21 - Características Técnicas da Central de Incineração da ETRS [105]**

Combustível	Resíduos Sólidos Urbanos
Processo de tratamento	Incineração em massa
Capacidade de Incineração	2 linhas x 8 t/hora
Capacidade Nominal de Processamento	126 000 t/ano (90% de disponibilidade)
Poder Calorífico dos Resíduos (PCI nominal)	7500 kJ/kg
Regime de Exploração	24 horas por dia durante 8000 horas/ano
Produção de Energia Elétrica	473 kWh/t de RSU (PCI Nominal)
Escórias Produzidas	160 kg/t
Cinzas e Resíduos do tratamento de Gases	59 kg/t

### 5.3.1.2 Estação de Tratamento e Valorização Orgânica

A Instalação de Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos (ICRSU) tem por finalidade a valorização orgânica dos resíduos de jardim e alimentares de origem vegetal, através do processo de degradação biológica aeróbia.

De uma forma mais simples, trata-se de um processo natural pelo qual os microrganismos transformam a matéria orgânica (folhas, relva, ramagens, restos ou cascas de legumes e frutas, etc.) numa substância húmica estabilizada chamada composto, uma espécie de fertilizante com propriedades de corretor de solos, utilizado na agricultura.

A ICRSU integra três subprocessos, em edifício fechado: tratamento primário ou mecânico, fermentação/maturação e sistema de afinação.

O tratamento primário permite retirar dos resíduos orgânicos os materiais indesejáveis contaminantes, seguindo-se a fermentação/maturação, que é realizada durante cerca de 10 semanas, em parque fechado, por um sistema de revolvimento mecânico automático. De modo a prevenir a propagação de maus odores, a nave de fermentação/maturação opera em depressão, sendo o ar, após processo de humidificação, sujeito a um biofiltro. O sistema de afinação final efetua a triagem e descontaminação final ao composto produzido, após o qual poderá ser ensacado ou armazenado[105].

Uma vez que não existe procura de composto no mercado que viabilize o funcionamento da instalação de compostagem, durante o ano de 2016 os resíduos verdes rececionados foram encaminhados para valorização energética, mantendo o funcionamento daquela

instalação interrompido. No ano de 2016 foram vendidas cerca de 12,82 toneladas de composto que ainda se encontrava armazenado na ETRS da Meia Serra, sendo o seu stock atual de cerca de 87 toneladas [104].

### **5.3.1.3 Estação de Tratamento de Águas Residuais**

O tratamento das águas residuais e lixivantes produzidas na ETRS é assegurado pela Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR).

A instalação compreende três sistemas independentes de tratamento: tratamento primário ou biológico efetuado numa lagoa de arejamento; tratamento físico-químico com adição de reagentes químicos e desidratação das lamas formadas; e processo terciário de osmose inversa (OI).

Os subprodutos produzidos pela ETAR incluem lamas, que são desidratadas e depositadas em AS, e o concentrado da OI, que poderá ter quatro destinos finais distintos: incineração na IIRSU, incineração na IIRHM, reutilização no processo de inertização das cinzas das instalações e incineração e/ou injeção no AS.

O efluente final da ETAR corresponde ao permeado da OI, cuja elevada qualidade permite a sua reutilização total interna, nomeadamente, água de processo da IIRSU, rega, lavagens, entre as principais utilizações.

### **5.3.1.4 Deposição em Aterro**

Os Aterros Sanitários (AS) são os sistemas de deposição final dos resíduos não passíveis de tratamento por incineração ou compostagem, bem como das escórias e das cinzas (previamente inertizadas) resultantes dos processos de incineração. Adicionalmente, servem de suporte a situações de inoperacionalidade e/ou de emergência dos processos de tratamento instalados.

O aterro atualmente em operação na ETRS da Meia Serra, é composto por uma célula de RSU e escórias, onde são depositadas as escórias produzidas nas instalações de incineração e, eventualmente, resíduos urbanos e similares, e por uma célula de cinzas para a deposição de cinzas inertizadas provenientes das unidades de incineração. No ano de 2016 foram rececionadas cerca de 3.461 toneladas de resíduos para deposição em aterro sanitário e 970 toneladas para deposição no aterro de inertes [104].

Encontram-se encerrados e selados três aterros sanitários na ETRS e em nenhum deles existe captação de biogás para produção de energia elétrica. No caso das instalações de apoio como os Parques de Armazenamento de Pneus Usados, Madeiras e Metais Ferrosos, após o acondicionamento destes, os resíduos são transportados para reciclagem e, ou valorização em Portugal Continental.

## **5.4 Materiais e Resíduos Resultantes do Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos**

A opção feita por Portugal relativa aos processos de tratamento de RU, designadamente tratamentos mecânicos e biológicos assenta no reconhecimento que os mesmos apresentam um grande potencial em termos de:

- Redução da deposição de RUB em aterro;
- Aumento significativo das taxas de reciclagem;
- Importante redução das emissões de gases de efeito de estufa.

Tudo isto é fundamental para a prossecução das metas nacionais e comunitárias.

Assim, do tratamento de RU resultam um conjunto de resíduos passíveis de reciclagem material, orgânica ou incineração com produção de energia, que são identificados e quantificados nos pontos seguintes.

#### 5.4.1 Recicláveis

Na Tabela 22 apresentam-se os dados referentes aos resíduos recicláveis recuperados nos diferentes tratamentos e retomados nos últimos anos, espelhando desta forma os resíduos retomados em cada um dos processos.

**Tabela 22 - Quantitativos de resíduos recicláveis recuperados (t) em Portugal Continental [97]**

Resíduos recicláveis recuperados de:	2013	2014	2015	2016	2017	2018
<b>Unidades de incineração</b>	14 671	9 004	12 718	14 470	14 425	13 659
<b>Unidades TMB</b>	30 962	34 866	51 767	33 897	33 421	46 336
<b>Unidades de valorização orgânica (recolha seletiva de RUB)</b>	20	38	28	2 845	4 710	5 006
<b>Unidades TM</b>	13 682	33 670	54 143	42 624	15 931	7 004
<b>Unidades de triagem (papel/cartão e embalagens de metal/plástico) e recolha seletiva multimaterial de restantes fluxos/fileiras</b>	360 803	357 083	434 879	467 378	443 695	491 762
<b>Total</b>	<b>420 118</b>	<b>434 661</b>	<b>553 535</b>	<b>561 214</b>	<b>512 182</b>	<b>563 767</b>
<b>Varição face ao ano anterior</b>	↑5%	↑3%	↑27%	↑1%	↓9%	↑10%

Nota: alguns dos resíduos recuperados em unidades TM ou TMB são encaminhados para unidades de triagem para uma melhor separação/afinação dos resíduos. Assim, nos quantitativos de resíduos recicláveis de triagem estão incluídos os quantitativos de algumas instalações TM e TMB

Os dados apresentados revelam um aumento dos quantitativos de recicláveis recuperados face a 2017. Este aumento provém da retoma de recicláveis provenientes de recolha seletiva. Contudo, os recicláveis retomados são em grande parte resultado de resíduos separados de outros fluxos de materiais.

## 5.4.2 Produção de Composto

Na Tabela 23 é apresentada a evolução dos quantitativos de composto produzido desde 2012.

**Tabela 23 - Quantitativos de Composto produzido (t) [97]**

Produção de composto a partir de...	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Unidades de Valorização Orgânica (seletiva)	13 273	14 737	15 804	15 406	15 816	16 750
Unidades de Tratamento Mecânico e Biológico	47 558	48 427	47 839	44 125	44 013	44 184
<b>Total</b>	<b>60 831</b>	<b>63 164</b>	<b>63 643</b>	<b>59 530</b>	<b>59 829</b>	<b>60 933</b>

As quantidades de composto produzido ao longo dos anos sofreram ligeiras variações. É de referir que no ano de 2018 foi escoado cerca de 83% do total de composto produzido e o destino deste composto foi a valorização agrícola [97].

