

**Avaliação técnica e económica da aplicação de
sistemas Waste to Energy no tratamento de resíduos
urbanos em aglomerados de média e pequena
dimensão**

João Miguel Cunha Neves Abrantes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Professor João Torres de Quinhones Levy

Júri

Presidente: Prof. Doutor António Alexandre Trigo Teixeira

Orientador: Prof. Doutor João Torres de Quinhones Levy

Vogal: Eng.º Artur João Lopes Cabeças

Vogal: Eng.ª Filipa Maria Santos Ferreira

Setembro de 2016

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu agradecimento às pessoas que contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação, em particular:

Ao Prof. Doutor João Torres de Quinhones Levy pela orientação e disponibilidade prestadas.

À Eng.^a Maria Ekstrom e à Direcção Técnica da TERAMB pela colaboração e fornecimento de dados.

Às Eng.^a Ana Penha e Eng.^a Sofia Mota da VALORSUL pela colaboração.

Resumo

Por dia são produzidos em Portugal 12.600 toneladas de resíduos urbanos. O tratamento térmico (com incineração) representa cerca de 22% do destino final dos resíduos produzidos, o que permite reduzir em cerca de 2.000 toneladas a quantidade de resíduos encaminhada para aterro diariamente. Estimou-se para cinco instalações de incineração de resíduos urbanos o custo efectivo do tratamento em Portugal. Os custos foram analisados num domínio de capacidade amplo (aproximadamente entre 120 e 2.000 t/dia). Verificou-se que os custos do tratamento reflectem um efeito de economia de escala (com um factor de escala igual a 0,6), situando-se entre os 27.7 e 21.8 €/t para as unidades da VALORSUL e LIPOR; e entre 72.5 e 39.1 €/t para as unidades que constituem 3 dos sistemas de gestão municipais existentes nas regiões autónomas da Madeira e Açores (ARM, AMISM e TERAMB). Recentemente tem aumentado o nível de instalação de unidades providas de tecnologia Energos® (sistema de gaseificação), sobretudo no Reino Unido e Noruega. Concluiu-se que, para este sistema, o custo efectivo de tratamento era idêntico à da unidade de incineração convencional existente na Ilha Terceira (67,6 €/t), para uma mesma capacidade de projecto (40 kt/ano) e PCI (8 MJ/kg). De facto, o custo total (sem receita) é superior, mas se se tiver em conta a produção de energia, os custos de ambos os sistemas equilibram-se, o que demonstra que em regiões em que sejam requeridos sistemas de escalas reduzidas, a gaseificação, em particular, a tecnologia Energos®, apresenta-se como uma alternativa viável técnica e economicamente.

Palavras-chave: *Waste-to-Energy, valorização energética, resíduos urbanos, custos de tratamento, Tratamentos Térmicos Avançados (TTA)*

Abstract

Per day are produced in Portugal 12.600 tons of Municipal Solid Waste (MSW). The thermal treatment (incineration) represents about 22% of the final destination of the waste produced, which reduces by about 2,000 tons the amount of waste disposed daily to landfill. It was estimated for five municipal waste incineration facilities in Portugal the *levelized costs*. The thermal treatment costs were analyzed in a wide-ranging values of capacities (approximately between 120 and 2.000 t/day). It was found that the treatment cost reflect the economy of scale (with an exponent factor of n equals to 0.6), ranging between 27.7 and 21.8 €/t for VALORSUL and LIPOR facilities; and between 72.5 and 39.1 €/t for the units that constitutes 3 municipal systems existing in the regions of Madeira and Azores (ARM, AMISM and TERAMB). Recently have increased the level of installation of Energos® technology units (gasification system), especially in the UK and Norway. It was concluded that, for this system, the actual cost of treatment is identical to that of conventional incineration existing in Terceira Island (67.6 €/t) for the same inflow capacity (40 kt/year) and LHV (8 MJ/kg). In fact, the total cost (non-revenues accounted) is higher, but if one takes into account the energy production, both systems costs are similar, which shows that in regions where the small scales systems are required, gasification, in particular Energos® technology, is presented as a viable technical and economically alternative.

Keywords: *Waste-to-Energy, incineration, MSW, treatment costs, Advanced Thermal treatments (ATT)*

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivação e objectivos	1
1.2	Metodologia.....	2
1.3	Estrutura.....	4
2	Gestão de resíduos urbanos.....	5
2.1	Enquadramento.....	5
2.2	Padrões de produção e caracterização física dos RU.....	6
2.3	Análise dos RU como objecto de valorização – metas e objectivos gerais.....	8
2.4	Legislação aplicável	12
2.5	Operações básicas de gestão de resíduos.....	15
2.6	Destino final – tratamentos e dados	16
3	O tratamento térmico de resíduos.....	18
3.1	Enquadramento.....	18
3.2	Evolução dos sistemas de tratamento térmico	20
3.3	Tipos de tratamentos	21
3.4	Processos termoquímicos envolvidos.....	23
3.4.1.	Enquadramento.....	23
3.4.2.	Combustão.....	24
3.4.3.	Gaseificação	24
3.4.4.	Pirólise.....	25
3.5	Capacidade dos sistemas	26
4	Tecnologias WtE	28
4.1	Sistemas de conversão térmica.....	28
4.1.1.	Enquadramento.....	28
4.1.2.	Grelha Móvel.....	28
4.1.3.	Leito Fluidificado	29
4.1.4.	Forno Rotativo.....	31

4.2	Sistemas de produção de energia e controlo de emissões	32
4.2.1.	Enquadramento.....	32
4.2.2.	Sistemas aplicáveis em regime de combustão.....	33
4.2.3.	Sistemas aplicáveis em TTA.....	34
4.2.4.	Co-geração	37
4.2.5	Controlo de emissões	37
4.3	Factor de eficiência energética R1	38
5	Custos dos sistemas de tratamento convencionais em Portugal	40
5.1	Enquadramento.....	40
5.2	Estimação de custos e receitas	41
5.3	Dados	44
5.4	Custos dos sistemas de dimensão >1 100 t/dia	48
5.4.1	Caracterização dos sistemas.....	48
5.4.1.1	VALORSUL	48
5.4.1.2	LIPOR.....	49
5.4.2	Resultados	49
5.5	Custos dos sistemas de dimensão <1 100 t/dia	53
5.5.1	Caracterização dos sistemas.....	53
5.5.1.1	Ilha da Madeira	53
5.5.1.2	Ilha de S. Miguel	53
5.5.1.3	Ilha Terceira	54
5.5.2	Resultados	54
6	Custos de sistemas de tratamento térmico avançado	59
6.1	Enquadramento.....	59
6.2	Estimação dos Custos	62
6.3	Estimação da Receita	63
6.3.1	Parâmetros técnico-económicos.....	63
6.3.2	Pressupostos técnico-financeiros	63
6.3.3	Desempenho energética	64
6.4	Resultados	67
7	Análise comparativa de tecnologias WtE.....	69
7.1	Enquadramento.....	69
7.2	Custos de investimento.....	70

7.3	Custos totais do tratamento	72
7.4	Desempenho energético	74
7.5	Receita e Custo efectivo	76
8	Conclusões.....	79
8.1	Discussão de resultados	79
8.2	Trabalhos futuros	80
	Referências Bibliográficas	81

Índice de Quadros

Quadro 2.1: Caracterização física média e PCI dos RU produzidos: (a) Vainikka et al. (2012), (b) OCDE e (c) Portugal	7
Quadro 2.2: Tratamentos típicos aplicáveis a uma massa de resíduos urbanos.	16
Quadro 3.1: Domínio de aplicação das principais tecnologias de tratamento térmico de resíduos implementadas na Europa.....	22
Quadro 3.2: Condições típicas das reacções e produtos gerados durante os processos de pirólise, gaseificação e combustão. Adaptado de European IPPC Bureau (2006).	23
Quadro 4.1: Tecnologia de grelha móvel. Descrição do processo de conversão térmica.	29
Quadro 4.2: Tecnologia de leito fluidificado estacionário. Descrição do processo de conversão térmica.	30
Quadro 4.3: Tecnologia de leito fluidificado com circulação. Descrição do processo de conversão térmica.	31
Quadro 4.4: Tecnologia de forno rotativo. Descrição do processo de conversão térmica.	31
Quadro 4.5: Tecnologias de transformação de energia.	33
Quadro 4.6: Caracterização dos sistemas de transformação de energia decorrentes da incineração em função do tipo de energia produzida.	34
Quadro 4.7: Caracterização dos sistemas de transformação de energia decorrentes dos sistemas de gasificação/pirólise em função do tipo de energia produzida.	35
Quadro 5.1: Custos operacionais fixos e variáveis (a preços de 2016). Adaptado de EIA (2013).....	42
Quadro 5.2: Pressupostos de cálculo de estimação do custo anual de amortização e factor de amortização	43
Quadro 5.3: Parâmetros técnico-financeiros para determinação de «electricidade vendida». Adaptado de Lettieri et al. (2010).....	45
Quadro 5.4: Pressupostos técnico-financeiros para determinação de «electricidade vendida»	47
Quadro 5.5: Características das unidades de incineração existentes em Portugal Continental: VALORSUL e LIPOR	48
Quadro 5.6: Custo de investimento das unidades de valorização energética da VALORSUL e LIPOR (a preços de 2016).....	49
Quadro 5.7: Característica das unidades de incineração existentes em Ilha da Madeira, Ilha de São Miguel e Ilha Terceira	53
Quadro 5.8: Custo de investimentos das unidades de valorização energética existentes em Ilha da Madeira, Ilha São Miguel e Ilha Terceira (a preços de 2016)	54

Quadro 6.1: Estimação de custos de uma unidade de gaseificação de tecnologia de Leito fixo: Energos® type 41 (a preços de 2016).....	60
Quadro 6.2: Estimação de custos de uma unidade de pirólise de tecnologia de Forno rotativo: Thermostelect® (a preços de 2016).....	61
Quadro 6.3: Pressupostos técnico-financeiros para determinação da «electricidade vendida»	64
Quadro 7.1: Funções de custos de investimento aproximadas de unidades WtE em Portugal e na Europa (a preços de 2016)	71
Quadro 7.2: Comparação dos custos do tratamento térmico na unidade WtE da Ilha Terceira e Energos com capacidade de 40 kt/ano (a preços de 2016)	74
Quadro 7.3: Custo efectivo do tratamento térmico nas unidades WtE em Portugal (a preços de 2016) ...	77
Quadro 7.4: Comparação do custo efectivo do tratamento térmico na unidade WtE da Ilha Terceira e Energos com capacidade de 40 kt/ano (a preços de 2016).....	78

Índice de Figuras

Fig. 2.1: Nível de cumprimento das metas definidas no Persu I para 2005. Adaptado de PERSU II	6
Fig. 2.2: Produção e capitação de resíduos em Portugal continental. APA (2014)	10
Fig. 2.3: Destino final dos resíduos urbanos em países Europeus. Adaptado de Hoornweg e Bhada-Tata (2012)	11
Fig. 2.4: Operações de gestão de resíduos (DL n.º 73/2011) e respectivos tratamentos aplicáveis a uma massa de resíduos urbanos.	15
Fig. 2.5: Destino final directo dos resíduos em Portugal Continental. Adaptado de APA (2014)	17
Fig. 3.1: Fases de um sistema de tratamento térmico. Diagrama adaptado de Leckner (2014). Fontes: Fitzgerald (2013), Michael (2013), DL n.º 85/2005	19
Fig. 4.1: Principais sistemas de conversão térmica. (a) grelha móvel, (b) leito fluidificado (continua). Adaptado de Leckner (2014); GECF (2016).	29
Fig. 4.2: Principais sistemas de conversão térmica (continuação). (c) forno rotativo. Adaptado de Leckner (2014); GECF (2016).	32
Fig. 4.3: Representação esquemática de uma turbina a vapor. Adaptado de FEAM (2012)	34
Fig. 4.4: Representação esquemática de uma turbina a gás. Adaptado de Wärtsilä (2016)	36
Fig. 4.5: Representação esquemática de um motor a gás. Fases do ciclo de Otto. Adaptado de Maybach (2012)	36
Fig. 4.6: Sistema de tratamento dos gases de combustão. Adaptado de EPEM (2014)	38
Fig. 5.1: Custo de investimento das unidades de valorização energética da VALORSUL e LIPOR (a preços de 2016)	50
Fig. 5.2: Custos totais do tratamento térmico na unidade de valorização energética da VALORSUL (a preços de 2016)	51
Fig. 5.3: Custos totais do tratamento térmico na unidade de valorização energética da LIPOR (a preços de 2016)	51
Fig. 5.4: Custo efectivo (inc. receita) do tratamento térmico na unidade de valorização energética da VALORSUL (a preços de 2016)	52
Fig. 5.5: Custo efectivo (inc. receita) do tratamento térmico na unidade de valorização energética da LIPOR (a preços de 2016)	52
Fig. 5.6: Custo de investimento das unidades de valorização energética da Ilha Terceira, São Miguel e Ilha da Madeira (a preços de 2016)	55
Fig. 5.7: Custos totais do tratamento térmico na unidade de valorização energética de Ilha da Madeira (a preços de 2016)	57
Fig. 5.8: Custos totais do tratamento térmico nas unidades de valorização energética da Ilha Terceira e São Miguel (a preços de 2016)	57
Fig. 5.9: Custo efectivo (inc. receita) do tratamento térmico na unidade de valorização energética de Ilha da Madeira (a preços de 2016)	58

Fig. 5.10: Custo efectivo (inc. receita) do tratamento térmico nas unidades de valorização energética da Ilha Terceira e Ilha São Miguel (a preços de 2016)	58
Fig. 6.1: Simulação do desempenho energético de uma unidade de tratamento Energos® pelo método proposto em Lettieri et al. (2010) de acordo com os pressupostos técnico-financeiros do Quadro 6.3.....	66
Fig. 7.1: Custos de investimento das unidades WtE em Portugal e na Europa.	71
Fig. 7.2: Custos totais do tratamento térmico nas unidades WtE em Portugal.....	73
Fig. 7.3: Comparação dos custos do tratamento térmico nas unidades WtE em Portugal e Energos com capacidade inferior a 150 kt/ano	73
Fig. 7.4: Valores de electricidade vendida por parte das unidades WtE em Portugal.....	75
Fig. 7.5: Comparação dos valores de electricidade vendida por parte das unidades WtE em Portugal e Energos® com capacidade inferior a 150 kt/ano	75
Fig. 7.6: Custo efectivo e receita do tratamento térmico nas unidades WtE em Portugal.....	76
Fig. 7.7: Comparação do custo efectivo do tratamento térmico nas unidades WtE em Portugal e Energos® com capacidade inferior a 150kt/ano	78

Glossário

AMISM – Associação Municipal de Municípios de São Miguel

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

ARM – Água e Resíduos da Madeira

CDR – Combustíveis Derivados de Resíduos

CE – Comissão Europeia

CHP – *Combined Heat and Power*

GEE – Gás de Efeito de Estufa

HRSG – *Heat Recovery Steam Generator*

INE – Instituto Nacional de Estatística

PCI – Poder calorífico inferior

PERSU – Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos

PNGR – Plano Nacional de Gestão de Resíduos

RU – Resíduos Urbanos

TTA – Tratamentos térmicos avançados

VLE – Valor limite de emissão

WtE – *Waste to Energy*

1 Introdução

1.1 Motivação e objectivos

Em Portugal são produzidos 14,3 milhões de toneladas de resíduos anualmente. Dos quais 32% correspondem a resíduos urbanos ou equiparados. O quadro europeu de políticas de gestão de resíduos, nomeadamente, a directiva «aterros» ou o «princípio da hierarquia de resíduos» têm favorecido a implementação de opções de tratamento de valorização de resíduos em detrimento do encaminhamento para aterro sanitário. Em Portugal, apesar do quadro de evolução nesta matéria ser positivo, a solução adoptada em termos de destino final, destes resíduos, tem recaído predominantemente sobre encaminhamento para aterro sanitário (cerca de 43%), sendo a «incineração» o destino final de 22% dos resíduos produzidos. Porém, este traduz as políticas de gestão nos grandes centros urbanos, uma vez que o tratamento por incineração convencional de resíduos se encontrava até há pouco tempo praticamente circunscrito às grandes áreas metropolitanas de Lisboa e do Porto.

Nos termos actuais, a incineração de resíduos tende a ser considerada uma opção de valorização, visto que os sistemas de incineração permitem actualmente aproveitar de forma eficaz o poder calorífico armazenado nos resíduos. Deve particularizar-se que de forma geral, os sistemas de tratamento térmico actualmente disponíveis continuam a representar sucessivos avanços tecnológicos, designadamente, ao nível das formas de obtenção de energia e controlo de emissões e produtos de refugo. Assim, tem vindo a cair em desuso o termo «incineração», tendo vindo este a ser substituído por «Waste to Energy» (WtE) ou «Energy from Waste» (EfW). Ou seja, o foco destes sistemas deixou de ser a estrita eliminação de resíduos, a par dos aterros sanitários, uma vez que estes passaram a representar sistemas de transformação de energia (valorização energética), com maiores níveis de eficiência associados. É notável que a intercalação destes sistemas na hierarquia de resíduos tem sido alvo de debate por parte das entidades gestoras de resíduos de diversos países (e.g. Reino Unido). (DEFRA, 2014)

Estabelecido este princípio é de realçar que o foco desta dissertação é o processo decorrente entre o estado físico da matéria (resíduo) e a sua potencial valorização sob a forma de um produto consumível (energia).

Encontra-se ainda em fase de desenvolvimento um nicho de mercado relativo aos sistemas de tratamento térmico de pequena escala, denominados tratamentos térmicos avançados (TTA), com uma taxa de recepção de resíduos ditos de «pequena escala», i.e. inferiores a 100.000 toneladas por ano, sendo a sua capacidade, por vezes, inferior a 20.000 t/ano. Estes sistemas, assentes sobretudo em processos de gaseificação e/ou pirólise, representam uma alternativa aos sistemas de incineração

convencionais, apropriados tanto operar em sistemas de grande escala como pequena escala (desde as 20.000 t/ano podendo atingir 1000.000 t/ano).

A implementação de soluções de «pequena escala», veja-se por exemplo o caso de países como Finlândia ou Dinamarca, traduz um modelo de gestão de resíduos que se aproximam mais de uma abordagem local. Por oposição, por exemplo, à incineração de resíduos em Portugal afecta aos grandes centros urbanos, com sistemas capacitados para processar cerca de 300.000 (Porto) ou 600.000 (Lisboa) toneladas por ano. Porém, deve notar-se que no seguimento daquilo que tem sido a proliferação deste tipo de sistemas por toda a Europa, também em Portugal têm surgido novos projectos no sentido de implementar unidades de valorização energética de pequena escala, nomeadamente, na Ilha de São Miguel e Ilha Terceira (Açores), capacitados para processar, respectivamente, 100 e 40 kt/ano.

Neste âmbito, é profícuo analisar o potencial para introduzir no modelo de gestão de resíduos em Portugal a valorização energética em aglomerados de média e pequena dimensão numa perspectiva de gestão integrada.

Pretende-se assim analisar a viabilidade técnica e económica da aplicação de sistemas WtE de pequena escala em aglomerados de média e pequena dimensão, tanto ao nível dos sistemas convencionais existentes como ao nível dos sistemas assentes na gaseificação ou na pirólise. Sugerindo-se novos pressupostos na gestão de resíduos urbanos em Portugal de forma a ajustar o modelo de gestão às exigências evidenciadas no quadro estratégico nacional e comunitário numa perspectiva de dar seguimento e complementar o trabalho já amplamente desenvolvido em matéria das tecnologias descritas.

Com vista a analisar a viabilidade técnica e económica deste tipo de soluções, pretende-se concretizar os seguintes objectivos:

- Discernir sobre as principais diferenças entre os sistemas de incineração convencional e tratamentos térmicos avançados (TTA).
- Calcular o custo efectivo do tratamento térmico de resíduos com base nas unidades de valorização energética, à data, existentes ou previstos em Portugal
- Aferir, com base nos custos e desempenho energético, o potencial de implementação de soluções de tratamento assentes em processos térmicos avançados.

1.2 Metodologia

Na formulação de custos proposta na dissertação adoptaram-se as directrizes que constam no *Reference Document on economics and cross-media effects* (CE, 2006), nomeadamente, na definição das seguintes componentes:

i. Factores de escala (n)

Para calcular os custos de uma instalação de valorização energética (C_y) caracterizada por uma capacidade operacional (y) diferente da capacidade de uma instalação de referência (x), para qual é conhecida a caracterização financeira (C_x), a expressão (1) fornece um valor aproximado.

$$C_y = C_x \left[\frac{y}{x} \right]^n \quad (1)$$

“O valor do expoente ‘n’ varia de um tipo de instalação para outra, na medida em que o tipo de equipamento varia (...)” Porém, o efeito produzido nos custos totais, que inclui uma série de componentes de custos, em média igual a 0.6 fornece um valor aproximadamente correcto. (CE, 2006)

ii. Actualização de custos

As actualizações temporais de custos, que traduzem a relação entre os «custos nominais» e «custos reais», foram obtidas com base nas taxas de variação do Índice de Preços no Consumidor, de acordo com o Instituto Nacional de Estatística (INE), por forma a traduzir o efeito da inflação.

iii. Custos totais

O custo total anual, C_t , é equivalente ao somatório do custo de investimento anual, C_i , e dos custos operacionais (e de manutenção) anuais, C_o :

$$C_t = C_i \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + C_o = C_a + C_o \quad (2)$$

Em que:

C_i – Custo de investimento

C_o – Custos operacionais

C_a – Custo de amortização

i – taxa de amortização

n – período de amortização (admitiu-se equivalente ao período de vida útil da infra-estrutura)

Além das directrizes anteriormente identificadas tomou-se ainda em consideração que:

- Por forma a estimar os custos efectivo, C_e , do tratamento de cada unidade de valorização energética, calculou-se a receita (*input*) a ser deduzida aos custos totais (*output*). Para as unidades para as quais não é conhecido o valor de «electricidade vendida», utilizou-se a formulação proposta em Lettieri et al. (2010) para estimar a Desempenho energética das unidades e assim deduzir esse valor.
- Todas as componentes de custos e receitas foram niveladas (“*levelized*”) com base na capacidade operacional das unidades, por forma a produzir resultados comparáveis, obtendo-se assim as referidas componentes em euros (€) por tonelada (t) de resíduos afluídos à unidade.

1.3 Estrutura

O corpo da dissertação está estruturado da seguinte forma:

- No capítulo 2 discutem-se os principais factores intrínsecos à gestão de resíduos urbanos, começando-se pela caracterização dos padrões de produção em Portugal e das políticas de gestão de resíduos que condicionam o seu planeamento a médio prazo.
- O terceiro capítulo apresenta a concepção dos sistemas de tratamento térmico de resíduos, com base na sua evolução e no tipo de tecnologias existentes para o efeito.
- O quarto capítulo analisa o estado de desenvolvimento técnico das tecnologias de tratamentos térmicos de resíduos. Para isso, far-se-á a análise das componentes que constituem os sistemas de tratamento de resíduos, nomeadamente, os sistemas de conversão térmica e produção de energia, bem como os sistemas de controlo de emissões.
- No capítulo 5 definem-se as bases para a estimativa de custos e receitas dos sistemas de tratamento térmico existentes em Portugal – VALORSUL (Lisboa), LIPOR (Porto), ARM (Ilha da Madeira), TERAMB (Ilha Terceira) e AMISM (Ilha de São Miguel) - tendo presente a importância da caracterização económica das soluções de tratamento para uma correcta formulação dos cenários tomados como referência nos critérios de escolha de soluções de gestão integrada de resíduos. Assim pretende-se complementar a caracterização técnica realizada no quarto capítulo.
- No capítulo 6 avalia-se os custos referentes à implementação de uma unidade de tratamento térmico avançado - Energos® - a partir da definição de todos os custos envolvidos no sistema, no domínio de capacidades da referida tecnologia, por forma a aferir a sua competitividade face aos sistemas de tratamento predominantes, no âmbito das soluções de pequena escala.
- No capítulo 7 compara-se os custos obtidos nos dois capítulos anteriores e discutir os resultados.
- No capítulo 8 conclui-se sobre a viabilidade técnica e económica do sistema de tratamentos térmico analisado e qual o espaço para a sua implementação em Portugal, tendo por base a comparação efectuada.

2 Gestão de resíduos urbanos

2.1 Enquadramento

Até à década de 90, embora existissem já alguns sistemas de tratamento de resíduos, a maioria do território era desprovido de sistemas de gestão de resíduos de qualidade – inferior a 29%, segundo Pato (2011). 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 representam, respectivamente, 9 e 15% das opções de destino final (Levy e Cabeças, 2006). Uma grande parte dos resíduos produzidos (60%), quer urbanos e equiparados, 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 (Levy e Cabeças, 2006).

Com a elaboração do Plano estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU), 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 actualmente 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 há até 2020) o que nos referidos municípios se tornava uma matéria difícil de resolver (CE, 1999). Uma vez adoptada 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; meta que apenas foi atingida com sucesso no ano de 2002 (PERSU II). No entanto, face a outros tipos de tratamentos verificou-se um desvio significativo das metas que estavam estipuladas para o ano 2005.

Na **Fig. 2.1** 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.

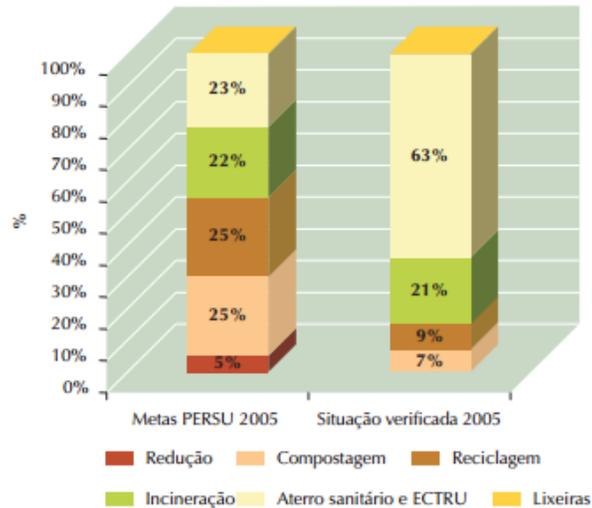


Fig. 2.1: Nível de cumprimento das metas definidas no Persu I para 2005. Adaptado de PERSU II

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 objectivos 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 Padrões de produção e caracterização física dos RU

Em Portugal são produzidos anualmente 14,3 Mt de resíduos, dos quais 4,6 Mt correspondem a resíduos urbanos (RU) (PERSU, 2020; APA, 2014).

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

A produção de resíduos abrandou significativamente a partir de 2008, registando-se uma redução contínua na produção de resíduos até 2013, de acordo com os últimos dados disponíveis, provocada em parte pela diminuição do consumo e da procura de bens (PNGR 2020; APA 2014). Pode definir-se a capitação de produção de resíduos num determinado período como a quantidade de resíduos gerada por pessoa nesse período temporal. Esse valor médio, em Portugal, corresponde a 439 Kg/hab.ano, equivalente a 1,2 kg/hab.dia relativamente aos RU (APA 2014).

A composição de uma massa de RU pode ser classificada consoante a natureza dos produtos que estão na sua origem. Tipicamente podem ser classificados como resíduos orgânicos, papel, plástico, vidro e metais (ferrosos e não ferrosos), podendo existir outras componentes, geralmente com menor expressão numa massa resíduos urbanos, mas tendencialmente associados a outro tipo de fluxos de resíduos, não retratados abaixo, como por exemplo a matéria têxtil. A composição relativa dos tipos de resíduos mencionados varia consoante determinados factores, onde se incluem a cultura de consumo, a zona geográfica, a caracterização das condições económicas, o clima ou as fontes de energia utilizadas (Rand et al., 1999).

No **Quadro 2.1** apresenta-se a composição média dos resíduos produzidos nos países da OCDE. A fracção inorgânica de resíduos (e.g. plásticos, vidro, metais) apresenta uma grande expressão nestes países, fruto do elevado nível de industrialização, o que pode ser traduzido numa tendência generalizada a nível global verificada nas denominadas «sociedades de consumo». (Leckner, 2014). Complementarmente, a caracterização física média dos RU produzidos especificamente em Portugal pode ser de igualmente visualizada no **Quadro 2.1**, bem como o poder calorífico inferior (PCI) dos materiais existentes numa massa indiferenciada de resíduos urbanos.

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)”.

É comum utilizar-se este parâmetro no balanço de massa dos resíduos sujeitos a tratamentos térmicos, pois este indicador traduz o potencial de energia que pode ser aproveitado.

Quadro 2.1: Caracterização física média e PCI dos RU produzidos: (a) Vainikka et al. (2012), (b) OCDE e (c) Portugal.

Fracção de resíduos	Vainikka (2012) (%)	Países OCDE ¹ (%)	Portugal ² (%)	PCI (MJ/kg)
Orgânicos e comida	30 - 40	27	37	1,9 ³
Papel/Cartão	15 - 25	32	13	10,6 ⁴

Fracção de resíduos	Vainikka (2012) (%)	Países OCDE ¹ (%)	Portugal ² (%)	PCI (MJ/kg)
Plásticos	7 - 15	11	11	31,5 ⁴
Vidro	4 - 7	7	5	0 ⁴
Metais	3 - 4	6	2	0 ⁴
Outros	18 -30	17 ⁴	32	-
RU	100	100	100	10,4 ⁵

¹Hoorweg e Bhada-Tata (2012); ²APA (2014) ³Rand et al. (1999); ⁴Leckner (2014); ⁵Valor de PCI avançado por European IPPC Bureau (2006);

Caso os resíduos sofram um processo de transformação, quando sujeitos a um sistema com produção de combustíveis derivados de resíduos (CDR), que precede o tratamento térmico, tipicamente em tecnologias de leito fluidificado ou forno rotativo, o PCI do produto resultante é aumentado (18,5 MJ/kg), face ao poder calorífico base dos resíduos urbanos 10,4 MJ/kg (European IPPC Bureau, 2006). O CDR é desta forma muitas vezes utilizado como combustível auxiliar («combustão mista»).

No entanto, a produção de CDR – que consiste num processo bio-mecânico - requer um aumento do consumo de energia interno por parte das unidades de tratamento relativo às operações de triagem, remoção das componentes de vidro e metal, secagem da componente orgânica, homogeneização e compactação; e a sua eficiência está condicionada pela quantidade de recicláveis presentes na mistura (AECOM, 2009).

Em Portugal, estimava-se (no período decorrente entre 2007 e 2010) a existência de 1600 kt com potencial para serem transformados anualmente em CDR, sendo que as unidades de valorização energética da LIPOR e VALORSUL estariam capacitadas para processar 104 kt/ano (Dias et al, 2006).

2.3 Análise dos RU como objecto de valorização – metas e objectivos gerais

Em Portugal, as linhas gerais de orientação em matéria de resíduos foram concretizadas numa série de planos sectoriais, em particular, o Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos (PERSU), o Plano Estratégico de Resíduos Hospitalares (PERH) e o Plano Estratégico de Gestão de Resíduos Industriais (PESGRI), registando-se recentemente a aprovação em Conselho de Ministros n.º 11-C/2015 do Plano Nacional de Gestão de Resíduos (PNGR). A implementação deste quadro de políticas permitiu pôr em prática, no território nacional, a «hierarquia de gestão de resíduos» e o «princípio da valorização dos resíduos», nos termos das políticas aprovadas a nível europeu (APA, 2016)

Actualmente, um dos focos do PNGR para o horizonte 2015-2020 - com o mote “uma fonte renovável de recursos” - é aproveitar o potencial de uma classe de materiais, cuja evolução tecnológica, alicerçada ao sector industrial, tem demonstrado a capacidade destes para se regenerarem, podendo assim, vir a integrá-los numa economia tendencialmente circular em benefício da economia e do ambiente, uma vez que permite reduzir o recurso a matérias-primas virgens para a mesma função.

Desta forma pode começar-se por definir os objectivos e metas gerais em termos de definição das políticas de gestão de resíduos em Portugal (APA, 2014):

- i. “Promover a eficiência da utilização de recursos naturais e dissociar o crescimento económico dos impactes ambientais relacionados com a produção de resíduos;
- ii. Reforçar a prevenção da produção de resíduos e fomentar a sua reutilização e reciclagem com vista a prolongar o seu uso na economia;
- iii. O Programa de Prevenção de Resíduos Urbanos 2009-2016 (PPRU) aponta como meta global para os resíduos urbanos, para 2016, a redução de 10% da capitação média diária, relativamente aos valores de 2007;
- iv. O Decreto-Lei n.º 73/2011 de 17 de Junho estabelece as seguintes metas a alcançar até 2020: um aumento mínimo global para 50% em peso relativamente à preparação para a reutilização e a reciclagem de resíduos urbanos; um aumento mínimo para 70% em peso relativamente à preparação para a reutilização, a reciclagem e outras formas de valorização material;
- v. O Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de agosto, que transpõe a Directiva Aterros, define os seguintes objectivos: para o ano 2013, uma redução para 50% da quantidade total de RUB depositados em aterro, face aos quantitativos totais produzidos em 1995; para o ano 2020, uma redução para 35% da quantidade total de RUB depositados em aterro, face aos quantitativos totais produzidos em 1995.”

As metas enunciadas têm implícito o «princípio da hierarquia dos resíduos», definido inicialmente pelo quadro comunitário na directiva 2008/98/CE, que estipula a seguinte ordem de prioridades relativamente à gestão dos resíduos em geral: (a) prevenção e redução, (b) preparação para a reutilização, (c) reciclagem, (d) outros tipos de valorização, e por último (e) eliminação.

As duas primeiras metas do Relatório Anual de Resíduos Urbanos (APA, 2014) pretendem evitar directamente o aumento da produção de resíduos que tipicamente está associada ao crescimento económico por via do aumento dos bens de consumo, o que passa por um aumento da consciencialização colectiva relativamente ao valor dos materiais.

É possível verificar na **Fig. 2.2** a evolução da produção de RU e respectiva capitação entre 2007 e 2020. Os dados referentes ao ano de 2007 apontam uma produção anual de RU de 4,65 Mt, que corresponde a

uma capitação anual de 459 Kg por habitante (PERSU, 2020), o que implica, de forma a cumprir a meta da redução da capitação, uma produção anual abaixo de 413 Kg por habitante já em 2020 (meta 3).

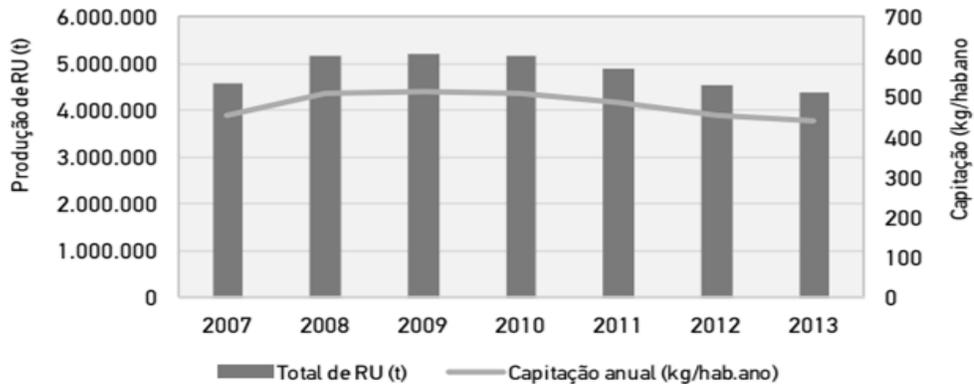


Fig. 2.2: Produção e capitação de resíduos em Portugal continental. APA (2014)

Em segundo lugar, como se viu deve promover-se a reciclagem como principal solução de tratamento no âmbito das soluções de tratamento aplicáveis aos resíduos. Porém, os resíduos que não disponham de condições para serem reciclados ou valorizados, não são vistos apenas como um conjunto de materiais em fim de vida, com a única necessidade de serem extintos e podem passar a ser aproveitados do ponto de vista: (i) do seu potencial energético, i.e. constituem uma forma de matéria-prima que pode ser extraída, cedendo a sua extinção em troca da produção de energia que possa daí advir – valorização energética; (ii) ou podem simplesmente ser valorizados organicamente (fracção biodegradável) através da produção de composto.