## 5.4.3 Produção de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) e Material para CDR

O coprocessamento é a base da produção de CDR, processo no qual é utilizado um tratamento biomecânico para produzir o CDR que depois é tipicamente acrescentado ao processo de combustão com um sistema de dosagem separado. A substituição direta do combustível primário no processo de produção representa uma recuperação de energia significativamente mais eficiente que outras tecnologias WTE, atingindo normalmente 85% a 95% de rendimento, dependendo das características dos resíduos.

Na tabela 24 encontra-se refletida a produção de material para CDR em unidades de triagem, tratamento mecânico e tratamento mecânico e biológico, declarado pelos SGRU entre 2015 e 2018.

**Tabela 24 - Quantitativos de material para CDR produzido (t) [97]**

Produção de Material para CDR a partir de:	Total			
	2015	2016	2017	2018
Estações de Triagem	1 308	0	0	15
Tratamento Mecânico	33 750	21 042	0	0
Tratamento Mecânico e Biológico	72 564	467	379	385
Unidade de produção CDR	6 943	0	0	0
<b>Total</b>	<b>114 566</b>	<b>21 509</b>	<b>379</b>	<b>400</b>

Para o ano 2018 o material para CDR produzido foi encaminhado para as unidades de produção de CDR existente nos SGRU, situação semelhante à ocorrida desde 2016.

Na Tabela 25 esquematiza-se o destino do CDR produzido, entre 2015 e 2018.

**Tabela 25 - Quantitativos de CDR produzido (t) [97]**

Produção de CDR a partir da Unidade de Produção de CDR. Destino para:	Total			
	2015	2016	2017	2018
<b>Armazenamento</b>	580	440	16	0
<b>OGR</b>	28 896	309	1 449	622
<b>Total</b>	<b>29 476</b>	<b>749</b>	<b>1 466</b>	<b>622</b>

Da análise da informação verifica-se uma significativa diminuição do CDR produzido e respetivo encaminhamento face ao ano 2017. Esta situação poderá ser explicada pela indisponibilidade dos Operadores de Gestão de Resíduos (OGR) para receber CDR dos SGRU consequência dos elevados teores de humidade presentes. Desta forma as unidades de produção de CDR existente não funcionaram durante o ano 2018, situação esta que é contrária ao que se passa na Indústria Portuguesa.

O impacto do coprocessamento em Portugal desde 2005 a 2018, reduziu nos últimos 13 anos CO<sub>2</sub> equivalente à substituição de 86 mil carros a gasóleo por carros elétricos. Desde 2005, período em que este processo começou a ser utilizado pelas cimenteiras portuguesas, o consumo anual de combustíveis e matérias primas alternativas aumentou de 42 mil toneladas para cerca de 300 mil toneladas, uma subida superior a 600%. Até 2023, estima-se que a atividade do coprocessamento permita evitar em média, cerca de 543 mil toneladas de CO<sub>2</sub> por ano, o que pode levar a menos 3,3 milhões de toneladas até 2023. Este processo, que permite valorizar resíduos sem potencial de reciclabilidade, já contribuiu com cerca de 4,0 milhões de euros em Valor Acrescentado Bruto para a economia nacional e na criação de 110 empregos no último ano, assim como permite prolongar o ciclo de vida dos resíduos, tendo sido um aliado na redução de custos operacionais e do impacto ambiental na indústria cimenteira[106].

Alguns países europeus têm vindo a reconhecer que os resíduos industriais ou urbanos têm uma componente energética e material que pode ser utilizada como alternativa aos recursos naturais e aos processos de tratamento dedicado, como incineradoras e aterros, cujos custos são significativamente mais elevados face ao coprocessamento. No entanto, apesar do reconhecimento das vantagens deste processo, o baixo custo da utilização dos aterros em Portugal continua a incentivar o uso destas estruturas. Uma das metas é posicionar este processo na hierarquia dos resíduos entre a reciclagem e a valorização energética.

De todas as tecnologias WTE abordadas nesta Dissertação, a única que até à data não tem uma unidade implementada em Portugal é a gaseificação ou pirolise.

## 6. Conclusões

A revisão de literatura efetuada procurou caracterizar o estado da arte da valorização energética de resíduos no caso português e a nível mundial. Procurou demonstrar-se que as tecnologias WTE acrescentam valor ao tratamento de resíduos e mitigam alguns dos seus impactos negativos. As diferentes características de RSU e o estágio de desenvolvimento dos países são os principais fatores na definição das tecnologias que predominam em cada um deles. A recuperação de energia a partir de resíduos é apenas uma das opções disponíveis de gestão de resíduos e deve ser examinada no contexto de um plano integrado de gestão de resíduos. Tal plano deve ser de longo prazo e também abordar outras opções, como a prevenção de resíduos na origem, reutilização e reciclagem a fim de chegar a um contexto ideal.

Na Europa, em termos de tecnologia WTE, o tratamento térmico é o que se tem revelado como a solução mais recorrente, nomeadamente, como forma de reduzir as quantidades de resíduos biodegradáveis encaminhados para aterro. Uma meta de zero resíduos que depende da incineração de resíduos, embora forneça uma fonte de energia, precisa de ser enquadrada de forma correta numa economia circular, caso contrário, pelo menos em teoria, vai incentivar o modelo de economia linear. Para se ter uma economia circular em pleno funcionamento, a sociedade precisa de reavaliar o que considera como resíduo, e em cada estágio da hierarquia de resíduos é necessário potencializar as diferentes etapas, de prevenção, reutilização, reciclagem e recuperação.

No caso Português e como forma de melhorar a gestão de resíduos a curto prazo, deve dar-se mais atenção a processos como a digestão anaeróbica de resíduos

biodegradáveis, onde a reciclagem é combinada com a recuperação de energia. Isto porque em Portugal dos 32% de resíduos que ainda são depositados em aterro, deste valor, 46% são referentes a RUB. O composto resultante do processo de DA tem tido uma boa aceitação por parte dos utilizadores. Quanto ao coprocessamento, existe um desincentivo do encaminhamento de resíduos para unidades de produção de CDR, consequência do não escoamento do CDR produzido. A captura de gás de aterro deve ser utilizada sempre como forma de mitigar parcialmente os impactos climáticos negativos da operação de aterros sanitários e para produção de energia. O papel da incineração de resíduos, a opção predominante na gestão de resíduos para energia, deve ser redefinido de forma a garantir que os aumentos na reciclagem e na reutilização não sejam prejudicados. A Lipor e a Valorsul são as duas maiores empresas de gestão de resíduos urbanos a operar em Portugal e a valorização energética representa, respetivamente, 38% e 47% do volume de negócios destas empresas, sendo a incineração, em ambos os casos, a tecnologia WTE com o maior peso.

A Comissão Europeia continua empenhada em garantir que o financiamento da UE e outros apoios financeiros públicos sejam direcionados para opções de tratamento de resíduos que estejam em consonância com a hierarquia de resíduos e que seja dada prioridade à prevenção, reutilização, recolha seletiva e reciclagem de resíduos.

Um dos fator-chave identificado pela Comissão Europeia para o sucesso do WTE é o papel desempenhado pelos Municípios. Isto é demonstrado nomeadamente nos países nórdicos, onde o WTE tem sido implementado com grande sucesso muito graças à ação dos Municípios e à interação que conseguem estabelecer entre entidades do setor público e entidades do setor privado.

## **6.1 Pistas para Investigação Futura**

Da análise feita ao sistema nacional de gestão de resíduos, seria útil a prossecução da investigação de forma a obter reposta para as seguintes questões:

- Avaliar o custo de transporte em áreas rurais e a introdução de sistemas de valorização energética de pequena escala de forma a evitar o envio de resíduos para zonas distantes;
- Estudar o mercado de subprodutos produzidos em operações de gaseificação e pirólise para Portugal;
- Avaliar a possibilidade de introdução de determinados fluxos de materiais (por exemplo: pneus usados) nos sistemas de incineração existentes em Portugal (sistemas mistos) por forma a reduzir os custos globais do sistema;
- Fazer uma análise custo-benefício da introdução de sistemas de produção de CDR a montante dos tratamentos de valorização energética.

## Referências Bibliográficas

- [1] J. H. Pato, *História das políticas públicas de abastecimento e saneamento de águas em Portugal*. 2011.
- [2] A. LLevy J. Q., Cabeças, *Resíduos Sólidos Urbanos – princípios e processos*,. Lisboa: AEPSA, 2006 9899505900., ISBN, 2006.
- [3] Ministério do Ambiente, “Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos,” *Diário da República*, no. Persu 2020, pp. 1–86, 2014.
- [4] Fundo Europeu, Desenvolvimento Regional, and Fundo de Sustentabilidade Europeu, “PT A Política de Coesão 2007-2013,” 2013.
- [5] European Commission, “The role of waste-to-energy in the circular economy,” *Commun. From Comm. To Eur. Parliam. Counc. Eur. Econ. Soc. Comm. Comm. Reg. COM(2017) 34*, p. 11, 2017.
- [6] Agência Portuguesa do Ambiente, “(2010a). Caracterização da Situação dos Resíduos Urbanos em Portugal Continental em 2009.,” 2010.
- [7] Agência Portuguesa do Ambiente, “(2010b) Caracterização da produção de Resíduos não Urbanos em Portugal em 2009.,” 2010. .
- [8] Instituto Nacional de Estatística, “(2014b) – Informação Estatística – Dados Estatísticos, disponível em [www.ine.pt](http://www.ine.pt),” 2014. .
- [9] Agência Portuguesa do Ambiente, “APA (2013a) – REA2013 – Relatório do Estado do Ambiente, outubro de 2013,” 2013. .
- [10] The Internacional Alliance, “Zero Waste Definition,” *Zero Waste*, 2004. [Online]. Available: <http://zwia.org/zero-waste-definition/>.
- [11] T. Curran and I. D. Williams, “A zero waste vision for industrial networks in Europe,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 207–208, pp. 3–7, Mar. 2012.
- [12] European Commission, “For a circular economy: A zero waste program for Europe,” 2014.
- [13] M. Andreini, A. De Falco, and M. Sassu, “on Site Tests for the Mechanical Characterization of Masonry Walls With Chaotic Texture,” *Struct. Anal. Hist. Constr. Vols 1-3*, 2012.
- [14] World Wildlife Fund, “Living Planet Report 2014,” p. 180, 2014.
- [15] T. Jackson, “Prosperidade sem Crescimento: Economia para um planeta finito,” p. 289, 2009.
- [16] The World Bank, “Inclusive Green Growth: The Road to Sustainable Development development,” 2012. [Online]. Available: [http://siteresources.worldbank.org/EXTSDNET/Resources/%0AInclusive\\_Green\\_Growth\\_May\\_](http://siteresources.worldbank.org/EXTSDNET/Resources/%0AInclusive_Green_Growth_May_).
- [17] D. Wu, “A study on the regional circular economy system and its Shanghai construction, operation and suggestion,” Michigan Technological University, 2014.
- [18] European Comission, *HORIZON 2020 em breves palavras: o programa-quadro de investigação e inovação da UE*. 2014.
- [19] European Commission, “REGULAMENTO (UE) 2019/424 DA,” *Of. J. EU*, vol. 2019, no. 2,

pp. 46–66, 2019.

- [20] Foundation Ellen Macarthur, “Circular economy,” 2015. [Online]. Available: <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/circulareconomy>.
- [21] K. Murray, A., Skene, K., & Haynes, “The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of Concept and Application in a Global Context,” *J. Bus. Ethics*, p. 12, 2015.
- [22] Ragn-Sells, “Position paper on the EU Framework on the Economy circulates,” 2015.
- [23] Foundation Ellen Macarthur, “Towards a circular economy. Economic and business logic for an accelerated transition,” 2012. [Online]. Available: [http://circularfoundation.org/sites/default/files/tce\\_report1\\_2012.pdf](http://circularfoundation.org/sites/default/files/tce_report1_2012.pdf).
- [24] F. Preston, “The global Redesign? Shaping the Circular Economy. Energy, Environment and Governance Resources,” 2012.
- [25] A. Kok., L., Worpel, G. & Ten Wolde, “Unleashing the power of Circular economy. IMSA Amsterdam Report for Circle Economy,” 2013. [Online]. Available: [http://www.circle-economy.com/wpcontent%0A/envios/2014/12/unleashing\\_the\\_power\\_of\\_the\\_circular\\_econ%0Aomy-circle\\_economy.pdf](http://www.circle-economy.com/wpcontent%0A/envios/2014/12/unleashing_the_power_of_the_circular_econ%0Aomy-circle_economy.pdf).
- [26] D. Lam, HL, Ng, WPQ, Ng, RTL, Ng, EH, Aziz, MKA, & Ng, “Green strategy for sustainable waste-to-energy supply chain,” 2013.
- [27] J. Guziana, B. Song, H. Thorin, E. Dotzauer, E. Yan, “Waste-to-Energy Use: Swedish Perspective. Biomass Waste Value.,” 2014.
- [28] H. Brunner, PH, e Rechberger, “Waste to energy – key element for sustainable waste management,” vol. 37, pp. 3–12, 2015.
- [29] T. G. Dieter Mutz, Dirk Hengevoss, Christoph Hugi, “Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management-A Guide for Decision Makers in Developing and Emerging Countries,” *Dtsch. Gesellschaft für Int. Zusammenarbeit GmbH*, no. May, pp. 1–58, 2017.
- [30] Económico Madeira, “Produção de energia da Meia Serra dá luz a 38 mil habitantes da Madeira,” *J. Económico*, 2017.
- [31] Lentjes Doosan GmbH, “Components of a municipal solid waste incineration plant with flue gas cleaning.” .
- [32] T. Rand, J. Haukohl, and U. AMarx, “Municipal Solid Waste Incineration,” Washington, D.C, 1999.
- [33] S. T. Tan, H. Hashim, J. S. Lim, W. S. Ho, C. T. Lee, and J. Yan, “Energy and emissions benefits of renewable energy derived from municipal solid waste: Analysis of a low carbon scenario in Malaysia,” *Appl. Energy*, vol. 136, pp. 797–804, 2014.
- [34] Secretariat of the Basel Convention, “Technical guidelines on the environmentally sound co-processing of hazardous wastes in cement kilns,” 2011.
- [35] CEMBUREAU, “Activity Report 2015,” Bruxelles, 2015.
- [36] M. P. M. Chinyama, *Alternative Fuels in Cement Manufacturing*. in *Alternative Fuel, InTech*, 2011.
- [37] “CIMPOR - Centro de Produção de Alhandra.” [Online]. Available: [http://www.cimpor-portugal.pt/default.aspx?lang=pt&id\\_class=8&name=Homepage](http://www.cimpor-portugal.pt/default.aspx?lang=pt&id_class=8&name=Homepage).