A adopção das soluções de tratamento pela ordem de prioridades enunciada permite minimizar a quantidade de resíduos encaminhados para aterro e promove o cumprimento da meta para o ano 2020, de forma a que se possa registar uma “redução para 35% da quantidade total de RUB depositados em aterro, face aos quantitativos totais produzidos em 1995” (meta 5).

Estes processos de tratamento são também conhecidos como operações de desvio de aterro, precisamente porque permitem reduzir substancialmente a quantidade de resíduos encaminhada para esse fim (DEFRA, 2014).

Note-se que os tratamentos por via dos aterros sanitários (operação de eliminação) constituem a principal fonte de emissões de GEE. Estima-se que as operações de desvio de aterro de RU na União Europeia possam contribuir para reduzir entre 40 a 100 Mton CO₂-equivalentes (CO₂-eq.) por ano o que representa mais de 29% do total da meta de redução de CO₂-eq do protocolo de Quioto para os EU-15 (Vainikka et al., 2012).

Num estudo realizado para o território nacional (denominado «Impacto das Opções e Oportunidades de Gestão de Resíduos na Mitigação de Gases com Efeito de Estufa em Portugal») estima-se que a produção de energia por via da incineração seja responsável por uma redução indirecta de 0,18 tCO₂eq por cada tonelada de resíduos segundo o PERSU II.

Por outro lado, na União Europeia prevê-se um aumento das operações de reciclagem em 42% e um aumento da incineração com recuperação de energia de 25% até 2020 (EEA Briefing 2008/01, 2008). Se estas projecções forem acompanhadas da implementação necessária, é expectável que as operações com maior capacidade de contribuir para a redução de emissões de GEE sejam precisamente a reciclagem (75%) e a incineração (com quase 25% do total de emissões evitadas) (Lettieri et al., 2010).

Deste modo, a União Europeia promove indirectamente a aplicação de tratamentos térmicos que permitem explorar o poder calorífico dos RU e assim produzir energia, a par da reciclagem e de outros tratamentos mecânico-biológicos (Karagiannidis, 2006). A reciclagem, embora seja uma operação prioritária face a outros tratamentos, é limitada pelos fluxos de recolha selectiva na fonte e a compostagem depende muito da composição orgânica dos resíduos (Klinghoffer et al., 2013), e depende por isso do grau de consciencialização das populações e eficiência dos serviços disponibilizados para o efeito.

Relativamente a compatibilidade entre os sistemas de tratamento por valorização energética e a própria via da reciclagem existem duas questões que devem ser examinadas. Por um lado, os tratamentos de reciclagem e valorização energética não são incompatíveis (Michael, 2013). Isto é visível em países que têm uma cultura de valorização dos materiais. Por exemplo a Dinamarca, a Suécia e a Noruega são dos países europeus com menores taxas de encaminhamento para aterro e simultaneamente pertencem ao grupo de países com maiores taxas de reciclagem e maiores taxas de recuperação de energia (**Fig. 2.3**)

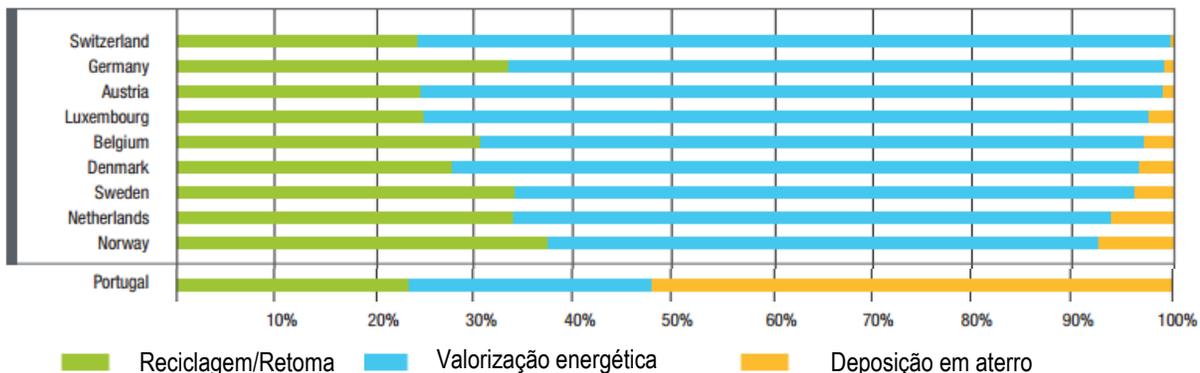


Fig. 2.3: Destino final dos resíduos urbanos em países Europeus. Adaptado de Hoornweg e Bhada-Tata (2012)

O que significa que a reciclagem e a valorização energética, desde que geridos de forma integrada constituem uma das formas mais eficientes de reduzir a quantidade de resíduos em aterro como fonte principal de produção de GEE.

Por outro lado, as instalações de incineração que permitam converter o poder calorífico dos resíduos noutra forma de energia (com um factor de eficiência energética superior a 0,65 – ver **subcapítulo 4.3** - são uma operação de valorização e não de eliminação. Os países acima mencionadas constituem os três países mais bem posicionados em termos de factores de eficiência energética: em termos médios, entre 0,87 – 1,06, segundo Grosso et al. (2010).

Em Portugal desde que a produção de resíduos por parte de um agente produtor seja superior a 1.100 litros por dia, a gestão desses resíduos é da responsabilidade do município em que o produtor se insere. Pelo que, nos interessa particularmente definir as soluções neste âmbito, visto que as soluções WtE são sobretudo soluções de gestão de resíduos a nível municipal.

Os sistemas multimunicipais em que coexistem sistemas de valorização energética de RU são a VALORSUL, LIPOR, a Água e Resíduos da Madeira (ARM), TERAMB e, por último, a Associação de Município da Ilha de São Miguel (projecto em fase de concurso). Estes sistemas serão posteriormente analisados.

Em síntese, se por um lado, os resíduos devem ser reduzidos, por outro lado aqueles que são gerados devem coexistir com soluções de reduzido impacto ambiental e que permitam, após esgotada a possibilidade de reciclagem, promover a componente energética presente nos resíduos por vezes não aproveitada, através de soluções técnica e economicamente viáveis.

2.4 Legislação aplicável

No âmbito da valorização energética é importante definir os termos legais que regem as actividades associadas às operações de gestão de resíduos e o tratamento térmico, por forma a enquadrar legalmente a valorização energética de resíduos no quadro nacional, enquanto parte integrante de um sistema de gestão de resíduos. Desta forma, identificam-se as principais normas que regulam o sector, que em matéria de gestão de resíduos, quer em matéria de controlo e monitorização ambiental das operações inerentes aos tratamentos térmicos de resíduos:

- **Decreto-Lei n.º 73/2011**

O DL n.º 73/2011 transpõe para o quadro nacional a directiva 2008/98/CE (do Parlamento Europeu e do Conselho). Desta forma, estabelece o regime geral da *gestão de resíduos* e define os principais conceitos

associados. Este Decreto-Lei será útil sobretudo na definição dos termos que compõem as operações básicas de gestão de resíduos (**sub-capítulo 2.5**).

Define-se, nos termos do DL n.º 73/2011, o conceito de «**Resíduo Urbano**» (**RU**) como o “resíduo proveniente de habitações, bem como outro resíduo que, pela sua natureza ou composição, seja semelhante ao resíduo proveniente de habitações”.

No âmbito dos tratamentos térmicos de resíduos, o DL n.º 73/2011 introduz ainda o conceito de *factor de eficiência energética* (R1), cuja análise será feita no **sub-capítulo 4.3**.

- **Decreto-Lei n.º 127/2013**

Transpõe para a ordem jurídica interna a Directiva 2010/75/EU (do Parlamento Europeu e do Conselho) e estabelece os regimes de: i) *Prevenção e controlo integrado da poluição proveniente de certas atividades* ii) *limitação das emissões para o ar de certos poluentes provenientes das grandes instalações de combustão* e iii) *prevenção e redução da poluição resultante das emissões para a atmosfera resultantes de operações de incineração ou co-incineração*, entre outros regimes não aplicáveis directamente ao tratamento térmico de resíduos.

Deve notar-se que este Decreto-Lei pretende agregar os regimes estabelecidos originalmente nos DL n.ºs 173/2008, 178/2003 e 85/2005, respectivamente.

Nos termos do DL, definem-se os seguintes conceitos:

«**Resíduo**»: “quaisquer substâncias ou objectos de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer”;

«**Instalação de combustão**»: “qualquer equipamento técnico em que sejam oxidados produtos combustíveis a fim de utilizar o calor assim produzido”;

«**Instalação de coincineração de resíduos**»: “uma unidade técnica fixa ou móvel que tem como principal finalidade a **geração de energia** ou a **produção de materiais** e que utiliza resíduos como combustível habitual ou complementar, ou na qual os resíduos são sujeitos a tratamento térmico com vista à sua eliminação através da **incineração** dos resíduos por oxidação ou por outros processos de tratamento térmico, como a **pirólise**, a **gaseificação** ou processos de plasma, se as substâncias resultantes do tratamento forem subsequentemente incineradas”;

«**Instalação de incineração de resíduos**»: “qualquer unidade ou equipamento técnico fixo ou móvel destinado ao tratamento térmico de resíduos, **com** ou **sem valorização** do calor gerado pela combustão, através da **incineração** dos resíduos por oxidação e outros processos de tratamento térmico, como a **pirólise**, a **gaseificação** ou processos de plasma, se as substâncias resultantes do tratamento forem subsequentemente incineradas”;

Deve notar-se que as actividades de incineração ou coincineração de resíduos devem ser devidamente aprovadas sob a forma de uma licença de exploração emitida pela Agência Portuguesa do Ambiente

(APA), sendo classificadas consoante a actividade económica principal que desenvolvam: i) *tratamento de eliminação de resíduos inertes*, ii) *tratamento e eliminação de outros resíduos não perigosos*, iii) *tratamento e eliminação de resíduos perigosos* ou iv) *descontaminação e actividades similares*.

No âmbito desta dissertação interessa-nos analisar sobretudo o tratamento térmico de RU em instalações de valorização energética, pelo que têm particular interesse as unidades classificadas como *tratamento e eliminação de outros resíduos não perigosos*.

- **Decreto-Lei n.º 92/2010**

O DL n.º 92/2010 altera o Decreto-Lei n.º 85/2005, que por sua vez transpõe para a ordem jurídica interna a Directiva n.º 2000/76/CE (do Parlamento Europeu e do Conselho) e estabelece o regime para a prevenção e redução da poluição resultante das emissões para a atmosfera resultantes de operações de incineração ou co-incineração. Note-se que este DL foi actualmente agregado no DL descrito anteriormente (n.º 127/2013), no entanto, não existem alterações ao que a seguir se expõe.

Nos estritos termos do Decreto-Lei define-se:

«**Emissão**»: “libertação directa ou indirecta de substâncias, vibrações, calor ou ruído a partir de fontes pontuais ou difusas da instalação para a atmosfera, água ou solo”;

«**Valores limites de emissão**»: “a massa, expressa em termos de determinados parâmetros específicos, concentração, percentagem e ou nível de uma emissão, que não pode ser excedida durante um ou mais períodos de tempo”.

Ao nível das condições de exploração o referido Decreto-lei define que no fim do processo de incineração “o teor de COT das escórias e das cinzas de fundo deve ser inferior a 3% ou que a sua perda por combustão seja inferior a 5% do peso (sobre matéria seca) do material.”

Os valores limites de emissão (VLE) que devem ser garantidos nas operações de incineração são definidos relativamente aos valores médios diários, aos valores médios a intervalos de 30 minutos, a todos os valores médios obtidos durante o período de amostragem mínimo de trinta minutos e máximo de oito horas, relativamente à concentração total de dioxinas e furanos e concentração de monóxido de carbono nos gases de combustão. A monitorização e controlo das emissões decorrentes das operações de incineração deverão ser comunicados à APA.

2.5 Operações básicas de gestão de resíduos

Deve-se começar por sistematizar um sistema de gestão dos resíduos considerando 4 vectores principais - a *recolha*, o *transporte*, a *valorização* e a *eliminação* de resíduos – o qual inclui a supervisão destas operações e a manutenção dos locais de eliminação no pós-encerramento.

Nestes termos, considera-se que as operações de *armazenamento* e *triagem* passam a fazer parte do sistema de *recolha*. Além disso, com as definições atribuídas aos conceitos de *valorização* e *eliminação*, o termo *tratamento* de resíduos passa a corresponder imperativamente a um conjunto de operações de um destes dois tipos. Nos termos do DL n.º 73/2011, as operações de gestão de resíduos podem ser sistematizados no seguinte diagrama (Fig. 2.4).

O DL n.º 73/2011 define os conceitos de *valorização* e *eliminação*, respectivamente:

- «(...) como qualquer operação cujo resultado principal seja a transformação dos resíduos de modo a servirem um fim útil, substituindo outros materiais que, caso contrário, teriam sido utilizados para um fim específico ou a preparação dos resíduos para esse fim na instalação ou conjunto da economia»;
- «(...) como qualquer operação que não seja de valorização ainda que se verifique como consequência secundária a recuperação de substâncias ou de energia».

Note-se que num sistema de gestão de resíduos, a reciclagem deve ser a primeira solução de valorização a ter em conta. No entanto, numa massa de resíduos urbanos indiferenciados podem existir materiais passíveis de serem valorizados (e.g. plásticos, vidro), cujo potencial de valorização por via da reciclagem fica esgotado à partida, devido ao tipo de selecção na fonte por parte do utilizador/consumidor.

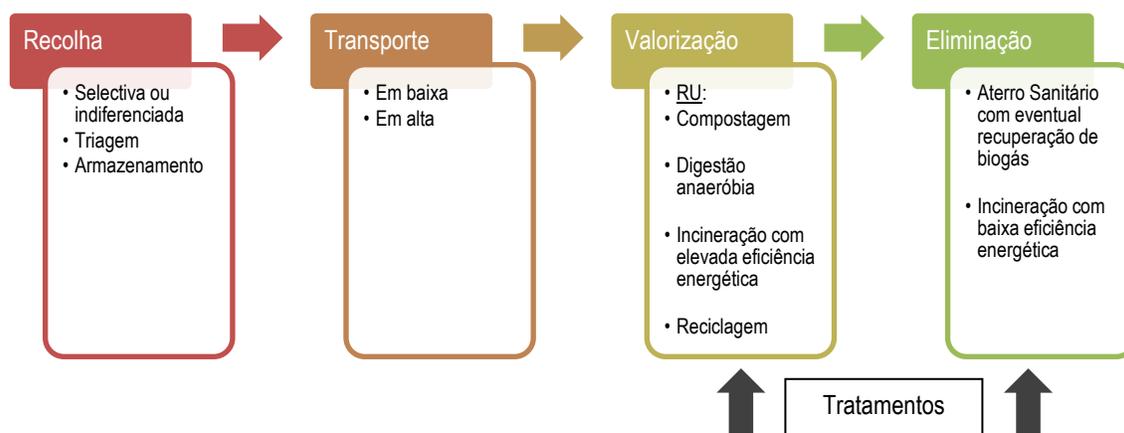


Fig. 2.4: Operações de gestão de resíduos (DL n.º 73/2011) e respectivos tratamentos aplicáveis a uma massa de resíduos urbanos.

2.6 Destino final – tratamentos e dados

O principal foco desta dissertação são os RU. Os tratamentos específicos tipicamente aplicáveis a uma massa de RU são a reciclagem, compostagem, digestão anaeróbia, incineração e deposição em aterro sanitário (Psomopoulos et al., 2009).

Apresenta-se de seguida uma lista que sistematiza estes tratamentos e propõe uma análise dos mesmos tendo em conta o carácter de valorização ou eliminação **Quadro 2.2**.

Quadro 2.2: Tratamentos típicos aplicáveis a uma massa de resíduos urbanos.

Tratamentos típicos de RU	Natureza dos processos envolvidos	Operação de gestão
Compostagem	Deterioração dos resíduos	Valorização orgânica
Reciclagem	Reprocessamento de materiais	Valorização material
Digestão anaeróbia	Processamento bio-mecânico	Valorização orgânica/energética
Incineração tipo I ¹	Processamento térmico-químico	Valorização energética
Incineração tipo II	Processamento térmico-químico	Eliminação
Aterro sanitário	Operação de deposição no solo	Eliminação

¹refere as instalações de incineração dedicadas ao processamento de resíduos sólidos urbanos apenas quando a sua eficiência energética é igual ou superior aos valores definidos nos termos do DL n.º 73/2011 (sub-capítulo 4.3).

Pode observar-se na **Fig. 2.5** o destino final directo a que os resíduos em Portugal são sujeitos. Verifica-se que, o aterro sanitário, embora seja o destino menos recomendável, continua a representar 43% do destino final dado aos resíduos urbanos. Apesar disso, deve notar-se que esse facto representa um avanço estratégico consolidado uma vez que pela primeira vez, em 2013, a maioria dos resíduos urbanos não foi encaminhada para aterro sanitário (menos de 50%) (APA, 2014). Por outro lado, essa diminuição do encaminhamento para aterro foi compensada pelo aumento das unidades de tratamento mecânico-biológico e tratamento mecânico, representado estas, actualmente, cerca de 24% do destino final dado aos RU. Por sua vez, a incineração (valorização energética) tinha em 2013 uma expressão significativa de 22% - 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. De facto, se se analisar o destino final directo dos resíduos 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%, respectivamente (APA, 2014)

O tratamento por valorização orgânica representa apenas 2% no território nacional e a reciclagem, não obstante a sua importância na gestão de RU, por enquanto representa apenas 9%, num quadro de

evolução muito reduzido ao longo dos últimos anos e cuja tendência deve ser invertida. Deve notar-se, no entanto, que o encaminhamento de resíduos para aterro, se forem contabilizados os refugos e/ou rejeitados de outro tipo de tratamentos, é muito superior, representando cerca de 60% do total de resíduos em Portugal (APA, 2014).