- [38] M. Wijayasundara, "Sustainability in Manufacturing Built Materials: Cement Manufacturing Using Alternative Fuel and Raw Material in Cement Kilns," 2011.
- [39] N. A. Madlool, R. Saidur, M. S. Hossain, and N. A. Rahim, *A critical review on energy use and savings in the cement industries*, Vol. 15. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011.
- [40] D. Mutz V. Nandan, "Co-processing Waste Materials in Cement Production. The GTZ-Holcim Public Private Partnership," *Int. J. Environ. Technol. Manag.*, pp. 300–309, 2006.
- [41] European Recovered Fuel Organisation, *Information Document on EN15359 'Solid Recovered Fuels – Specifications and classes.* .
- [42] V. S. R. W. Ma, G. Hoffmann, M. Schirmer, G. Chen, "Chlorine characterization and thermal behavior in MSW and RDF," *J. Hazard. Mater.*, vol. 178, pp. 489–98, 2010.
- [43] Secretariat of the Basel Convention, "Technical Guidelines on the environmentally sound co-processing of hazardous waste in cement kilns," 2012.
- [44] Clean Development Mechanism - Executive Board, "Project Design Document CEMEX Mexico: Biomass project at Huichapan cement plant, Version 3," 2012.
- [45] D. B. Arthur Wellinger, Jerry Murphy, *The Biogas Handbook*, 1st Editio. 2013.
- [46] Estrutágua, "Instalações de Biogás." [Online]. Available: <https://www.estrutagua.pt/produtos/instalacoes-de-biogas/>.
- [47] Y. Vögeli, C. R. Lohri, A. Gallardo, S. Diener, and C. Zurbrügg, "Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries," 2014.
- [48] S. T. Tan, W. S. Ho, H. Hashim, C. T. Lee, M. R. Taib, and C. S. Ho, "Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malaysia," *Energy Convers. Manag.*, vol. 102, pp. 111–120, 2015.
- [49] M. A. Rajaeifar, H. Ghanavati, B. B. Dashti, R. Heijungs, M. Aghbashlo, and M. Tabatabaei, "Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: A comparative review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, no. January, pp. 414–439, 2017.
- [50] R. Whyte and G. Pery, "A rough Guide to Anerorbic Digestion Costs and MSW Diversion," *Renew. Energy*, 2001.
- [51] B. M. J. and R. B. W. J. Rapport, R. Zhang, "Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste," *California Environmental Protection Agency*, 2008.
- [52] "Environment Global Facilities." [Online]. Available: <http://www.egf.pt/en/business-areas/waste-treatment-and-recovery/depositing-at-a-sanitary-landfill/depositing-at-a-sanitary-landfill/coimbra-support-landfill/>.
- [53] S. h. G. and A. N. K. Wang-Yao, S. Towprayoon, C. Chiemchaisri, "Seasonal Variation of Landfill Methane Emissions from Seven Solid Waste Disposal Sites in Central Thailand," 2006.
- [54] Clean Development Mechanism - Executive Board, "Project Design Document, Salvador da Bahia Landfill Gas Management Project, Version 8.2," *CDM - Executive Board*, 2016. [Online]. Available: <https://cdm.unfccc.int/Projects>.

- [55] Clean Development Mechanism - Executive Board, "Project Design Document, Tianjin Shuangkou Landfill Gas Recovery and Electricity Generation," *Version 9*, 2014. [Online]. Available: <https://cdm.unfccc.int/Projects>.
- [56] "http://www.dgengineering.de/" [Online]. Available: <http://www.dgengineering.de/images/Fliessbild-Pyrolyse-D-1.jpg>.
- [57] F. H. W, "Case Study Thermo Select Facility Karlsruhe," Netherlands, 2002.
- [58] The World Bank, "Municipal Solid Waste Incineration," Washington, D.C., 1999.
- [59] World Energy Council, "World Energy Resources: Waste to Energy," 2016.
- [60] Hexa Research, "Waste to energy market analysis, market size, application analysis, regional outlook, competitive strategies and forecasts, 2014 to 2020," 2016.
- [61] Hicks M. & Rawlinson S., "Cost model: Energy from waste," *Building Magazine*, 2010.
- [62] C. Hoornweg, D. Bhada-Tata, P. Kennedy, "Environment: Waste production must peak this century," *Nature*.
- [63] J. Hughes, "Small scale environmental solutions – a new market opportunity," 2013. [Online]. Available: <http://pennog.com/small-scale-environmental-solutions-a-new-market-opportunity/>.
- [64] N. Scarlat, F. Fahl, and J. F. Dallemand, "Status and Opportunities for Energy Recovery from Municipal Solid Waste in Europe," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 10, no. 9, pp. 2425–2444, 2019.
- [65] Asia Development Bank, "Sector assessment (summary): water and other urban infrastructure and services, Country Partnership Strategy: Azerbaijan," 2014.
- [66] N. Scarlat, J. F. Dallemand, F. Monforti-Ferrario, and V. Nita, "The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: Policies and facts," *Environ. Dev.*, vol. 15, no. 2015, pp. 3–34, 2015.
- [67] Ethiopian Electric Power Corporation, "Koshe Waste-to-Energy."
- [68] "SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO [SNIC]," 2010. .
- [69] "World Business Council for Sustainable Development." [Online]. Available: <https://www.wbcd.org/>.
- [70] M. MADLOOL, N.A; SAIDUR, R.; RAHIM N.A.; KAMALISARVESTANI, "An overview of energy savings measures for cement industries. Renewable and Sustainable Energy Reviews," 2013.
- [71] B. C. . SOARES, E. F.; GOMES, I.C.M.; DINIZ, "Etapas da implantação do sistema de coprocessamento de resíduos em uma indústria cimenteira," *CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA CONTECC*, 2015. .
- [72] Associação Brasileira de Cimento Portland, "Panorama do Coprocessamento – Brasil 2015," 2015.
- [73] "Associação Brasileira de Cimento Portland." [Online]. Available: <https://abcp.org.br/>.
- [74] E. L. USON, A.A; SABIRO, A.M.L; FERREIRA, G; SASTRESA, *Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23. 2013, pp. 242–260.

- [75] Pembina Institute, "Alternative Fuel Use in Cement Manufacturing - Implications, opportunities and barriers in Ontario. In: Workshop on Alternative Fuels in Cement Kilns. Pembina Institute and Environmental Defense," Canada, 2014.
- [76] A. KADDATZ, K.T, RASUL, M.G., RAHMAN, "Alternative fuels for use in cement kilns: process impact modeling. *Procedia Engineering*," 56, pp. 413–420, 2013.
- [77] Antônio Augusto Melo Malard, "AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO SETOR DE COPROCESSAMENTO NO ESTADO DE MINAS GERAIS," UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2016.
- [78] Global Status Report, "Renewable Energy Policy Network for the 21st Century," 2011.
- [79] Lohri C., "Feasibility Assessment Tool for Urban Anaerobic Digestion in Developing Countries. A participatory multi-criteria assessment from a sustainability perspective applied in Bahir Dar, Ethiopia," MSc Thesis at Wageningen University, The Netherlands and Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag). Dübendorf, Switzerland., 2012.
- [80] Eurostat, "Each person in the EU generated 481 kg of municipal waste in 2013," no. March, pp. 54–56, 2015.
- [81] Environmental Protection Agency, "Advancing sustainable materials management: 2013 fact sheet," 2013.
- [82] Environmental Protection Agency, "Local government climate and energy strategy guides-landfill gas energy: a guide to developing and implementing greenhouse gas reduction programs. National Service Center for Environmental Publications (NSCEP)," 2012.
- [83] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), "Waste/ municipal waste," 2015.
- [84] Australian Government, "Department of the environment. National Waste Reporting 2013," 2015.
- [85] Australian Bureau of Statistics, "Waste," 2015.
- [86] Arena Union, "Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review," *Waste mang*, 2012.
- [87] G. G. Panepinto D, Tedesco V, Brizio E, "Environmental performances and energy efficiency for MSW gasification treatment," *Waste Biomass-Valoriz*, 2015.
- [88] H. Wang, L. Wang, and A. Shahbazi, "Life cycle assessment of fast pyrolysis of municipal solid waste in North Carolina of USA," *J. Clean. Prod.*, vol. 87, pp. 511–519, 2015.
- [89] D. Chen, L. Yin, H. Wang, and P. He, "Reprint of : Pyrolysis technologies for municipal solid waste : A review q," *Waste Manag.*, vol. 37, pp. 116–136, 2015.
- [90] M. M. Pedroza *et al.*, "APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM PROCESSO DE PIRÓLISE," *Rev. Bras. Energias Renov.*, 2017.
- [91] H. P. Chen D, Yin L, Wang H, "Pyrolysis technologies for municipal solid waste: a review. *Waste Manag* 2014;34:2466–86.," *Waste Manag*, 2014.
- [92] L. M. Luz FC, Rocha MH, Lora EES, Venturini OJ, Andrade RV, "Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil," *Energy Convers Manag*, 2015.