Desta forma, torna-se visível a importância que deve ser dada a outro tipo de tratamentos e/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, per si, uma solução de eliminação a ter conta em estrita necessidade.

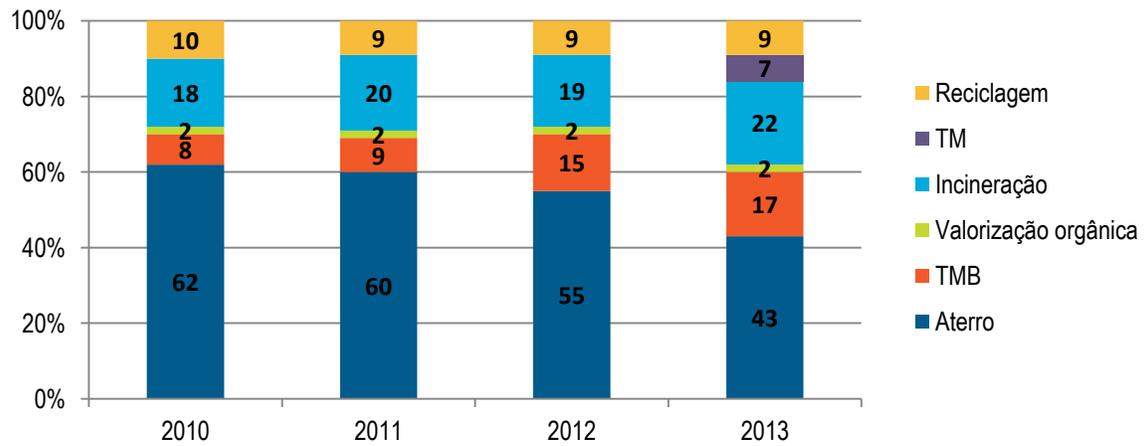


Fig. 2.5: Destino final directo dos resíduos em Portugal Continental. Adaptado de APA (2014)

3 O tratamento térmico de resíduos

3.1 Enquadramento

O tratamento térmico de resíduos consiste essencialmente no processamento de resíduos por via de processos térmicos, com redução significativa de volume (entre 80 a 90%) e peso (entre 70 a 80%) (Arena, 2012). Após a recepção dos resíduos, o processo de tratamento inicia-se numa câmara de combustão com uma fonte de ignição térmica que promove o processo de oxidação dos resíduos (reação exotérmica) libertando a energia calorífica dos resíduos, que por via de determinados dispositivos de aquisição de energia pode ser aproveitada sob a forma de electricidade, calor ou armazenada sob a forma de produtos energéticos.

Deve notar-se que inicialmente o tratamento térmico de resíduos era descrito como um processo de incineração *mass burn*, o que implicava a combustão dos resíduos, mas não necessariamente o aproveitamento energético dos gases de combustão, nomeadamente, no PERSU II era definido como «processo químico por via térmica, com ou sem recuperação da energia calorífica produzida». Nestas condições a combustão dos resíduos dita, pela sua própria definição, a oxidação total dos resíduos, sendo que a única forma de aproveitar o poder calorífico dos gases de combustão é transferir a sua energia para uma caldeira e subsequentemente accionar uma turbina a vapor.

Actualmente, o estado de desenvolvimento das tecnologias de tratamento térmico de resíduos é muito mais complexo ao nível das operações de conversão térmica bem como aquisição de energia, implicando diversas configurações possíveis (Leckner, 2014), pelo que a constituição dos sistemas será descrita no **capítulo 4**. Importa por agora estabelecer a distinção entre sistemas de incineração convencional e os denominados tratamentos térmicos avançados (TTA) ao nível dos processos termoquímicos de conversão de resíduos que ocorrem na câmara de oxidação (forno), ficando desde já explícito que os sistemas de aquisição de energia subsequentes à fase principal do processo são condicionados por estes, influenciando, desta forma, toda a concepção geral da instalação (e.g. fase de preparação) (Fitzgerald, 2013).

Existem principalmente três tipos de sistemas que compõem os tratamentos térmicos de resíduos, que são caracterizados pelos termos do processo termoquímico associado (Arena, 2012):

- Incineração
 - por Combustão;
- Tratamentos térmicos avançados (TTA)
 - Gaseificação;
 - Pirólise.

Todos estes sistemas permitem a conversão de resíduos em energias ou noutros produtos, sendo que o que os distingue são as condições termodinâmicas em que se dá a conversão térmica: principalmente temperatura, pressão e rácio de oxigénio (European IPPC Bureau, 2006).

O sistema predominante é a incineração, em que são criadas condições para que os resíduos sejam totalmente oxidados (combustão). Por outro lado, nos sistemas de gaseificação e pirólise os resíduos são oxidados em condições sub-estequiométricas (rácio de ar <1) para que resultem do processo produtos gasosos com valor energético considerável (gás sintético) (Leckner, 2014). Desta forma, a queima do gás sintético em determinadas condições permite produzir não só electricidade e/ou calor com maior eficiência energética mas também um conjunto variado de produtos energéticos (Arena, 2012).

Nas condições até agora definidas, pode sistematizar-se o tratamento de resíduos numa sequência de processos. Essencialmente o tratamento consiste numa fase de preparação de resíduos (input), numa fase de conversão térmica da qual podem resultar essencialmente produtos sólidos (cinzas, metais) ou gasosos, numa fase de produção de energia (electricidade e/ou calor) e numa fase de limpeza e controlo de emissões (**Fig. 3.1**).

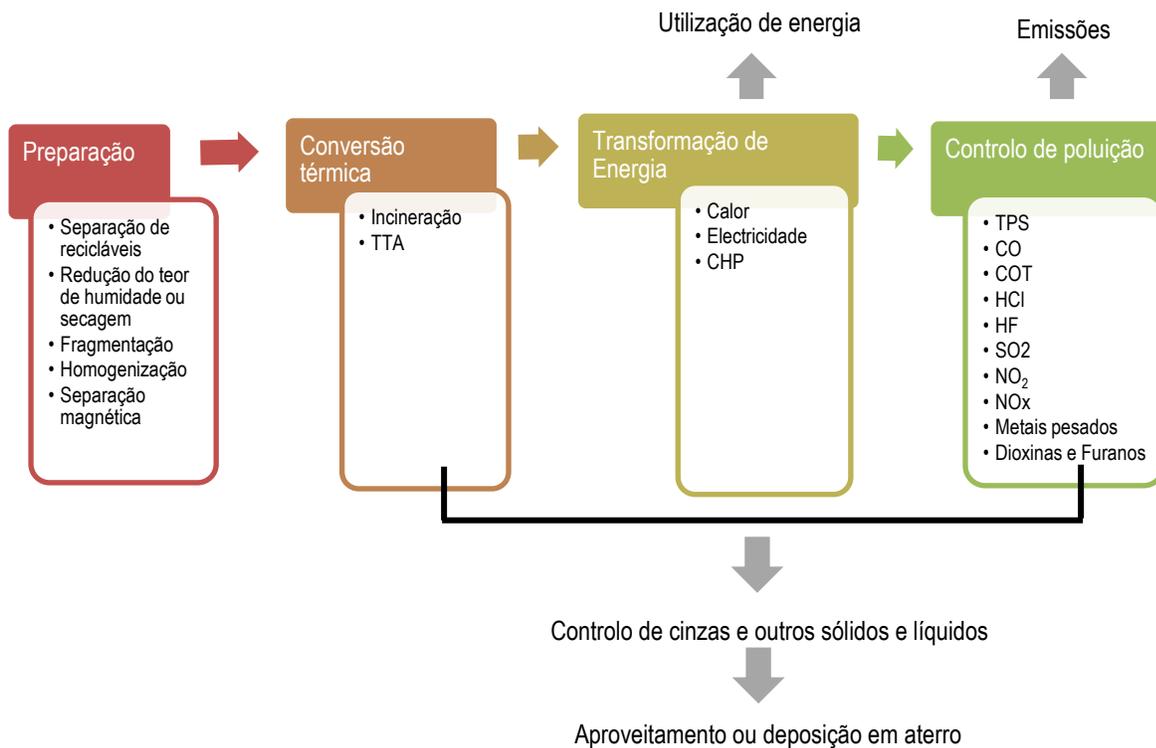


Fig. 3.1: Fases de um sistema de tratamento térmico. Diagrama adaptado de Leckner (2014). Fontes: Fitzgerald (2013), Michael (2013), DL n.º 85/2005

3.2 Evolução dos sistemas de tratamento térmico

O primeiro incinerador construído data de 1874 e situava-se na cidade de Nottingham no Reino Unido (CEWEP, 2016). Mas só ao longo do século XX, sobretudo a partir da década de 70, é que as tecnologias de incineração começaram verdadeiramente a proliferar, principalmente por toda a Europa e nos Estados Unidos. Estes sistemas, conhecidos como *mass burn*, visavam exclusivamente a destruição dos resíduos, em câmaras de combustão, sobretudo com recurso a tecnologias de grelha móvel. (Fitzgerald, 2013). A par dos aterros sanitários constituíram durante muitos anos uma forma rudimentar de eliminação de resíduos.

A partir dos anos 90, com a introdução da directiva «aterros» na União Europeia, tornou-se uma prioridade reduzir a quantidade de resíduos biodegradáveis encaminhada para aterro, responsáveis pela maioria das emissões de CO₂; incitando práticas que possibilitassem valorizar os resíduos, i.e. aquilo que *a priori* era tido como lixo passou a ser visto como uma fonte inestimável de recursos energéticos e orgânicos.

Um dos efeitos dessa mudança foi o aparecimento cada vez mais marcado dos tratamentos térmicos avançados (TTA), que tinham vindo a ser desenvolvidos desde os anos 70, aquando da crise do petróleo, cujas primeiras tecnologias assentavam em processos de gaseificação e pirólise para produzir outras formas de energia. Por exemplo, a pirólise tem sido amplamente utilizada para produzir carvão vegetal a partir da biomassa. (Che et al. 2014). De facto, a directiva «aterros» previa a substituição da incineração por outros tratamentos, que à data era vista, a par dos aterros sanitário, como uma operação de eliminação pura com efeitos nefastos para o ambiente, sendo que aplicação de TTA podia representar uma alternativa.

A mudança tecnológica patente nestas tecnologias foi uma forma de contornar o problema. O seu primeiro grande desenvolvimento deve-se à indústria alemã, na década de 90. Desde então, que um número elevado de companhias começou a desenvolver tecnologias que combinavam pirólise, gaseificação e combustão em diversas configurações (Gohlke, 2009), muitas delas desenvolvidas a partir da aplicação industrial ou na conversão de produtos específicos de poder calorífico elevado, que este tipo de processos permitia explorar. Estas desenvolveram-se sobretudo no Japão, nos Estados Unidos e em menor escala na Europa – inicialmente na Alemanha, na fase de desenvolvimento das tecnologias e actualmente com especial enfoque no Reino Unido e na Noruega.

Não obstante as vantagens que os TTA têm oferecido, a incineração por combustão continua a ser a tecnologia dominante na Europa (cerca de 90% das unidades implementadas), e começa novamente a ganhar espaço também no mercado japonês, onde os TTA atingiram o seu auge de evolução no início do século, muito devido às políticas do estado Japonês que subsidiava à data estas tecnologias, alcançando

no ano de 2000 a construção de um número equivalente em unidades deste tipo face à tecnologia dominante de grelha (Leckner, 2014).

Acresce que, os avanços tecnológicos dos sistemas de incineração por combustão têm combatido estas tecnologias nos últimos anos, uma vez que actualmente, além de serem soluções eficazes de desvio de aterro, já são igualmente eficientes do ponto de vista energético e permitem o controlo de emissões atmosféricas dentro dos limites estabelecidos na legislação europeia, bem como a possibilidade de deposição das cinzas produzidas em locais apropriados. Uma forma da União Europeia (Directiva 2008/98/EC) ter contornado este problema, com eficácia, foi fazer a distinção das tecnologias de incineração pelo seu grau de eficiência energética, através da introdução do denominado factor de eficiência energética, R1, funcionando como uma forma de selecção tecnológica para os sistemas de incineração e de tratamentos térmicos avançados, excluindo assim do mercado as tecnologias obsoletas.

Desta forma, é visível em diversos estudos que os TTA têm concentrado esforços sobretudo ao nível das tecnologias de pequena escala, uma vez que estas permitem focar-se na produção de produtos combustíveis de elevada qualidade e na redução de emissões de dioxinas, mas geralmente com custos associados muito elevados, que salvo algumas excepções, fazem delas uma solução pouco atractiva do ponto de vista económico (Gohlke, 2009). No entanto, as tecnologias de pequena escala, sejam TTA ou incineração convencional, podem ser um recurso a ter em conta, designadamente, em regiões onde os custos efectivos de transporte (dependentes da densidade de pontos de recolha) são muito elevados (normalmente em zonas rurais ou semi-urbanas); face, por exemplo, a soluções de incineração, que apesar de poder ser aplicada a escalas reduzidas, opera melhor em condições de economia de escala.

3.3 Tipos de tratamentos

Distingue-se a incineração (tratamento dominante) dos tratamentos térmicos avançados (TTA), pela natureza de processos termoquímicos envolvidos. Assim, consideram-se os TTA apenas os tratamentos que pressuponham os regimes de gaseificação ou pirólise. Esta consideração leva a que os sistemas térmicos avançados, independentemente da tecnologia utilizada, explorem as condições em que se dá a produção de gás sintético. Em termos de operação, a diferença face às unidades de incineração parte do tipo de produto gasoso que é gerado durante a oxidação dos resíduos, ou seja, durante a fase de conversão térmica. Influenciando assim os processos de aquisição de energia e condicionando, geralmente de forma mais restrita, a fase pré-tratamento dos resíduos à entrada da unidade por forma a garantir determinadas condições de operacionalidade (Fitzgerald, 2013). Assim, os TTA diferem da incineração convencional na medida em que os processos termoquímicos de conversão térmica ocorrem em condições sub-estequiométricas, como se viu. Segundo Stein (2004) o volume de gás resultante do tratamento é muito menor o que permite ter tecnologias de limpeza de gases de dimensões mais reduzidas e, inclusivamente, mais económicas.

Por outro lado, a restrição dos níveis de oxigénio não é favorável à formação de Dioxinas e Furanos (Grieco e Baldi, 2012), pelo que os TTA são geralmente soluções menos poluentes.

Em termos de produção energética, os dispositivos de aquisição de energia associados ao gás sintético (turbina ou motor a gás) tem eficiências energéticas superiores à turbina a vapor (ciclo de Rankine) tipicamente associada aos sistemas de incineração convencional (Grieco e Baldi, 2012; Lettieri et al., 2010). No entanto, (como se verá) estes sistemas apenas são apelativos quando comparados com tecnologias de incineração convencional para uma mesma capacidade de processamento, pelo que, comparando com unidades de incineração convencional de grande dimensão, estes últimos são preferíveis devido ao efeito de economia de escala que é traduzido no desempenho energético da unidade.

As tecnologias em que assentam a maioria dos TTA são idênticas às da incineração por combustão, sendo os leitos fluidificados aplicáveis, sobretudo na gaseificação e o forno rotativo, na pirólise; mas podem ainda ser utilizadas outras tecnologias típicas de incineração não abordadas no **capítulo 4**, como o leito fixo, *entrained bed*, *vertical shaft* ou o reactor de *plasma*. (Leckner, 2014; Arena, 2012).

No **Quadro 3.1** é visível a expressão que os sistemas de incineração típicos apresentam face às tecnologias de gaseificação e pirólise na Europa. No entanto, pode ser atentado que noutros países, sobretudo no Japão e nos EUA (não reflectidos no **Quadro 3.1**) existem uma grande implementação de unidades em regime de gaseificação e pirólise. De acordo com os valores fornecidos por Leckner (2014) só no Japão é possível contabilizar a construção de 94 unidades de tratamento térmico assentes em processos combinados, entre 2000 e 2010. As unidades de gaseificação actualmente em funcionamento na Europa reportam-se sobretudo ao Reino Unido e Noruega, estando previstas a construção de mais 7 unidades no Reino Unido (Arena, 2012). À data não existe nenhuma unidade de gaseificação ou pirólise implementada em Portugal.

Quadro 3.1: Domínio de aplicação das principais tecnologias de tratamento térmico de resíduos implementadas na Europa.

Tecnologias de conversão térmica	Grelha móvel ¹	Leito Fluidificado ²	Forno rotativo ³	Outra/Específica ⁴	Total (100%)
Combustão (incineração)	329 (76%)	38 (8.8%)	28 (6.4%)	38 (8.8%)	433
Gaseificação	-	-	-	11 (100%) ³	11
Pirólise	-	-	-	2 (100%)	2

Sub-tipos comuns: ¹Martin, Dusseldorf; ² Estáveis (LFE) e com Circulação (LFC); ³ Horizontal; ⁴ Leito fixo (corrente descendente, corrente ascendente), *entrained flow*; ² ISWA (2012); ³Tecnologia *Energos*: inclui as unidades implementadas no Reino Unido e Noruega não contabilizadas no ISWA (2012);

3.4 Processos termoquímicos envolvidos

3.4.1. Enquadramento

Como se pode ver no **Quadro 3.2**, a combustão corresponde ao processo termoquímico associado às unidades de incineração convencionais, é por isso o processo de conversão térmica em que assentam a maioria dos sistemas WtE.

É comum em diversos documentos (ISWA, 2012, DL n.º 127/2013) designar-se o conjunto das tecnologias de tratamento térmico como tecnologias de incineração, no entanto, a aplicação do termo de *incineração* na comunidade científica emprega-se mais correctamente às unidades de que operam em regime de combustão. Sendo que as restantes unidades, de gaseificação e pirólise, também conhecidas por tratamento térmicos avançados (TTA), envolvem geralmente processos de conversão térmica e transformação de energia mais complexos.

Em qualquer caso, relativamente à fase principal do processo – conversão térmica – tanto na combustão como na gaseificação e/ou pirólise, diferem as condições termodinâmicas que caracterizam o processo: temperatura, rácio de oxigénio, tempo de residência ou outros parâmetros mencionados típicos da operação; ou ainda no meio de oxidação e no tipo de materiais produzidos durante o processo. As principais diferenças podem ser observadas no **Quadro 3.2**.

Quadro 3.2: Condições típicas das reacções e produtos gerados durante os processos de pirólise, gaseificação e combustão. Adaptado de European IPPC Bureau (2006).

Processo térmico-químico	Pirólise	Gaseificação	Combustão
Temperatura (°C)	250 - 700	500 - 1600	800 - 1450
Pressão (bar)	1	1 - 45	1
Atmosfera	Inerte, nitrogénio	Meio de oxidação ¹	Ar
Rácio de oxigénio	0	<1	>1
Produtos resultantes do processo:			
Fase gasosa	H ₂ , CO, hidrocarbonetos, H ₂ O, N ₂	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂	CO ₂ , H ₂ O, O ₂ , N ₂ O
Fase sólida	Cinzas, coque	Escórias, cinza	Escórias, cinza
Fase líquida	Óleo pirolítico e H ₂ O		

¹ Ar (oxidação parcial), ar enriquecido por oxigénio, oxigénio puro, vapor de água. (Arena, 2012)

3.4.2. Combustão

Para garantir uma completa combustão dos resíduos durante a fase de conversão térmica, os gases resultantes da incineração no interior da câmara deverão estar pelo menos a 850°C pelo menos durante dois segundos após ser adicionado o ar de combustão (Directiva 2000/76/EC) podendo atingir 1400°C e a relação de excesso de ar deve situar-se entre 1.6 a 2.2 no caso da grelha móvel (Spliethoff, 2010); com um intervalo mais restrito - 1.4 a 1.5, no caso de ser utilizada a tecnologia de leito fluidificado; podendo atingir 2 a 2.5 no caso do forno rotativo (Leckner, 2014).

3.4.3. Gaseificação

A gaseificação consiste na conversão termoquímica de resíduos em combustíveis ou gás sintético (maioritariamente CO₂ e H₂O). Pode ser definido como uma oxidação parcial dos resíduos, i.e. oxidação em condições sub-estequiométricas (Leckner, 2014). Tipicamente, ocorre a temperaturas superiores a 600°C. Nestas condições, o gás resultante do processo de oxidação (gás sintético) difere do gás de combustão na medida em que é composto por matéria que não foi completamente oxidada, logo com valor calorífico armazenado, que pode ser utilizado para diferentes aplicações numa fase subsequente do processo, na mesma ou noutra unidade de tratamento térmico (Arena, 2012).

FASE PRINCIPAL (PRODUÇÃO DE GÁS)

O processo é dividido em duas fases de forma a produzir gás sintético:

- I. Primeiro, desenvolve-se a fase de pirólise, responsável por separar a componente volátil do combustível, que ocorre a temperaturas inferiores a 600°C.
- II. O produto sólido resultante, chamado char, constituído por cinzas (ash) e carbono (fixed carbon), é submetido a uma segunda fase do processo, onde reage quimicamente com um meio de oxidação fornecido (Klein, 2002). Sendo, o processo de gaseificação classificado consoante o meio de oxidação utilizado (Basu, 2013). O poder calorífico do gás sintético tem entre 4 e 7 MJ/m³, no caso de uma oxidação parcial com ar; varia entre MJ/m³, no caso de ser usado ar enriquecido por oxigénio (i.e. mistura de nitrogénio e grandes concentrações de oxigénio); varia entre 10 e 15 MJ/m³ no caso de ser usado oxigénio puro; podendo atingir uma gama de 15 e 20 MJ/m³ caso seja utilizado vapor de água (gaseificação indirecta), caso em que necessita de uma fonte externa de calor. (Arena 2012; Bajić. 2015)

TRATAMENTO SECUNDÁRIO (TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA)

- I. Aproveitamento do gás: consoante a tecnologia usada, o gás resultante do processo anterior é “incinerado” (combustão) num reactor próprio para destruir a componente orgânica, com aproveitamento subsequente de energia – processos combinados – associado a uma turbina a

vapor segundo Bébar et al. (2005) (Tipo 1: requer câmara de combustão e uma turbina a vapor, além da câmara de gaseificação; com eficiência líquida de produção eléctrica de 15-24%.) Ou pode ser submetido simplesmente a um processo de gaseificação do gás sintético com aproveitamento por meio de uma turbina a gás (20-30%) ou motor a gás (14-26%), segundo Arena (2012) (Tipo 2: apenas requer uma câmara de gaseificação e turbina ou motor a gás). Caso a produção de gás sintético e a sua queima ocorram simultaneamente, o sistema é em tudo idêntico aos sistemas típicos de incineração, com aproveitamento de energia por meio de uma turbina a vapor (Tipo 3: requer uma câmara de gaseificação e uma turbina a vapor).

- II. Alternativamente: pode proceder-se à condensação dos gases resultantes do processo para produzir gás natural ou metano (DEFRA, 2013)

3.4.4. Pirólise

A pirólise consiste na degradação térmica de resíduos em ambiente controlado, dada na ausência (ou quase) de oxigénio, a baixas temperaturas (na ordem dos 500 a 800°C) e a uma pressão ligeiramente superior à pressão atmosférica. Origina-se no processo uma fracção sólida (coque sólido) e uma fracção gasosa (gás pirolítico), que é transformada numa fase seguinte do processo, com recuperação de energia ou “armazenado” sob a forma de energia num produto (óleo pirolítico) (Che et. al., 2014).

Uma vez que o processo decorre em condições estequiométricas perto do limiar teórico (rácio de oxigénio nulo) é activado necessariamente por uma fonte externa de calor (e.g. accionada por electricidade) segundo Klinghoffer e Castaldi (2013)

FASE PRINCIPAL (PRODUÇÃO DE GÁS E SÓLIDO)

- I. Processo de “combustão” lenta: o processo inicia-se com a formação de um gás a partir das partículas voláteis resultantes dos resíduos a temperaturas na ordem dos 400 a 600°C;
- II. Pirólise: Dá-se a decomposição das moléculas orgânicas dos resíduos quando são atingidas temperaturas entre 500 e 800°C, produzindo uma fracção sólida e uma fracção gasosa (gás pirolítico);

O valor calorífico do gás resultante nesta fase, varia entre 5 e 15 MJ/m³, caso seja derivado de resíduos urbanos; atingindo os 15 a 30 MJ/m³ apenas quando são utilizados CDR (European IPPC Bureau, 2006)

- III. Gaseificação: Conversão do carvão mineral restante do processo anterior entre os 800 e 1000°C com recurso a um meio de oxidação (e.g. ar ou vapor de água), libertando CO e H₂;

TRATAMENTO SECUNDÁRIO (TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA)

- I. Aproveitamento do gás (recuperação de energia): consoante a tecnologia usada, o gás resultante do processo anterior e o coque (resíduo sólido resultante da destilação do carvão mineral) são

“incinerados” numa câmara de combustão típica para destruir a componente orgânica, com aproveitamento subsequente de energia numa caldeira – processos combinados (Tipo 1: requer câmara de combustão, além da câmara de pirólise). Ou numa câmara de gaseificação com um motor a gás para produção de electricidade (Che et al., 2014) (Tipo 2: apenas requer uma câmara de gaseificação).

- II. Alternativamente: pode proceder-se à condensação dos gases resultantes do processo para produzir um óleo com características energéticas (óleo pirolítico).

3.5 Capacidade dos sistemas

De acordo com DEFRA (2014) o local e a dimensão da unidade de tratamento térmico influenciam o tipo de tecnologia apropriada para o efeito – “a escolha do local onde a unidade é implementada tem um impacto crítico na aceitabilidade e na viabilidade dos sistemas WtE, da escolha da tecnologia e dos outputs gerados”.

A produção de electricidade, conectando-se à rede eléctrica, está menos limitada pela escolha do lugar do que os sistemas que pretendam produzir metano para distribuição na rede, pelo que a adopção por este tipo de soluções está dependente da proximidade a zonas industriais ou comerciais quando a ligação a uma rede de distribuição de metano esteja limitada em termos de proximidade ou na sua inexistência. Estas soluções coexistem sobretudo nos países nórdicos. Acresce que sistemas de pequenas escalas concebidos para servir pequenos aglomerados tem menos impacto visual do que sistemas de grande escala e a afluência de resíduos (transporte e acessos) será menos expressiva, pelo que a sua aceitação será menos condicionada. (DEFRA, 2014)

A limitação da escala pode estar associada, entre outros factores, ao preço médio dos terrenos ou à limitação de espaço. Acresce que, se for possível reduzir a quantidade de resíduos depositada em aterro por meio de um sistema de tratamento térmico (que reduzem eficazmente o volume de resíduos) este factor é favorável à implementação de soluções deste tipo.

Segundo Stein (2004), os sistemas de incineração convencional são tendencialmente capacitados para operar em grandes dimensões, obtendo por essa via o benefício associado ao efeito de economia de escala, o que em centros urbanos parece ser apropriado. Porém, em zonas rurais ou semi-urbanas os custos de transporte de menores quantidades de resíduos associados a uma menor densidade de pontos de recolha tornam-se muito elevados. Pelo que nestas situações as instalações de incineração de pequena escala apresentam-se como uma solução competitiva para escalas inferiores a 50.000 t/ano.

De modo a classificar a escala este tipo de sistemas, admite-se a definição proposta por (Reimann, 2009) que estabelece a escala das plantas em função da capacidade de projecto ou da taxa de alimentação,

embora outras definições de escala de unidades WtE admitam outros limites. Entre parêntesis colocaram-se os valores expressos de toneladas por dia expectáveis, tendo como base um período anual efectivo de funcionamento de 90% do ano, ou seja, 7884 horas. Assim admite-se:

- Pequena escala: menos de 100.000 t/ano (aprox. inferior a 300 t/dia)
- Média escala: entre 100.00 e 250.000 t/ano (aprox. entre 300 e 760 t/dia)
- Grande escala: mais de 250.000 t/ano (aprox. superior a 760 t/dia)

Embora a capacidade de projecto seja um bom indicador de comparação das dimensões dos sistemas, é importante materializar os conceitos de disponibilidade e período de funcionamento efectivo. A definição destes conceitos permite aferir a quantidade efectiva (ou real) de resíduos processados nas unidades de valorização, pelo que a sua definição será de grande utilidade aquando da definição dos custos unitários dos sistemas (expressos em € por tonelada de resíduos afluídos à instalação).

Deve notar-se que a capacidade de projecto diz respeito à capacidade máxima em termos teóricos para a qual a unidade está capacitada para funcionar, enquanto a capacidade operacional traduz o valor real da quantidade de resíduos processados, tendo em conta o período de paragem a que as unidades são sujeitas para manutenção. Assim, define-se a disponibilidade da unidade como a relação directa entre a capacidade operacional e a capacidade de projecto:

$$\textit{Disponibilidade} = \frac{\textit{Capacidade operacional}}{\textit{Capacidade de projecto}} \quad (4)$$

4 Tecnologias WtE

4.1 Sistemas de conversão térmica

4.1.1. Enquadramento

As principais tecnologias de incineração por combustão assentam nos seguintes reactores/sistemas de conversão – Grelha móvel, leito fluidificado e forno rotativo. Esta fase corresponde à fase principal de conversão térmica, onde os resíduos são efectivamente transformados. (A fase subsequente corresponde à fase de recuperação de energia, podendo estar ou não desacoplada da fase anterior).

Os sistemas de incineração convencional constituem tecnologias amadurecidas do ponto de vista comercial (recorde-se a sua implementação no **Quadro 3.1**). Ao contrário dos tratamentos térmicos avançados, para os quais a maioria da informação disponível diz respeito a estudos conduzidos a nível laboratorial (Couto et al., 2015; Che et al. 2014).

Desta forma, procurou-se catalogar um conjunto de sistemas assentes em processos de gaseificação, cujo avanço tecnológico permita a sua implementação a escalas “industriais”. De facto, todas estas tecnologias podem também utilizadas em regime de gaseificação e pirólise. Os leitos fluidificados – estáveis (LFE) e com circulação (LFC) – com maior aplicação na gaseificação e o forno rotativo (FR) com maior incidência na pirólise. No **Anexo 8** encontra-se uma compilação das principais tecnologias de gaseificação, a que o IEA Bioenergy – Task 36 atribuiu um avançado estado de desenvolvimento técnico e comercial.

4.1.2. Grelha Móvel

O funcionamento geral da grelha móvel pode ser observado na **Fig. 4.1 (a)** e a descrição do processo no **Quadro 4.1**.

O ar de combustão é adicionado por baixo da grelha, ao longo de diferentes troços, podendo existir jactos instalados na parte superior da câmara que pulverizam ar secundário, misturando os gases de combustão (recirculação) para promover a oxidação completa dos resíduos. Estes procedimentos são ajustados por forma a que no fim da grelha não reste material combustível. As cinzas (material inerte) são recolhidas no último troço da grelha, juntamente com outro tipo de objectos e metais, sendo depois encaminhadas para aterro ou utilizadas para outro fim (Leckner, 2014).

Quadro 4. 1: Tecnologia de grelha móvel. Descrição do processo de conversão térmica.

Tecnologia	Descrição
	Os resíduos são colocados sobre uma grelha móvel, por um mecanismo de alimentação, que os transporta a uma velocidade típica de 0.1 m/min, impulsionados por um mecanismo de rolamentos ou idêntico. À medida que avança, a camada superficial dos resíduos é exposta à radiação das paredes refractárias do forno e às chamas formadas pelos gases voláteis, reduzindo progressivamente o teor de humidade e aumentando a temperatura. Quando a temperatura de ignição é atingida, inicia-se a combustão (Leckner, 2014)

Grelha móvel Com as devidas considerações (Quadro 3.2):

- Estes sistemas podem ser utilizados igualmente com processos de *gaseificação* ou *pirólise*. Nestes casos, a grelha tanto pode servir para produzir gás sintético, que é queimado numa segunda câmara a temperaturas mais elevadas; ou estar situada na segunda fase do processo, caso em que os resíduos são inicialmente sujeitos a uma fase gaseificação ou pirólise (e.g. num forno rotativo), sendo depois o gás e a fracção sólida encaminhados para uma câmara de combustão com grelha móvel.

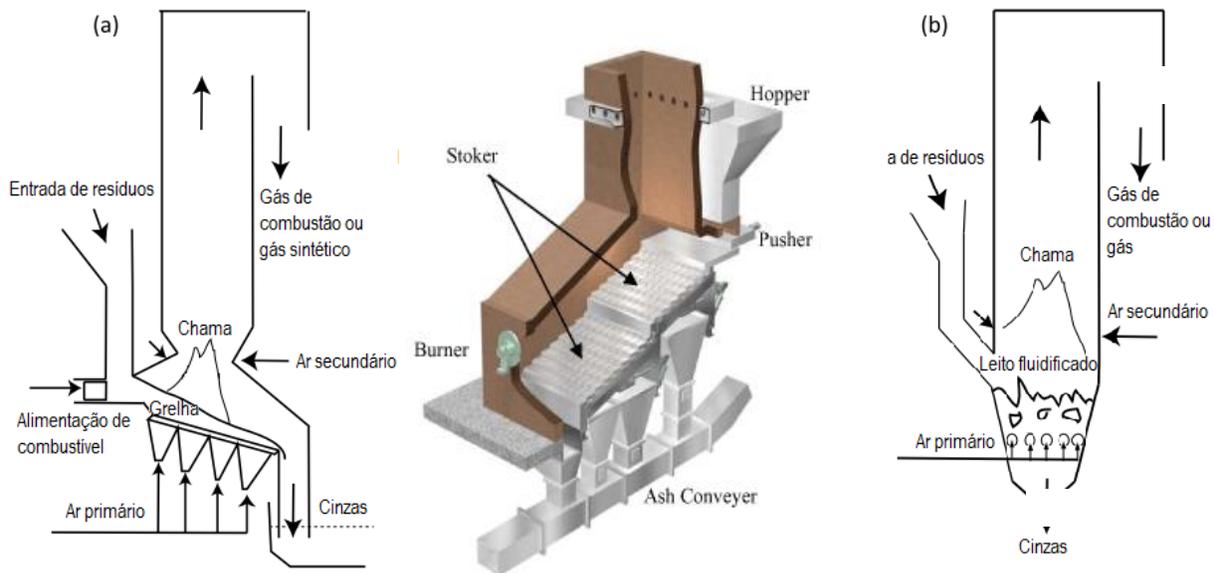


Fig. 4.1: Principais sistemas de conversão térmica. (a) grelha móvel, (b) leito fluidificado (continua). Adaptado de Leckner (2014); GEFC (2016).

4.1.3. Leito Fluidificado

Existem dois tipos de sistemas: leito fluidificado estacionário (LFE) e leito fluidificado com circulação (LFC), ambos sintetizados na **Fig. 4.1 (b)**. Não obstante a sua aplicação em unidades de incineração por

combustão aqui retratados, esta tecnologia é comumente utilizada em casos de unidades de gaseificação. O funcionamento das tecnologias está descrito nos **Quadro 4.2** e **Quadro 2.3**.

Quadro 4.2: Tecnologia de leito fluidificado estacionário. Descrição do processo de conversão térmica.