- [93] M. Asadullah, “Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;29:201–15.,” *Renew Sustain Energy Rev*, 2014.
- [94] A. Magrinho, F. Didelet, and V. Semiao, “Municipal solid waste disposal in Portugal,” *Waste Manag.*, vol. 26, no. 12, pp. 1477–1489, 2006.
- [95] S. Ferreira, N. A. Moreira, and E. Monteiro, “Bioenergy overview for Portugal,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no. 11, pp. 1567–1576, 2009.
- [96] M. Margallo Blanco, “Life cycle model of waste to energy technologies in Spain and Portugal,” *Univ. Cantab.*, p. 217, 2014.
- [97] Agência Portuguesa do Ambiente, “Relatório Anual Resíduos Urbanos 2018,” Amadora, 2019.
- [98] Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos, “Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal 2019,” 2019.
- [99] Valorsul, “Valorsul,” 2020. [Online]. Available: <http://www.valorsul.pt/>.
- [100] Valorsul, “Relatório e Contas 2018,” pp. 239–243, 2019.
- [101] Lipor, “Lipor,” 2020. [Online]. Available: <https://www.lipor.pt/pt/>?
- [102] Lipor, “Relatório e Contas 2018,” 2018.
- [103] A. Ramos, C. A. Teixeira, and A. Rouboa, “Environmental analysis of waste-to-energy-a Portuguese case study,” *Energies*, vol. 11, no. 3, pp. 1–26, 2018.
- [104] Águas e Resíduos da Madeira, “Relatório e Contas 2016,” 2017.
- [105] Águas e Resíduos da Madeira, “Arm,” 2020. [Online]. Available: <http://www.aguasdmadeira.pt/Inicio.aspx>.
- [106] AVE – Gestão Ambiental e Valorização Energética, “Apresentação Pública do Estudo ‘13 anos de Coprocessamento em Portugal,’” 2018. [Online]. Available: <https://www.ave.pt/2019/04/13/apresentacao-publica-do-estudo-13-anos-de-coprocessamento-em-portugal/>.

# Anexo A: Descrição dos Parâmetros da Matriz de Decisão

Neste anexo está explicado de forma mais detalhada os parâmetros da matriz de decisão, evidenciando a importância de cada um deles para as diferentes tecnologias *Waste-to-Energy* [29].

## 1. Nível geral da gestão de resíduos

Um requisito básico para a implementação bem-sucedida da WTE é a existência de uma gestão avançada de resíduos. Um sistema baseado na recolha e tratamento separado de diferentes fontes e de fluxos de resíduos. Resíduos como Biomassa de cozinhas e resíduos de jardins são digeridos e ou compostados. Os materiais recicláveis, como papel, cartão, PET, vidro e metais são classificados e direcionados para a indústria de reciclagem. A gestão de resíduos perigosos é controlada. As frações remanescentes de RSU que não podem ser recicladas são depositadas num aterro controlado.

A experiência internacional indica que a implementação de coprocessamento e gás de aterro de última geração pode ser bem-sucedida se uma recolha sistemática de resíduos existir e alguns fluxos de resíduos selecionados, como pneus ou biomassa, puderem ser direcionados para as instalações. A digestão anaeróbica requer uma recolha separada de biomassa, pois qualquer contaminação com outras frações de RSU pode causar problemas no processo e no uso dos resíduos da digestão na agricultura. Nesse nível de gestão de resíduos, a adequação da incineração deve ser avaliada em detalhe antes de um projeto ser iniciado. Algumas melhorias no sistema de gestão de resíduos podem ser requeridas.

Se faltar reciclagem sistemática, a captura de gás de aterro pode ser uma opção viável que não requer substancial melhoria do nível geral de MSWM.

Devido às experiências limitadas e aos altos custos de capital e operação, a aplicabilidade e o planeamento da pirólise dos projetos de gaseificação devem ser considerados com muito cuidado em todos os níveis de MSWM.

## 2. Composição dos resíduos

A separação dos RSU na fonte nos domicílios é a melhor condição prévia para reciclagem e também para WTE. Os resíduos minerais perigosos e volumosos devem ser recolhidos e tratados separadamente.

Como já mencionado, para a digestão anaeróbica é necessária uma recolha separada de resíduos orgânicos. A digestão anaeróbica não é uma opção se os resíduos recolhidos separadamente forem misturados com minerais ou substâncias perigosas, mesmo em pequenas quantidades.

Se os RSU são misturados regularmente com frações perigosas e minerais, a adequação de cada tecnologia WTE deve ser avaliada com frequência. Devem ser iniciadas medidas para melhorar a separação de resíduos na fonte (por exemplo, recolha seletiva, tratamento de resíduos de construção e demolição). A recolha de gás de aterro permanece relevante quando os aterros sanitários contêm níveis significativos de resíduos orgânicos.

### 3. Valor calorífico dos RSU para processos térmicos e conteúdo orgânico

Deve-se garantir a combustão autotérmica (combustão autossustentável sem combustíveis adicionais) de RSU durante todo o ano para incineração e coprocessamento. A queima de petróleo, gás ou outros combustíveis é cara e deve ser aplicado apenas para iniciar o processo de combustão ou em caso de emergência. Para incineração e coprocessamento o valor calorífico é um indicador para decidir se o RSU é adequado para o processo. Um alto conteúdo mineral de resíduos de construção, vidro ou cinza, alto teor de metal ou alta humidade de resíduos de cozinha e de jardim reduzem o valor calorífico. Valores caloríficos  $> 8 \text{ MJ / kg}$  indicam que todas as tecnologias de combustão são opções adequadas para projetos WTE.

As tecnologias de incineração com estado avançado de secagem integrada são capazes de queimar RSU húmidos com um valor calorífico de cerca de  $7 \text{ MJ / kg}$ . Para coprocessar a humidade mínima aceitável, deve ser esclarecido e avaliada a tecnologias de secagem antes de iniciar um projeto WTE. Se o valor calorífico for  $< 7 \text{ MJ / kg}$  devido à humidade, para todas as tecnologias de combustão, o mínimo aceitável de humidade deve ser esclarecido e as tecnologias de secagem avaliadas. Quando o desperdício mineral é a principal razão de um baixo valor calorífico, a gestão geral de resíduos deve ser aprimorada primeiro antes de iniciar com as opções WTE.

O menor valor calorífico para processos térmicos não pode ser comparado diretamente com a recolha de LFG e a digestão anaeróbica.

No entanto, o conteúdo energético da matéria-prima orgânica para um digestor anaeróbico afeta o conteúdo energético do rendimento de biogás. Matérias-primas com maior teor de energia podem aumentar a qualidade do biogás. A eficiência da recolha de gás de aterro depende das condições existentes, incluindo a proporção de resíduos orgânicos depositados e a maneira como isso é estratificado.

### 4. Quantidades de resíduos adequados para WTE

A escolha de uma tecnologia WTE também depende das quantidades de resíduos disponíveis e dos mínimos de exigência da operação. Nesse contexto, "disponível" refere-se a frações de resíduos adequados que podem ser fornecidos a custos aceitáveis para a instalação e não podem ser reciclados economicamente. Uma central WTE deve também não causar um efeito de bloqueio da infraestrutura que desincentiva a construção de infraestruturas de reciclagem para os fluxos de resíduos afetados.

Se mais de 150.000 toneladas métricas de resíduos estiverem disponíveis por ano, todas as tecnologias são adequadas. No entanto, devido a limitadas experiências internacionais com pirólise e gaseificação, outras tecnologias são mais favoráveis.

Para quantidades de resíduos entre 50.000 e 150.000 toneladas métricas por ano, a relação custo-benefício da incineração deve ser avaliada cuidadosamente. Coprocessamento, recolha de gás de aterro e digestão anaeróbica são mais favoráveis.