Tecnologia	Descrição
LFE	<p>De forma geral, os resíduos são colocados sobre uma camada inerte (constituída por partículas de areia com dimensão de 0.5 – 3 mm) com uma temperatura uniforme ao longo da superfície da camada (European IPPC Bureau, 2006). O facto de a camada entrar em fusão (leito fluidificado) faz com que os resíduos sejam misturados facilmente com o material inerte, promovendo uma melhor homogeneização das condições de oxidação, mas por outro lado, envolvendo igualmente o material oxidado não-volátil no decorrer do processo. Segundo Levy e Cabeças (2006), isso contribui para a deterioração dos sistemas de tratamento de gases. No caso de serem utilizados resíduos de constituição heterogénea (e.g. urbanos), para que as condições de funcionamento (temperatura e rácio de oxigénio) sejam estáveis, os resíduos devem ser sujeitos a um pré-tratamento com vista a cumprir determinadas dimensões (fragmentação) (European IPPC Bureau, 2006). Acresce que, o facto da camada de areia ter uma inércia térmica elevada, reduz a quantidade de combustível auxiliar fornecido durante o processo, sendo apenas utilizado (ar pré-aquecido) na fase inicial até ser atingida a temperatura de ignição dos resíduos (ou de acordo com a legislação). Por outro lado, no caso de serem usados resíduos urbanos, a componente volátil dos resíduos oxida à superfície, onde existe maior turbulência (Arena, 2012), o que evita a necessidade de colocar tubos de caldeira no interior da camada de areia. À semelhança dos sistemas de grelha móvel, o calor disponível resultante da combustão dos resíduos (ou gaseificação) permanece maioritariamente à superfície, a temperaturas na ordem dos 850 a 950°C (European IPPC Bureau, 2006). Na maioria dos casos por combustão o calor é transmitido, pelos gases de combustão, ao dispositivo onde ocorre a aquisição de energia, e.g. sistema de caldeira e turbina a vapor com ciclo de Rankine. No fim do processo, o material da camada (areia) deve ser removido, depois de arrefecido, juntamente com material não oxidado (cinzas e resíduos metais) que se encontra misturado na camada (Leckner, 2014).</p> <p>Com as devidas considerações (Quadro 3.2):</p> <p>Estas tecnologias são tipicamente ser adaptadas a tecnologias em regime de gaseificação (ou pirólise, mais raramente) geralmente de menores dimensões, alterando as condições de estequiometria dentro da câmara de combustão/gaseificação.</p>

O ar de combustão (no caso da gaseificação, podem ser utilizados outros meios de oxidação – **Quadro 3.2**) é injectado a partir do fundo, ou com melhores resultados, segundo Leckner (2014), através de tubagens próprias fixadas a meio do leito, que evitam o adensamento de resíduos no fundo e facilitam a remoção da camada de areia. Pode também ser injectado ar secundário para promover as reacções de oxidação, na parte superior da câmara de combustão (ou gaseificação).

Quadro 4. 3: Tecnologia de leito fluidificado com circulação. Descrição do processo de conversão térmica.

Tecnologia	Descrição
LFC	<p>O LFC difere do LFE no facto de o gás de combustão gerado durante a oxidação dos resíduos atingir velocidades superficiais muito elevadas (tipicamente, acima de 3 m/s), sendo por isso responsável pela instabilização parcial do material do leito (European IPPC Bureau, 2006). Desta forma, é constituído por uma componente sólida - partículas sólidas em suspensão (inert material and waste char) (Arena, 2012). A matéria particulada presente no gás é tanto maior quanto maior for a concentração de calor à superfície. A redução da secção de projecto (com aumento consequente da velocidade de fluidificação) pode contribuir para este fenómeno. No caso do LFC, estas partículas são devolvidas novamente à camada de areia, por via de um ciclone gerado que envia as partículas devidamente separadas, por via de condutas próprias, da zona de escape dos gases para a zona inferior (Leckner, 2014) Esta componente sólida (partículas, carvão ou cinzas em suspensão) retida no gás de combustão ao ser recirculado (fluxo de massa de recirculação) acaba por ser exposta durante mais tempo às elevadas temperaturas no interior da câmara de gaseificação (aumentando tempo de residência) promovendo melhores taxas de oxidação. Este fenómeno, num LFE, não se verifica ou é menos evidente, i.e. a quantidade de partículas sólidas oxidadas em suspensão no gás de combustão é muito menor.</p>

4.1.4. Forno Rotativo

O forno rotativo tem múltiplas aplicações, nomeadamente na incineração de resíduos industriais para produzir cimento, combustão de resíduos ou em combinação com processos de gaseificação e pirólise (Arena, 2012;Leckner, 2014) – processos combinados. O modo geral de funcionamento pode ser visualizado na **Fig. 4.2** e a descrição do processo no **Quadro 4.4**.

Quadro 4.4: Tecnologia de forno rotativo. Descrição do processo de conversão térmica.

Tecnologia	Descrição
Leito fluidificado	<p>O forno consiste num cilindro revestido por material refractário, geralmente inclinado em relação à horizontal. Os resíduos são inseridos na extremidade superior, sendo sujeitos à rotação do forno (na ordem das 0.05-2 rpm) (Leckner, 2014). A combustão é promovida exclusivamente pelo calor gerado no processo; As condições de funcionamento (tempo de residência e temperatura) são influenciadas pelo comprimento, diâmetro, velocidade angular, inclinação.</p> <p>Com as devidas considerações (Quadro 3.2):</p> <p>No caso da gaseificação e pirólise, deverão ser garantidos rácios de oxigénio inferiores à unidade. No caso da pirólise as condições de funcionamento são ainda condicionadas pela existência de fontes de calor externas.</p>

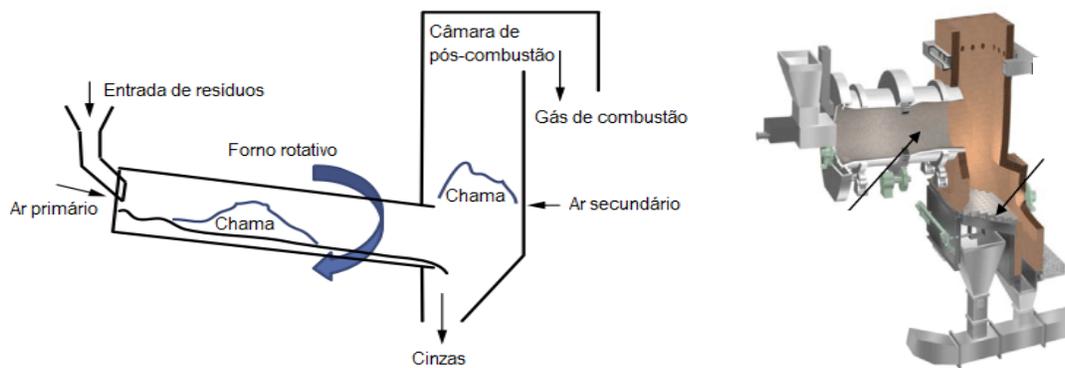


Fig. 4.2: Principais sistemas de conversão térmica (continuação). (c) forno rotativo. Adaptado de Leckner (2014); GECF (2016).

Por vezes o forno rotativo é utilizado como uma câmara de pré-tratamento, seguido de uma câmara de combustão, e.g. com grelha móvel de pequenas dimensões. Isso é evidente nas tecnologias de gaseificação e pirólise, onde os gases sintéticos (gerados no forno rotativo) são encaminhados para uma câmara de combustão a temperaturas de 1300°C (e rácio de oxigénio na ordem dos 1.2), juntamente com os restantes produtos formados (carvão, resíduos de metais, cinza e detritos), promovendo a fusão destes materiais – processos combinados.

4.2 Sistemas de produção de energia e controlo de emissões

4.2.1. Enquadramento

A fase de produção de energia é a fase subsequente à conversão térmica dos resíduos, permitindo assim, por meio de mecanismos próprios (**Quadro 4.5**) gerar energia sob a forma de calor, electricidade ou ambas as formas de energia em regime de co-geração. Embora na maioria dos sistemas tradicionais se possa verificar uma divisão física entre conversão térmica e transformação energética, em módulos destinados a essas funções, podem existir sistemas concebidos para operar de forma integrada, utilizando a interface das paredes da câmara onde se processa a conversão térmica como forma de transmitir o calor gerado ao sistema de transformação de energia, fazendo uso de paredes tubulares preenchidas por água. (Leckner, 2014; Levy e Cabeças, 2006).

O produto energético resultante da conversão térmica é denominado gás de combustão, no caso da incineração, ou gás sintético no caso da gaseificação/pirólise, consoante as condições térmico-químicas assim o caracterizem, uma vez que o produto gasoso é libertado aquando da oxidação dos resíduos. Como se verá abaixo, para se transformar em gás sintético, o gás resultante da oxidação dos resíduos nas tecnologias de gaseificação/pirólise pode ser sujeito ou não a uma filtragem prévia.

Quadro 4.5: Tecnologias de transformação de energia.

Tecnologias de transformação de energia	Turbina a vapor	Turbina a gás	Motor a gás
Aplicação:			
Processo térmico-químico ^{2,3}	Todos	Gaseificação/Pirólise	Gaseificação/Pirólise
Processo termodinâmico ²	Ciclo de Rankine	Ciclo de Brayton	Ciclo de Otto

¹FEAM (2012) ²Arena (2012) e FEAM (2012); ³DEFRA (2014);

A energia produzida pode ter como destino final aglomerados urbanos, espaços de escritórios ou retalho (tubagens de água quente, electricidade), a própria rede nacional de electricidade responsável por redistribuir a energia, o sector industrial, a unidade de tratamento térmico para consumo interno ou outras aplicações específicas. (DEFRA, 2014). Os processos descritos de seguida constituem os mais comuns e validados tecnicamente para produzir energia e com maior interesse para análise nesta dissertação. No entanto, a energia produzida pode ser convertida em combustíveis secundários para utilização em veículos ou em biogás (em determinadas condições). No entanto, estas vias limitam a disponibilização de energia produzida para utilização na própria central, o que pode reduzir a eficiência global do sistema, uma vez que as unidades têm invariavelmente consumo energético interno. O gás sintético produzido pode ainda ser transformado em metano, em vez de ser queimado. Esta é uma forma indirecta de fornecer calor, uma vez que pode ser distribuído à rede de gás, constituindo-se uma alternativa ao gás natural da rede. Uma vez que não existem perdas directas de energia na produção de vapor no interior da unidade, a eficiência global do sistema fica condicionada pela eficiência dos sistemas de caldeira que existam nas habitações e não pode ser reportada directamente à unidade (DEFRA, 2014).

4.2.2. Sistemas aplicáveis em regime de combustão

A única forma de produzir energia nos sistemas de incineração por combustão é fazer o aproveitamento do calor armazenado no gás de combustão gerado na fase de conversão térmica para aumentar a temperatura de uma caldeira preenchida de água por forma a produzir vapor. A transmissão do calor dos gases de combustão à caldeira pode dar-se por radiação e convecção ou por tubagens caso o sistema de transformação de energia esteja separado da câmara de combustão (Levy e Cabeças, 2006).

O vapor de água gerado é, subsequentemente, utilizado para accionar uma turbina a vapor ligada a um gerador caso se pretenda produzir electricidade, como descrito no **Quadro 4.6**.

O processo de produção eléctrica por via da turbina a vapor (**Fig. 4.3**) tem por base o ciclo de Rankine. Este princípio termodinâmico pode ser sintetizado como uma forma de conversão de calor em trabalho, que traduz a variação de energia cinética que ocorre enquanto é accionado o movimento do rotor. Quando o vapor aquecido entra na turbina verifica-se uma expansão adiabática, pelo que a pressão e a

temperatura diminuem, traduzindo-se assim a troca de energia. Após sair da turbina o vapor é devolvido ao estado líquido (num condensador) a pressão constante sendo novamente re-circulado (Spakovszky, 2008).

Quadro 4.6: Caracterização dos sistemas de transformação de energia decorrentes da incineração em função do tipo de energia produzida.

Energia produzida	Calor	Electricidade
Combustão (Descrição do processo)	Sistema de caldeira (O gás de combustão resultante da oxidação dos resíduos transporta uma grande quantidade de energia sob a forma de calor que transmite por convecção/radiação ou tubagens à caldeira. O gás resultante da combustão dos resíduos é filtrado e expulso do sistema) ^{1,2}	Turbina a vapor (O calor gerado é armazenado numa caldeira, sendo de seguida utilizado para accionar uma turbina a vapor, ligada a um gerador com produção de electricidade. O gás resultante da combustão dos resíduos é filtrado e expulso do sistema) ^{1,2}

¹Levy e Cabeças (2006); ²DEFRA (2014).

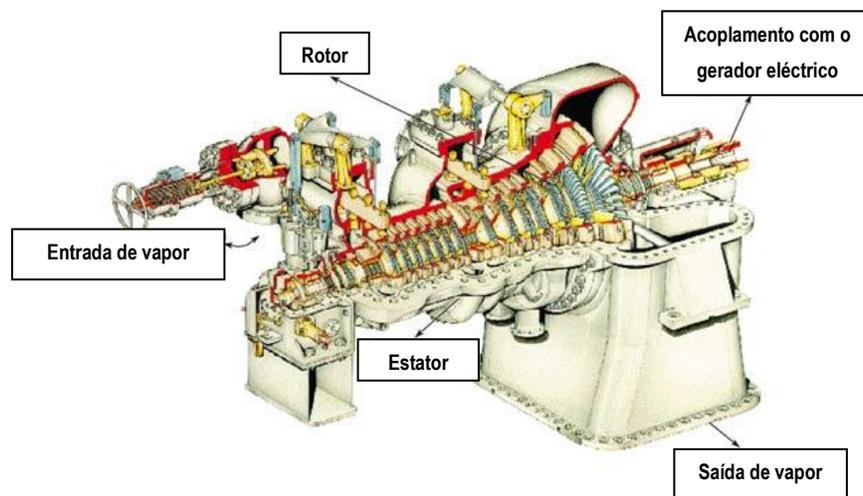


Fig. 4.3: Representação esquemática de uma turbina a vapor. Adaptado de FEAM (2012)

4.2.3. Sistemas aplicáveis em TTA

Em sistemas que operem em regime de gaseificação ou pirólise, os mecanismos de produção de energia estão dependentes do tipo de energia que se pretenda produzir. Em sistemas de geração de energia sob a forma de calor, é utilizado o gás sintético resultante da oxidação directa dos resíduos, promovendo-se assim a combustão do mesmo. Por outro lado, em sistemas de produção de electricidade, o gás resultante da oxidação dos resíduos é primeiro filtrado, transformando-se apenas após esta etapa em gás sintético disponível para combustão. O facto de no primeiro caso ser queimado o gás sintético directamente e no segundo caso este necessitar de ser filtrado antes da sua queima, faz com que parte

do sistema de controlo de emissões nas unidades de produção de electricidade esteja situado a montante da produção de energia. Enquanto nos sistemas de produção de calor, o controlo de emissões apenas é feito apenas a jusante da produção de energia (Arena, 2012).

Note-se que em ambos os casos, o poder calorífico armazenado no gás sintético é aproveitado por via da queima do próprio gás, uma vez que este possui energia química armazenada, constituindo este um passo intermédio face ao sistema descrito para os sistemas de incineração (Arena et al., 2011).

Além das considerações feitas relativamente ao posicionamento do sistema de filtragem dos gases, os mecanismos de produção de energia utilizados são também distintos consoante o tipo de energia produzida para a qual a unidade está vocacionada (**Quadro 4.7**). Para produzir calor basta utilizar uma caldeira para produzir vapor. Porém é pouco comum os tratamentos térmicos avançados produzirem apenas calor, sendo este um método intermédio, mas não o único, para produzir electricidade.

Para produzir electricidade existem duas opções. Na sua forma mais simplista, anteriormente descrita: basta utilizar o vapor gerado pela oxidação do gás para accionar uma turbina acoplada a um gerador, de forma idêntica ao que se faz nas unidades de incineração (**Fig. 4.3**). No entanto, a produção de vapor, nestas condições, tem uma eficiência idêntica à dos incineradores por combustão.

No entanto, a produção de electricidade pode seguir outra via: o gás filtrado é sujeito a uma câmara de combustão que é responsável por accionar directamente uma turbina ou um motor a gás, com melhores resultados na eficiência das unidades (**Fig. 4.4**).

Quadro 4.7: Caracterização dos sistemas de transformação de energia decorrentes dos sistemas de gasificação/pirólise em função do tipo de energia produzida.

Energia produzida	Calor	Electricidade
Gaseificação/Pirólise (Descrição do processo)	Caldeira a vapor (A combustão do gás sintético faz aumentar a temperatura da caldeira sendo a energia armazenada na forma de calor. O gás resultante da combustão do gás sintético é filtrado e expulso do sistema) ^{1,2}	<p>a. Turbina a vapor (processo idêntico ao aproveitamento eléctrico na incineração, com base no ciclo de Rankine).</p> <p>b. Turbina ou motor a gás (Dá-se a filtragem do gás resultante da oxidação dos resíduos dando-se a produção de energia por meio de uma turbina ou de um motor accionado pelo gás filtrado)^{1,2}</p>

¹Arena (2012);²DEFRA(2014)

O princípio de funcionamento de uma turbina a gás (**Fig. 4.4**) pode ser explicado com base no ciclo de Brayton. O gás sintético gerado aquando da oxidação dos resíduos é introduzido na turbina a gás verificando-se uma compressão adiabática, com aumento da pressão e conseqüente aumento de temperatura. De seguida, o gás é introduzido na câmara de combustão, onde é queimado a pressão

constante. Ao passar na zona da turbina propriamente dita, o gás é sujeito a uma expansão adiabática à medida que transfere a energia armazenada para as pás da turbina, cujo trabalho realizado é responsável por accionar o gerador eléctrico, sob a forma de energia cinética, sendo ainda utilizado parte deste trabalho para manter o movimento do compressor (Spakovszky, 2008)

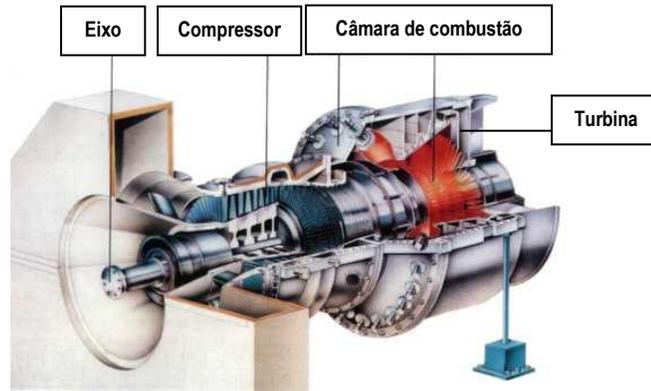


Fig. 4.4: Representação esquemática de uma turbina a gás. Adaptado de Wärtsilä (2016)

Além da turbina a gás, os sistemas térmicos avançados recorrem usualmente a um motor a gás (ou motor de combustão interna). Este processo, descrito pelo ciclo de Otto, é frequentemente utilizado em veículos para promover o movimento de rotação do eixo das rodas. O mesmo princípio (Fig. 4.5) pode ser extrapolado para os sistemas de tratamento térmico com produção de energia, em que o movimento imposto ao eixo é transmitido a um gerador eléctrico. O ciclo de compressão e expansão criado permite a movimentação de um êmbolo, que acoplado a um sistema de manivelas permite gerar um movimento de rotação, que por sua vez é transmitido a um gerador para produzir electricidade (Spakovszky, 2008).