Abaixo de 50.000 toneladas, a incineração é muito cara. A relação custo-benefício do coprocessamento pode ser afetada por preços baixos do carvão e do coque para animais de estimação. Se as quantidades de resíduos estiverem abaixo de 10.000 toneladas métricas por ano, a digestão anaeróbia pode ser a única tecnologia favorável se a qualidade da biomassa for aceitável.

A recolha de gás de aterro depende da quantidade de produtos orgânicos no aterro e ainda pode ser adequada como medida retroativa após o fecho do aterro, tornando este parâmetro menos relevante, desde que possa ser recolhido metano suficiente para tornar a tecnologia economicamente viável.

## 5. Operação eficiente das instalações de resíduos

As instalações de gestão de resíduos podem ser operadas pelo setor público, pelo setor privado ou em cooperação. Experiência nacional em aterros sanitários bem administrados, grandes estações de tratamento de águas residuais (setor público) e grandes instalações químicas ou de cimento (setor privado) indicam que sistemas complexos podem ser manipulados localmente.

Aprendendo com anteriores projetos falhados de gestão de resíduos, é claro que o WTE requer uma gestão experiente e uma equipa técnica bem treinada. A boa comunicação entre as entidades públicas e privados é uma condição prévia essencial.

Sobre essas condições, todas as tecnologias podem ser candidatas bem-sucedidas a um projeto WTE exceto pirólise e gaseificação devido à limitada experiência internacional com métodos heterogêneos de MSW.

A maioria das entidades exige conhecimento e formação para trabalhar com WTE, mesmo que possua experiência na gestão de infraestruturas de tratamento de resíduos. As fábricas de cimento geralmente são da propriedade de empresas internacionais com conhecimento interno de coprocessamento. A recolha de gás de aterro é tecnicamente a abordagem mais simples. Essas duas tecnologias são mais favoráveis até que o conhecimento sobre as outras tecnologias esteja disponível localmente.

Se as entidades públicas têm pouca experiência com o WTE e o recrutamento de pessoal nacional qualificado é difícil, a recolha de gás é a tecnologia mais favorável. A necessidade de capacidade de construção para coprocessamento e digestão anaeróbia deve ser avaliada cuidadosamente porque é mais fácil cobrir do que a incineração, pirólise e gaseificação.

Se nenhuma entidade pública ou privada tiver experiência com a operação dos sistemas WTE, a recolha de gás de aterro é a única oportunidade depois de alguma formação básica.

#### 6. Tempo e distância adicional de transporte da central de RSU para a central WTE

Além do acesso dos utilizadores finais à energia gerada, o impacto económico e ambiental de outras fontes e o esforço do transporte para as instalações da WTE deve ser levado em consideração. Cada quilómetro adicional de estrada para transporte de resíduos aumenta os custos de recolha, bem como o congestionamento e as emissões de gases de efeito estufa. Idealmente, a distância ou o tempo para o transporte rodoviário de resíduos será o mesmo que o existente na situação de gestão de resíduos ou menos.

Um aumento do tempo de transporte inferior a 1 hora ou distância adicional inferior a 50 km é visto como tolerável para WTE. Para um aumento do tempo de transporte adicional superior a 1 hora ou distância adicional de transporte maior que 100 km, o conteúdo energético dos resíduos transportados deve ser alto para ser economicamente e ambientalmente rentável. Para distâncias adicionais de transporte superiores a 200 km o transporte ferroviário seria o único meio de transporte legítimo, mas é difícil de gerir e possivelmente irreal para os RSU.

Os novos aterros sanitários devem levar em consideração a condicionante da distância, a fim de maximizar a eficiência da recolha.

#### 7. Comercialização e ou destino final de subprodutos do processo

Exceto o coprocessamento em fábricas de cimento e a recolha de gás de aterro, todas as outras tecnologias WTE geram subprodutos de processo. Se existir um mercado para subprodutos de processo e os subprodutos perigosos puderem ser depositados com segurança num aterro controlado próximo da planta WTE, todas as tecnologias poderão ser consideradas como candidatas a um projeto WTE.

Se nenhum mercado para subprodutos de processo for desenvolvido, mas todos os subprodutos de processo puderem ser depositados com segurança num aterro controlado próximo à central, a viabilidade económica da incineração, digestão anaeróbica e pirólise e gaseificação precisará de ser cuidadosamente avaliada. Coprocessamento e recolha de gás de aterro são mais favoráveis nessa situação.

A digestão anaeróbica não é viável se houver grandes distâncias de transporte para a venda do composto e sem perspectivas de mercado a longo prazo. O composto de alta qualidade resultante de fluxos de resíduos orgânicos bem segregados e controlados é uma parte importante disso.

## 8. Quadro jurídico e requisitos ambientais para o WTE

Uma estrutura legal abrangente e existente para gestão de resíduos é uma condição prévia para o sucesso da WTE. A legislação precisa incluir altos padrões ambientais para emissões para o ar, a água e o solo, odores e ruídos, além de requisitos de saúde e segurança. Também deve definir o papel da WTE num sistema integrado de gestão de resíduos. A legislação deve ser adaptada às circunstâncias nacionais e não apenas ser copiada de um país industrializado.

Mecanismos eficazes de aplicação devem minimizar práticas ilegais de gestão de resíduos para garantir o funcionamento da cadeia de suprimentos de resíduos nas instalações da WTE. No entanto, a legislação deve ter como objetivo a cooperação com o setor da logística de recolha. Normas internacionais sobre limites de emissões, monitoramento e execução devem ser garantidos. As autoridades públicas devem ser suficientemente treinadas e equipadas para garantir o cumprimento dos padrões ambientais.

Enquanto o coprocessamento e a recolha de gás de aterro se baseiam principalmente em instalações existentes que já são muitas vezes reguladas, a digestão anaeróbica, a pirólise e a incineração de resíduos exigem regulamentação mais específica.

Mudanças para permitir o coprocessamento de ponta e a recolha de gás de aterro sanitário geralmente precisam apenas da modificação de portarias e estatutos, o que tende a ser mais fácil do que o processo político para novas leis. Sob tais condições, o coprocessamento de ponta e a recolha de gás de aterro devem ser considerados tecnologias mais fáceis de implementar, enquanto outras tecnologias WTE exigem o desenvolvimento de estruturas legais mais extensas antes de prosseguir.

Em alguns países, existe um consenso político para adaptar o quadro jurídico à WTE. Dependendo do progresso na elaboração de uma estrutura legal abrangente, pode fazer sentido iniciar o processo de formulação ou alteração de leis e estatutos para coprocessamento, recolha de gás de aterro e digestão anaeróbica como tecnologias favoráveis.

Em alguns países, o tratamento térmico de resíduos é proibido, excluindo o coprocessamento, incineração, pirólise e gaseificação. A tecnologia WTE só pode ser considerada apropriada se não contradizer a hierarquia de resíduos ou a estratégia geral de gestão de resíduos de um país ou estado.

## 9. Financiamento da Gestão de RSU

A disponibilidade consistente de meios financeiros é crucial para a aplicação a longo prazo das tecnologias WTE. Deve-se supor que os projetos de WTE levarão a custos de tratamento mais altos do que para aterros sanitários. As Tabelas 6 a 11 mostram os custos líquidos significativos por tonelada de resíduos para projetos típicos de WTE nas cinco tecnologias.

Antes de considerar a WTE como uma oportunidade, os municípios devem poder cobrir totalmente os custos de recolha e deposição de RSU num aterro controlado; meios financeiros adicionais para cobrir custos adicionais devem ser facilmente acessíveis. A longo prazo, é desejável uma taxa para produtores de resíduos com base no princípio do poluidor-pagador, enquanto os custos atuais de gestão podem ser cobertos principalmente pelo orçamento do município. Em particular, aumentar a taxa de aterro pode tornar mais viáveis outras opções de gestão de resíduos.

Se o aumento da taxa de resíduos não for aplicável ou os municípios não quiserem ou não puderem aumentar o orçamento, é essencial uma avaliação detalhada dos custos por especialistas independentes e ou a busca de financiamento alternativo a longo prazo por meio de instrumentos de financiamento alternativos antes de iniciar um projeto WTE. Onde as opções de financiamento de longo prazo não são estabelecidas, poderão resultar na paralisação das operações ou em custos adicionais indesejados para o município.

#### 10. Acesso a peças de substituição

Se as peças de substituição puderem ser adquiridas localmente e não existirem restrições para a compra no estrangeiro, todo o WTE poderá ser considerado.

Quando a maioria das peças de substituição pode ser adquirida localmente e os escritórios de vendas estão disponíveis localmente para a importação de peças de substituição, o custo esperado deve ser avaliados antes de iniciar um projeto WTE. A recolha de gás de aterro é vista como a menos crítica.

Se a tecnologia-chave da planta WTE precisar ser importada ou se houver atraso no acesso às compras de peças de substituição, a incineração, a pirólise e a gaseificação não devem ser escolhidas. Sem acesso a peças de substituição importadas, a captação de gás de aterro pode ser a única opção, mas também irá exigir uma avaliação de custos.

#### 11. Acesso dos utilizadores finais à energia produzida nas centrais WTE

A escolha de um local para uma instalação de WTE depende, entre outras coisas, do acesso dos utilizadores finais à energia. A escolha do local e das receitas deve ser revisto antes de iniciar o projeto. As áreas industriais podem beneficiar da energia gerada, calor ou biogás. Os investimentos em aquecimento urbano para o fornecimento de vapor de processo são altos, mas também geram uma renda valiosa. Gás de aterro ou biogás de instalações de digestão anaeróbica podem ser alimentados numa rede de gás se um gasoduto estiver por perto. A substituição do diesel pelo biogás ou LFG como combustível para o transporte também é uma opção valiosa. O local para recolha e coprocessamento de gás de aterro sanitário é normalmente predefinido pelos respetivos aterros, cimento ou centrais de energia existentes.

Se o projeto estiver localizado em áreas com pouca ou nenhuma demanda de calor ou gás, as receitas da venda de energia serão menores. A transformação de todo o calor em eletricidade é uma opção, mas não a mais económica, pois a taxa de eficiência é

muito menor do que o uso direto de gás ou vapor. Locais com uma fraca conexão com os usuários finais de energia são substancialmente prejudicados para a WTE, pois isso implica o uso limitado de energia recuperada e o aumento dos custos operacionais líquidos.

## 12. Incentivos à produção de energia com baixas emissões de carbono

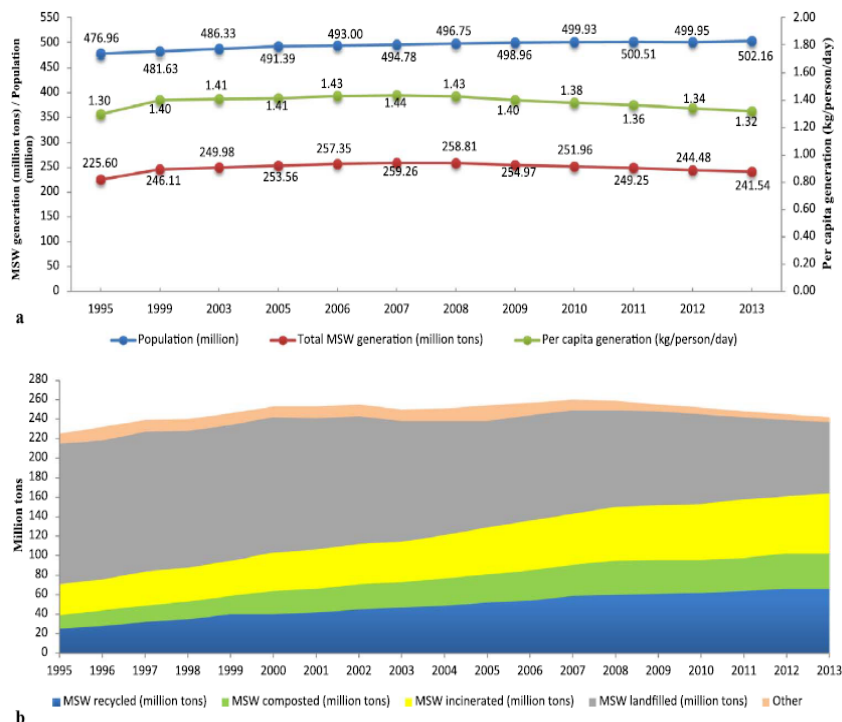
A venda de energia proveniente de resíduos, ou seja, energia, gás e calor, está sujeita a preços competitivos no mercado por flutuações no preço de combustíveis fósseis convencionais, como petróleo, carvão e gás. Quando isso acontece, a viabilidade económica da central fica ameaçada, tornando necessário um rendimento seguro para a energia das centrais WTE para garantir uma renda estável e de longo prazo para a gestão de resíduos. Os incentivos regulatórios (como alimentação de tarifas) para a geração de energia com baixo carbono não apenas apoiarão a WTE, mas também poderão contribuir para as metas nacionais definidas nas CDN (Contribuições Determinadas Nacionalmente) do Acordo de Paris sobre Mudanças Climáticas.

Uma aplicação já bem-sucedida de incentivos à energia de baixo carbono indica um bom potencial para todas as tecnologias WTE. Se eles existem, mas ainda não foram aplicados, a eficácia dos incentivos à incineração, digestão anaeróbica, pirólise e gaseificação deve ser avaliados primeiro.

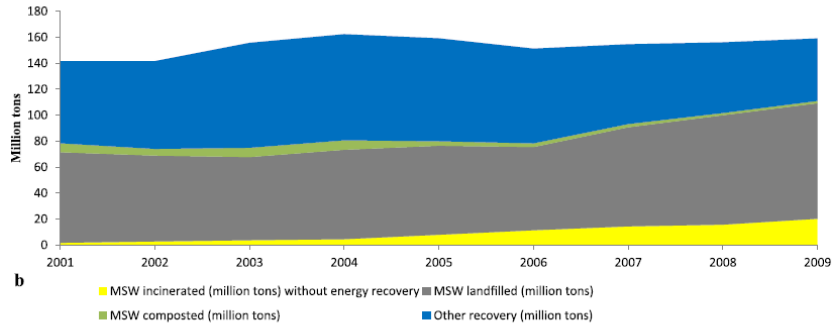
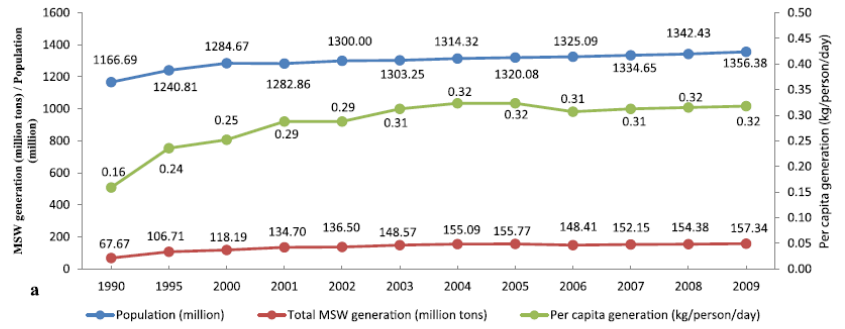
Sem uma perspectiva realista para incentivos, todas as centrais de WTE devem ser classificadas como de risco.