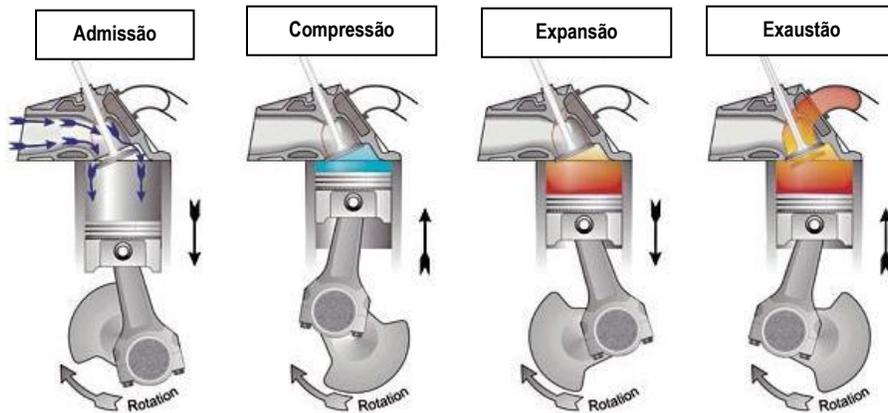


Fig. 4.5: Representação esquemática de um motor a gás. Fases do ciclo de Otto. Adaptado de Maybach (2012)

4.2.4. Co-geração

Os processos descritos de forma isolada pressupõem apenas a produção de um tipo de energia, no entanto é possível produzir, com uma eficiência global superior a 40%, electricidade e calor simultaneamente em regime de co-geração (CHP).

Tanto no fim do ciclo de Brayton (turbina a gás) como no ciclo de Rankine (turbina a vapor), os gases de exaustão encontram-se a temperatura elevadas (550°C), pelo que é comum os sistemas térmicos avançados com turbinas a gás ou sistemas convencionais com turbinas a vapor fazerem uso do gás resultante para promover o aquecimento de uma caldeira a vapor com distribuição subsequente de calor. (FEAM, 2012).

Os sistemas que no seu conjunto permitem recuperar energia sob a forma de electricidade e calor (ciclo combinado) podem ser sistematizados por uma caldeira de recuperação de calor (HRSG). (FEAM, 2012)

Este método destina-se à produção de electricidade enquanto é aproveitado o calor que é gerado na oxidação dos resíduos durante o processo. Quanto maior a quantidade de calor que se pretenda aproveitar menor será energia eléctrica produzida, pelo que o preço da electricidade e do calor fornecido condicionam este balanço, bem como a procura de energia sob a forma de calor por parte de entidades próximas da unidade. Este efeito é tanto mais evidente nos sistemas de co-geração com turbinas a vapor para produzir electricidade, sendo menos expressivo em sistemas providos de turbinas a gás para o mesmo efeito. (Gohlke, 2009; DEFRA, 2014)

4.2.5 Controlo de emissões

O controlo de emissões, quer este se dê a montante ou a jusante da fase de produção de energia, nas condições particulares anteriormente vistas, tem como função limitar as emissões atmosféricas de determinados produtos que se geram durante a oxidação dos resíduos e/ou do gás sintético. A directiva europeia para a incineração de resíduos (2000/76/EU) e a directiva para as emissões industriais (2010/75/EU) estabelece a limitação dos produtos mencionados na **Fig. 3.1**, que devem ser continuamente monitorizados nas unidades de tratamento térmico. Podem ainda ter que ser medidas as concentrações de oxigénio e a temperatura da câmara de combustão. As medições efectuadas na unidade são fornecidas à União Europeia e disponibilizadas publicamente (DEFRA, 2014). Os tratamentos térmicos avançados são caracterizados por terem, regra geral, um melhor desempenho ambiental, face aos sistemas de incineração, e estes no seu conjunto, face aos aterros sanitários.

Nas principais unidades de valorização energética implementadas em Portugal (VALORSUL, LIPOR e ARM) os sistemas de controlo de emissões são idênticos, sendo constituídos por 4 componentes (ISWA, 2012; VALORSUL; Austin, 2013):

- **Dispositivo de redução não catalítica selectiva (SNCR):** responsável pela remoção dos óxidos de azoto, NO_x, através da injeção solução aquosa de amónia na câmara de combustão;
- **Sistema de purificação semi-seco:** responsável pela remoção dos gases ácidos, nomeadamente, dióxido de enxofre, SO₂ e dióxido de nitrogénio, NO₂, através da injeção de hidróxido de cálcio, Ca(OH)₂ (cal hidratada);
- **Injecção de carvão activado:** permite remover, por absorção química, dioxinas e furanos (PCDD e PCDFs) bem como metais pesados (chumbo, Pb, cádmio, Cm, mercúrio, Hg);
- **Filtro de mangas:** permite reter a matéria particulada no fim do processo.

Na **Fig. 4.6** sistematiza-se o sistema de tratamento dos gases de combustão típico das unidades de incineração de RU da VALORSUL, LIPOR e ARM.

No final do processo de limpeza de gases de combustão a componente gasosa é libertada na atmosfera, sendo que a componente sólida (matéria particulada) é depositada nos respectivos aterros sanitários que compõem a unidade de valorização de resíduos.

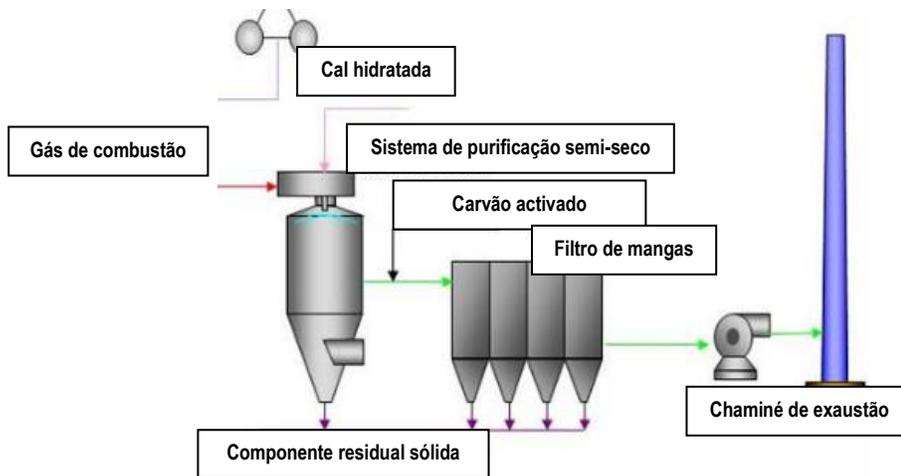


Fig. 4.6: Sistema de tratamento dos gases de combustão. Adaptado de EPEM (2014)

4.3 Factor de eficiência energética R₁

A constante R₁ foi estabelecida através da directiva Directiva 2008/98/EC e está preconizada no DL n.º 73/2011. Permite estimar o factor de eficiência de uma dada unidade de tratamento térmico, a partir da quantidade de energia produzida anualmente, E_p, da quantidade de energia contida nos combustíveis adicionados anualmente que contribuem para a formação de vapor, E_t, da quantidade de energia contida

nos resíduos, E_w e da quantidade de energia importada anualmente (e.g. electricidade), E_i , (não é contabilizado na energia importada, E_i , as componentes dos resíduos e dos combustíveis, E_w e E_f):

$$R_1 = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97 (E_w + E_f)} \quad (3)$$

Desta forma, deverá notar-se que o factor, R_1 , permite normalizar o critério de definição da eficiência dos sistemas, independentemente da constituição dos mesmos, das tecnologias utilizadas ou mesmo do processo termoquímico envolvido (combustão, gaseificação ou pirólise).

O objectivo de R_1 é estabelecer para cada unidade de tratamento térmico de resíduos urbanos se esta se trata de uma unidade de valorização ou de eliminação; para isso define-se que, para efeitos normativos, apenas se pode considerar como operação de valorização (R_1) uma unidade de tratamento térmico que tenha um factor de eficiência, R_1 , superior a 0,65, para unidades posteriores a 31/12/2008 (ou superior a 0,60 para instalações em funcionamento nos termos da legislação comunitária aplicável antes de 01/01/2009). Caso o factor R_1 seja inferior a estes valores, considera-se que corresponde a uma operação de eliminação (D10) de acordo com o DL n.º 73/2011).

Este factor é importante para materializar o conceito de eficiência energética, que traduz em último caso, a capacidade da unidade de tratamento térmico gerar energia, ou seja, a sua componente de valorização. A energia produzida é um produto vendável (e.g. pode ser adquirida pela rede eléctrica nacional ou distribuída sob a forma de água quente para diversos fins) e deve ser tomada em conta como uma fonte de receita anual no estudo da viabilidade económica deste tipo de sistemas.

A incineração de resíduos em Portugal tem uma taxa de gestão de resíduos associada (TGR), cobrada anualmente e correspondente a 70% do valor base da taxa no caso de a operação ser considerada do tipo D10 – Incineração (eliminação) ou correspondente a 25% no caso de ser considerada do tipo R1 – Meio de produção de energia (valorização), referente à quantidade de resíduos (em toneladas) que afluem à unidade. A TGR tem um valor base de 6,6 €/t em 2016, estando previsto um aumento gradual da taxa até 11,0€/t em 2020. A operação D1 – Deposição em aterro (eliminação) paga a totalidade da taxa. No entanto, os resíduos resultantes das operações de incineração ou valorização energética que sejam encaminhados para aterro, designadamente, rejeitados, cinzas e escórias são sujeitos a uma taxa de gestão de resíduos correspondente, respectivamente, apenas a 70% ou 25% deste valor consoante a operação de proveniência desses produtos anteriormente identificadas.

Neste âmbito, a TGR é paga pelas entidades responsáveis pelos sistemas de gestão de resíduos urbanos multimunicipais e intermunicipais. No entanto esta deve ser “repercutida nas tarifas e prestações financeiras cobradas pelos sujeitos passivos.” (Lei n.º 82-D/2014 de 31 de Dezembro)

5 Custos dos sistemas de tratamento convencionais em Portugal

5.1 Enquadramento

Em Portugal a valorização energética tem vindo a evoluir progressivamente nos anos mais recentes. No entanto, o âmbito da sua aplicação é variável: enquanto as primeiras unidades de valorização energética instaladas (da VALORSUL e LIPOR) permitem processar os resíduos dos grandes centros urbanos (com capacidades de projecto na ordem das 600.000 t/ano e 400.000 t/ano), têm surgido nos arquipélagos da Madeira e Açores projectos no sentido de implementar soluções ditas de pequena e média escala.

Esta abordagem permite inferir que os sistemas de valorização energética existentes no continente são de dimensões elevadas, usufruindo por isso de um efeito de economia de escala, por oposição aos sistemas existentes nas Ilhas, que são de escalas muito mais reduzidas - por exemplo, a unidade em funcionamento na Ilha Terceira (TERAMB) tem uma capacidade cerca de 15 vezes inferior à existente na A.M. Lisboa (VALORSUL).

Desta forma, será importante aferir de que forma a redução da escala (devido aos condicionalismos das regiões autónomas, neste caso) tem impacto na avaliação de custos das unidades de valorização energética (**Capítulo 7**). Deve notar-se que não existem diferenças significativas ao nível da tecnologia utilizada (incineração convencional por combustão), podendo no entanto existir diferenças ao nível da eficiência dos processos envolvidos que traduzem o grau de evolução tecnológica inerente a cada unidade de tratamento.

No **sub-capítulo 3.5** definiram-se as capacidades dos sistemas. Neste âmbito, consideram-se as unidades de valorização energética das A.M. de Lisboa – Norte (VALORSUL) e Porto (LIPOR) como sendo sistemas de grande escala (> 250 kt/ano); por outro lado, a central de Ilha da Madeira (ARM) pode ser considerado um sistema de média escala (entre 100 e 250 kt/ano), aproximando-se a sua capacidade real de processamento das 110.000 t/ano. Por último, as centrais de valorização energética projectadas para o arquipélago dos Açores, Ilha Terceira (TERAMB) e Ilha de São Miguel (AMISM), são consideradas no âmbito das unidades de pequena escala (<100 kt/ano).

Tendo em contas as considerações anteriores sobre os sistemas de valorização energética presentes nos arquipélagos da Madeira e Açores, que como se viu correspondem a sistemas de reduzidas dimensões, por oposição ao que se verifica no continente, pretende-se estimar os custos associados ao

tratamento de valorização energética quando aplicada em pequenos e médios aglomerados. Para isso adoptar-se-á a amostra de unidades referidas.

5.2 Estimativa de custos e receitas

Na análise de custos efectuada relativamente às unidades de valorização energética admitiram-se os seguintes pressupostos:

- A análise foi realizada a preços constantes de 2016, medidos em euros (€).
- Os valores obtidos em dólares (\$) foram convertidos a uma taxa de 0,895 (\$ para €)
- As actualizações temporais de custos (inflação) foram obtidas com base nas taxas de variação do Índice de Preços no Consumidor, de acordo com o Instituto Nacional de Estatística (INE)
- Os custos operacionais e receitas calculados (para efeitos de comparação no **capítulo 7**) foram nivelados (“*levelized*”) tendo em conta a capacidade operacional dos sistemas, que se assumiu igual à média aritmética da quantidade de resíduos incinerados por ano nos últimos sete anos completos de operação (2009-2015).
- Nos casos da(s) unidade(s) de valorização implementados há menos de um ano completo de operação ou cuja implementação está prevista num curto espaço de tempo, admitiu-se a capacidade operacional dos sistemas equivalente a 90% da capacidade de projecto (ou seja, uma disponibilidade de 90%).
- O custo de amortização (financiamento) calculado foi nivelado (“*levelized*”) tendo em conta a capacidade operacional média expectável ao longo do período de vida útil da unidade, que se assumiu equivalente a 90% da capacidade de projecto.
- Aplicou-se a tarifa de referência (de electricidade) aplicável e correspondente a 94,6 €/MWh

Os seguintes custos e receitas foram estimados em euros por tonelada de resíduos afluídos à unidade de tratamento (€/t), à excepção do custo de investimento identificado em euros (€):

Custo de investimento (C_i)

Os custos de investimento, C_i , representam a quantidade de capital investido na fase inicial do projecto na implementação da obra e expressaram-se em 10^6 €.

Custo total anual de tratamento (C_t)

O custo total anual, C_t , é equivalente ao somatório do custo de investimento anual, C_i , e dos custos operacionais (e de manutenção) anuais, C_o :

$$C_t = C_i \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + C_o = C_a + C_o \quad (4)$$

Em que:

C_i – Custo de investimento

C_o – Custos operacionais

C_a – Custo de amortização

i – taxa de amortização

n – período de amortização (admitiu-se equivalente ao período de vida útil da infra-estrutura)

Custos operacionais (C_o):

Os custos operacionais representam os custos necessários para permitir o contínuo funcionamento e manutenção das unidades de tratamento (incluindo produtos consumíveis) num determinado período anual de operação, sendo o valor expresso em (€/t).

Para cada período anual de funcionamento, ano_i , o custo operacional (em €/t) é dado por uma parcela fixa (não reflecte o efeito de economia de escala) e uma parcela variável (reflecte o efeito de economia de escala):

$$C_{o,ano\ i} = \frac{C_{o,fixos} \times Capacidade\ nominal + C_{o,variáveis} \times E_{electricidade,bruta}}{Cap_{operacional,ano\ i}} \quad (5)$$

Em que:

$C_{o,ano\ i}$ – custo operacional da unidade no ano i (€/t)

$C_{o,fixos}$ – custos operacionais fixos (€/kW.ano)

Capacidade instalada – Capacidade instalada (de acordo com **Anexo 1**)(kW)

$C_{o,variáveis}$ – custos operacionais variáveis (€/MWh)

$E_{electricidade,bruta}$ – Electricidade produzida no ano i (de acordo com **Anexo 1**) (MWh)

$Cap_{operacional,ano\ i}$ – quantidade de resíduos incinerados no ano i (de acordo com **Anexo 1**) (t)

Os custos operacionais fixos, $C_{o,fixos}$, bem como os custos operacionais variáveis, $C_{o,variáveis}$, encontram-se no **Quadro 5.1**, respectivamente.

Quadro 5.1: Custos operacionais fixos e variáveis (a preços de 2016). Adaptado de EIA (2013)

Parâmetros	Unidade genérica	Unidades ¹
Custos operacionais fixos ¹	351,62	€/kW.ano
Custos operacionais variáveis ¹	7,83	€/MWh

¹ Preços atualizados a 2016; conversão de dólares para euros com factor 0.895

Custo de amortização anual (C_a)

O custo de amortização é uma ferramenta útil no âmbito da gestão de resíduos uma vez que nos permite estimar o resultado líquido anual do investimento relativamente à quantidade de resíduos processados anualmente no tratamento.