## Anexo B: Níveis de Produção e Encaminhamento dos Resíduos Sólidos Urbanos

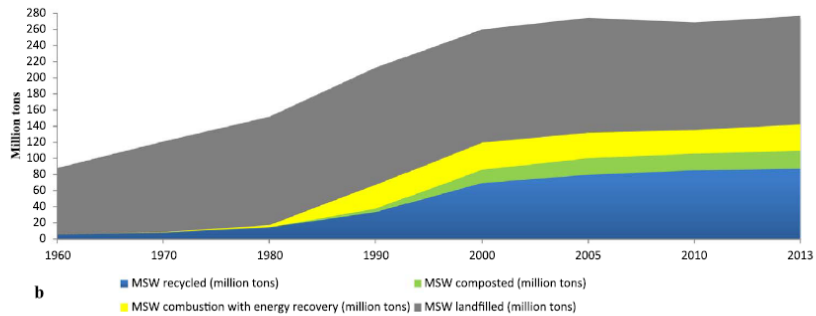
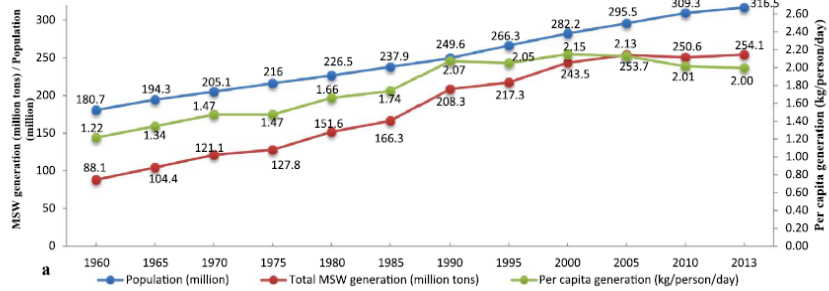
Este anexo contém a informação relativa aos níveis de produção e ao encaminhamento dado aos resíduos sólidos urbanos nos diferentes países abordados no capítulo 4 [85], [65], [64], [81].



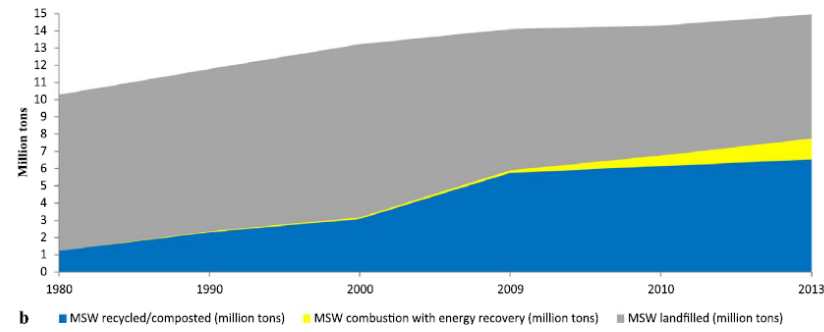
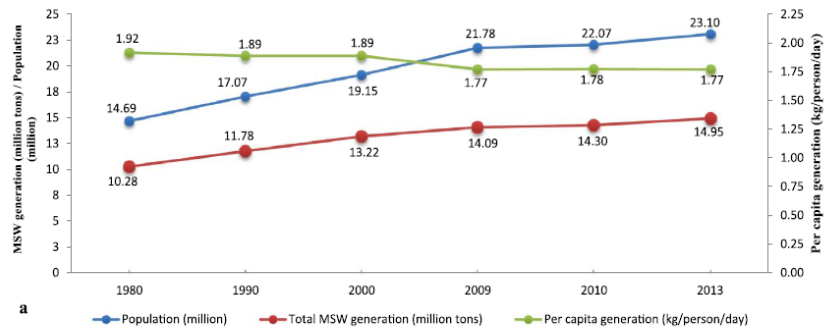
a) Population (in million), total MSWs generation (in million tons) and MSWs generation per capita ( $\text{kg person}^{-1} \text{ day}^{-1}$ ) in the European Union (EU)-27 (1995–2013). b) Changes in the contribution of different MSWs treatment options in the European Union (EU)-27 (1995–2013).



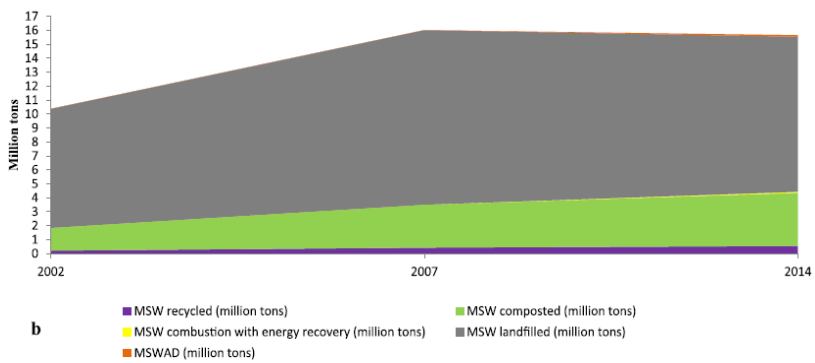
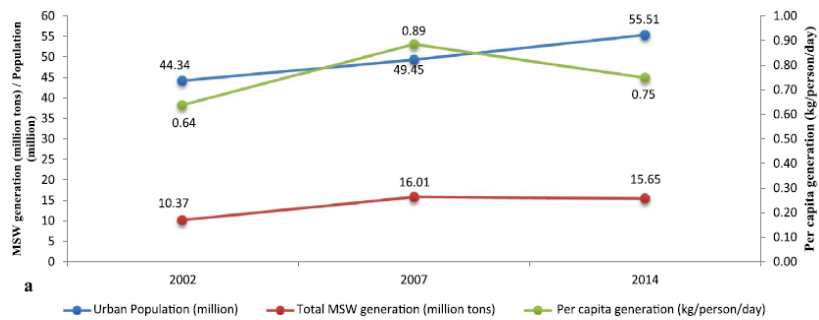
a) Population (in million), total MSWs generation (in million tons) and MSWs generation per capita ( $\text{kg person}^{-1} \text{day}^{-1}$ ) in China (1990–2009). b) Changes in the contribution of different MSWs treatment options in China (2001–2009).



a) Population (in million), total MSWs generation (in million tons) and MSWs generation per capita ( $\text{kg person}^{-1} \text{day}^{-1}$ ) in the USA (1960–2013). b) Changes in the contribution of different MSWs treatment options in the USA (1960–2013).



a) Population (in million), total MSWs generation (in million tons) and MSWs generation per capita ( $\text{kg person}^{-1} \text{ day}^{-1}$ ) in Australia (1980–2013). b) Changes in the contribution of different MSWs treatment options in Australia (1980–2013).



a) Population (in million), total MSWs generation (in million tons) and MSWs generation per capita ( $\text{kg person}^{-1} \text{ day}^{-1}$ ) in Iran (2002–2014). b) Changes in the contribution of different MSWs treatment options in Iran (2002–2014).

## Anexo C: Tabela Comparativa dos Sistemas de Gestão de Resíduos Urbanos Portugueses

SGRU	Produção RU (t)	Preparação para reutilização e reciclagem (%)	Deposição de RUB em aterro (%)	Retomas de Recolha Seletiva (kg/hab.ano)
ALGAR	405 229	22%	81%	81
AMARSUL	436 868	32%	57%	33
Ambilital	65 138	45%	46%	46
Ambisousa	140 227	10%	93%	28
Amcal	13 181	58%	32%	57
BRAVAL	119 504	22%	50%	57
Ecoleziria	59 420	78%	0%	22
ERSUC	412 539	80%	3%	37
Gesamb	82 853	54%	40%	38
Lipor	522 718	36%	2%	48
Planalto Beirão	132 020	14%	87%	25
Resialentejo	46 155	29%	70%	43
Resíduos Nordeste	59 197	77%	3%	20
RESIESTRELA	76 381	73%	13%	28
RESINORTE	375 186	43%	50%	36
Resitejo	92 494	87%	1%	51
RESULIMA	136 806	15%	89%	40
SULDOURO	197 999	26%	74%	34
Tratolixo	453 983	52%	8%	38
VALNOR	118 198	73%	12%	40
VALORLIS	127 207	42%	54%	37
VALORMINHO	38 974	13%	90%	44
VALORSUL	832 350	36%	23%	50