Para determinar o custo de amortização das unidades de valorização admitiu-se que o custo de investimento (incluindo financiamento) é despendido progressivamente anualmente durante o período de vida útil da unidade até perfazer a totalidade do investimento (a prestações constantes). Ou seja, admite-se que a parcela anual de amortização corresponde a uma prestação de crédito com as características indicadas no **Quadro 5.2** e a seguinte formulação:

$$C_a = \frac{C_i}{Cap_{operacional}} \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} = \frac{C_i}{Cap_{operacional}} \times f_a \quad (6)$$

Em que:

C_a - Custo de amortização (€/t)

C_i - Custo de investimento (10^6 €)

$Cap_{operacional}$ - Capacidade operacional (t/ano)

f_a - Factor de amortização (-)

Quadro 5.2: Pressupostos de cálculo de estimativa do custo anual de amortização e factor de amortização

Parâmetros	Valor	Unidades
Taxa de amortização (i)	5	%
Vida útil da infra-estrutura ¹	25	anos
Período de amortização (n)	25	anos
Regime de amortização	Tabela Price (SAF)	-
Factor de amortização (f_a)	$\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} = 0,071$	-

¹Adoptou-se o valor intermédio “entre 20 a 30 anos” de acordo com DEFRA (2014)

Receita (R)

Considera-se a Receita, R, como o encaixe financeiro proveniente da venda de electricidade (após descontado o consumo interno). Admite-se um preço de venda, P_v , unitário equivalente a 94.6 €/MWh em Portugal. A expressão que permite estimar a receita unitária num determinado ano de funcionamento da unidade é dada, em função da capacidade operacional, por:

$$R_{ano,i} = \frac{P_{venda} \times E_{electricidade,liquida}}{Cap_{op,ano i}} \quad (7)$$

Em que:

$R_{ano,i}$ - Receita no ano_i (€/t)

P_{venda} – preço de venda unitário (€/kWh)

$E_{\text{electricidade,líquida}}$ – quantidade total de electricidade gerada para venda (Wh)

$Cap_{\text{op,ano } i}$ – quantidade de resíduos incinerados no ano i (t/ano)

Custo efectivo ou resultado líquido (C_e)

Deste modo, pretende-se agora estabelecer as bases para o cálculo do custo efectivo de tratamento, em função da escala das unidades.

Define-se o custo efectivo, C_e , como a totalidade do custo do tratamento, após deduzidas as receitas provenientes de fontes de energia, ou seja, o balanço financeiro entre todos os custos unitários (em €/t) associados à operação, bem como receitas (em €/t).

Desta forma, admite-se:

$$C_e = F(C_o, C_a, R) = \sum C_i - \sum R_i = C_o + C_a - R \quad (8)$$

Em que:

C_o – Custo operacional anual (€/t).

C_a – Custo de amortização anual

R – Receita anual proveniente da venda de energia

Note-se que o custo de amortização, C_a , expressa indirectamente o custo de investimento e financiamento.

5.3 Dados

RU incinerados

A quantidade de resíduos incinerados («RU incinerados») num determinado ano de operação traduz a capacidade operacional. Desta forma, pretende-se que as componentes de custos e receita calculados sejam nivelados (“levelized”) pela capacidade operacional dos sistemas, por forma, a produzir resultados comparáveis (**Anexo 1**).

Produção eléctrica - Método 1

Para as unidades VALORSUL, LIPOR e Ilha da Madeira são conhecidos os valores anuais de «electricidade produzida» e «electricidade vendida» para o período decorrente entre 2009-2015.

A parcela variável dos custos operacionais, expressa na expressão (5), foi calculada com base nos valores de «electricidade produzida» (**Anexo 1**).

A componente de receita, expressa pela expressão (7), foi calculada com base nos valores de «electricidade vendida» (**Anexo 2**). O preço de venda, P_{venda} , foi fixado em 94,6€/MWh.

Produção eléctrica - Método 2

Para as unidades da Ilha Terceira e Ilha de São Miguel não são conhecidos directamente os valores de «electricidade produzida» e «electricidade vendida». Desta forma, no **Quadro 5.3** estão sistematizados os parâmetros técnico-financeiros relevantes que foram utilizados para determinar estes indicadores.

Quadro 5.3: Parâmetros técnico-financeiros para determinação de «electricidade vendida». Adaptado de Lettieri et al. (2010)

	Parâmetros	Símbolo	Unidades utilizadas
Unidade de tratamento	Capacidade de projecto	Cap_d	t/ano
	Taxa de alimentação	r	t/h
Resíduos (input)	Capacidade operacional	Cap_{op}	t/ano
	Poder calorífico	PCI	MJ/kg
	Capacidade térmica <i>input</i>	$E_{th,input}$	MW_{th}
Conversão térmica	Eficiência térmica	$\eta_{th,gas}$	%
	Capacidade térmica gás	E_{th}	MW_{th}
Transformação de energia	Eficiência bruta de produção eléctrica	$\eta_{turbina\ a\ vapor}$	%
Produção de energia	Electricidade bruta gerada ou «electricidade produzida»	$E_{electricidade,bruta}$	MW_e
	Energia bruta auxiliar ou «consumo interno»	$E_{auxiliar}$	MW_e
	Electricidade líquida gerada ou «electricidade vendida»	$E_{electricidade,líquida}$	MW_e
Sistema	Eficiência global do sistema	η_{global}	%
Energia exportada (output)	Preço de venda	P_{venda}	€/kWh
	Receita	R	€/t

A expressão (7) que permite calcular o valor da receita, R , depende directamente do preço de venda (P_{venda}) e da electricidade líquida gerada ($E_{electricidade,líquida}$) (**Quadro 5.3**).

O preço de venda (P_{venda}) foi fixado em 94,6 €/MWh.

O valor de «electricidade produzida» ou electricidade líquida gerada ($E_{electricidade,líquida}$) foi determinado a partir do método proposto por Lettieri et al. (2010), a seguir explanado.

Os valores da taxa de alimentação (r), estabelecem a relação entre a capacidade de projecto e o período efectivo de funcionamento num dado ano de operação. Assim tem-se:

$$\text{taxa de alimentação } (r) = \frac{\text{Capacidade de projecto}}{\text{Período efectivo de funcionamento}} \quad (9)$$

Seja a capacidade térmica dos resíduos ($E_{th, input}$) dada por:

$$E_{th, input} = r \times VC \quad (10)$$

Em que, a taxa de alimentação (r) e o valor calorífico (VC) são conhecidos (**Quadro 5.4**).

Por outro lado, a partir eficiência térmica da câmara de combustão ($\eta_{th, gaseificador}$), que se admitiu igual a 70% (Lettieri, 2010), é possível calcular a capacidade térmica do gás de combustão ($E_{th, combustão}$):

$$E_{th, combustão} = \eta_{th, gaseificador} \times E_{th, input} \quad (11)$$

Pelos que, a electricidade bruta gerada ($E_{electricidade, bruta}$) ou «electricidade produzida» é dada por:

$$E_{electricidade, bruta} = \eta_{turbina \text{ a vapor}} \times E_{th, combustão} \quad (12)$$

Onde se admite que a eficiência bruta de produção eléctrica ($\eta_{turbina \text{ a vapor}}$) é uma função da electricidade bruta gerada ($E_{electricidade, bruta}$), de acordo com Lettieri (2010):

$$\eta_{turbina \text{ a vapor}} = 0,0516 \times \ln E_{electricidade, bruta} + 0,0794 \quad (13)$$

Por outro lado, ao valor de electricidade bruta gerada ($E_{electricidade, bruta}$) deve ser descontado o valor de energia bruta auxiliar ($E_{auxiliar, eléctrica}$) ou simplesmente «consumo interno»:

$$E_{electricidade, líquida} = E_{electricidade, bruta} - E_{auxiliar, eléctrica} \quad (14)$$

O valor de «consumo interno» da unidade da Ilha Terceira é conhecido e corresponde a 25% da «electricidade produzida». Assumiu-se um valor idêntico para a unidade prevista na Ilha de São Miguel (**Quadro 5.4**).

Pelo que, o valor de «electricidade exportada» é dado por:

$$E_{electricidade, líquida} = 0,75 \times E_{electricidade, bruta} \quad (15)$$

No **Quadro 5.4** sistematizam-se os valores de cálculo utilizados.

Quadro 5.4: Pressupostos técnico-financeiros para determinação de «electricidade vendida»

Parâmetros	São Miguel	Terceira ¹	Unidades
Capacidade de projecto	100.000	40.000	t/ano
Taxa de alimentação	12,68 ²	5,00	t/h
Valor calorífico (PCI)	8,00 ⁵	8,00	MJ/kg
Produção média de energia eléctrica	n.d.	400	kWh/t
Capacidade instalada	7,00 ⁴	n.d	MW
Electricidade bruta auxiliar	(n.d.) (25%) ⁵	0,15 (25%)	MWh/t (%)

n.d. – valor de projecto não conhecido ou não disponível. ¹DRA (2014); ²Assumindo um nível de operacionalidade de 90% (1 ano de operação = 365x24x0.9=7884 horas); ⁴Lusa (2014); ⁵Admite-se idêntico ao da unidade da Ilha Terceira, por não ser conhecido o valor real ou de projecto.

Sintetizam-se nos **Anexo 1 e Anexo 2**, respectivamente, os valores anuais estimados «electricidade produzida» e «electricidade vendida» relativos às unidades da Ilha de São Miguel e Ilha Terceira. O processo de cálculo dos referidos valores encontra-se no **Anexo 5**.

5.4 Custos dos sistemas de dimensão >1 100 t/dia

5.4.1 Caracterização dos sistemas

Identificam-se no **Quadro 5.5** as características gerais das unidades de valorização da VALORSUL e LIPOR.

Quadro 5.5: Características das unidades de incineração existentes em Portugal Continental: VALORSUL e LIPOR

Parâmetros	VALORSUL	LIPOR	Unidades
Capacidade de projecto	662.000 ¹	380.000 ²	t/ano
Capacidade eléctrica instalada	50,00 ³	24,70 ²	MW
Área total	40.000 ³		m ²
Entrada em funcionamento	14 Fev. 2000 ¹	Jan. 2000 ⁴	-
Nº de linhas em funcionamento	3 ⁴	2 ⁴	-

¹valor de projecto de acordo com VALORSUL (2016); ²valor de projecto de acordo com APA (2008); ³valor de projecto de acordo com APA (2015); ⁴ISWA (2012);

5.4.1.1 VALORSUL

A unidade da área metropolitana de Lisboa – Norte é da responsabilidade da VALORSUL – uma empresa multimunicipal de gestão de resíduos, integrada pelos municípios de Lisboa, Loures, Amadora, Vila Franca de Xira e Odivelas, e ainda pela Empresa Geral do Fomento, S.A e pela associação AMO MAIS. A VALORSUL é responsável pela gestão dos resíduos urbanos produzidos por 19 Municípios da Grande Lisboa e da Região do Oeste.

A incineração dos RU com valorização energética ocorre na *Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos* em São João da Talha, com uma capacidade de 662.000 toneladas por ano, nos quais se incluem principalmente os resíduos urbanos e equiparados, mas também resíduos gerados na *Estação de Tratamento de Valorização Orgânica* da VALORSUL (APA, 2015).

Permite recuperar sob a forma de energia eléctrica cerca de 500 kWh/ton, dos quais 87% são vendidos à REN. (APA, 2015; AVALER, 2015).

O sistema de valorização energética é constituído por 3 linhas de produção providas de um forno onde ocorre a combustão dos resíduos numa grelha móvel da Detroit Stoker ® do tipo Reverse-Acting Stoker, sendo que a produção de energia se dá através de uma caldeira de produção de vapor e turbina a vapor de condensação da Foster Wheeler® (ISWA, 2012).

Apesar da actividade económica da central de incineração ser o *tratamento e eliminação de outros resíduos não perigosos*, foi atribuída a classificação R1 à operação de tratamento de resíduos desenvolvida pela central em 2015, nos termos do disposto no DL 73/2011, conferindo-lhe assim o estatuto de *Operação de valorização – utilização principal como combustível ou outro meio de produção de energia* (APA, 2015).

5.4.1.2 LIPOR

A incineração de resíduos urbanos na região do Porto está ao cargo da LIPOR – sendo esta a entidade responsável pela gestão dos resíduos urbanos produzidos pelos 8 municípios que integram a referida *Associação de Municípios*, sendo destes o principal município o Porto

A *Central de Valorização Energética* tem uma capacidade de 380.000 toneladas por ano, nos quais se incluem principalmente os resíduos urbanos e equiparados, mas também resíduos gerados na *Central de Valorização Orgânica* (APA, 2008).

Tem capacidade para produzir cerca de 400 kWh/ton, dos quais cerca de 85% são vendidos à REN (Relatório e Contas, 2013).

A constituição do sistema de valorização energética é idêntica à da unidade da VALORSUL, sendo a unidade constituída por duas linhas de produção cujo sistema de conversão térmica é da CNIM® e a caldeira da Martin® (ISWA, 2012).

Em matéria de eficiência energética, a determinação do factor R1, definido na Directiva 73/2011, «carece ainda de análise mais detalhada», pelo que temporariamente é mantida a classificação D10 – *Incineração em terra* (APA, 2013).

5.4.2 Resultados

Custo de investimento

Indicam-se no **Quadro 5.6** e **Fig. 5.1** os valores dos investimentos de cada unidade de valorização, a preços actualizados de 2016 e as respectivas fontes de dados.

Quadro 5.6: Custo de investimento das unidades de valorização energética da VALORSUL e LIPOR (a preços de 2016)

Parâmetros	VALORSUL	LIPOR	Unidades
Custo de investimento¹	280.419.392,24 ²	192.214.262,38 ³	€

¹Preços actualizados a 2016; 2 – CNFC (2010) (“S.M.T. de RSU – área metropolitana de Lisboa AML – Norte”); 3 - CNFC (2010) (“Estação de Incineração de Resíduos Sólidos – LIPOR II”)

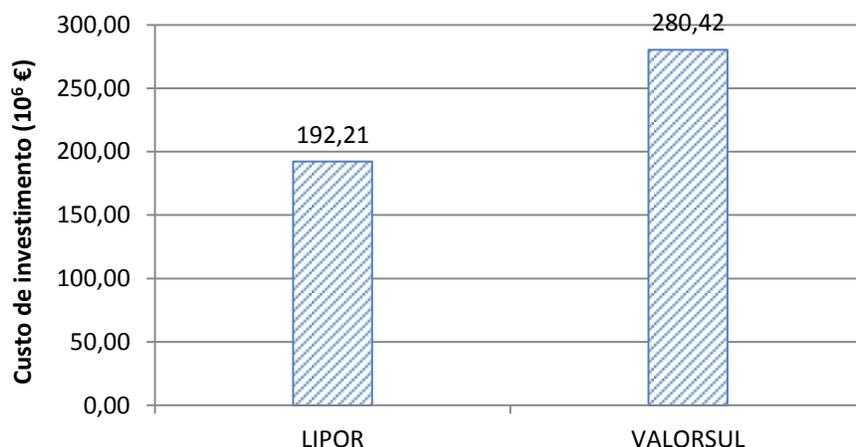


Fig. 5.1: Custo de investimento das unidades de valorização energética da VALORSUL e LIPOR (a preços de 2016)

Custos de amortização

Considerou-se uma taxa de actualização de 5% e um período de amortização do custo de investimento de 25 anos. Os custos foram nivelados pela capacidade operacional, equivalente a 90% da capacidade de projecto.

Custos operacionais

Admite-se o custo operacional equivalente à média aritmética dos custos operacionais estimados no período decorrente entre 2009 e 2015 (preços actualizados a 2016).

Para o cálculo da parcela fixa de custos operacionais teve-se em conta o valor de capacidade instalada (capacidade de produção) de 50,0 e 24,7 MW, respectivamente, para unidades da VALORSUL e LIPOR (APA, 2015; APA, 2008).

Para o cálculo da parcela variável de custos operacionais teve-se em conta o valor de «electricidade produzida» no período entre 2009-2015 (**Anexo 1**).

Por forma a nivelar os custos (“*levelized*”) admitiram-se os valores de quantidade de «RU incinerados» indicados no período entre 2009-2015 (**Anexo 1**).

Custos totais anuais médios – resultados

As Fig. 5.2 e Fig. 5.3 reflectem os **custos totais** (em €/t) dos sistemas de valorização energética. São apresentadas as parcelas referentes aos:

- (i) C_a , **custos de amortização** do custo de investimento (incluindo financiamento);
- (ii) C_o , **custos operacionais**; referentes aos períodos de operação desde 2009 a 2015.

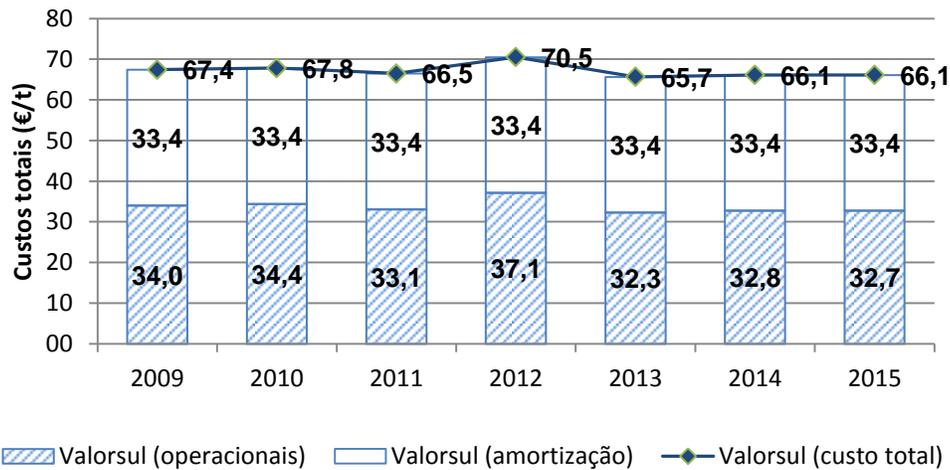


Fig. 5.2: Custos totais do tratamento térmico na unidade de valorização energética da VALORSUL (a preços de 2016)

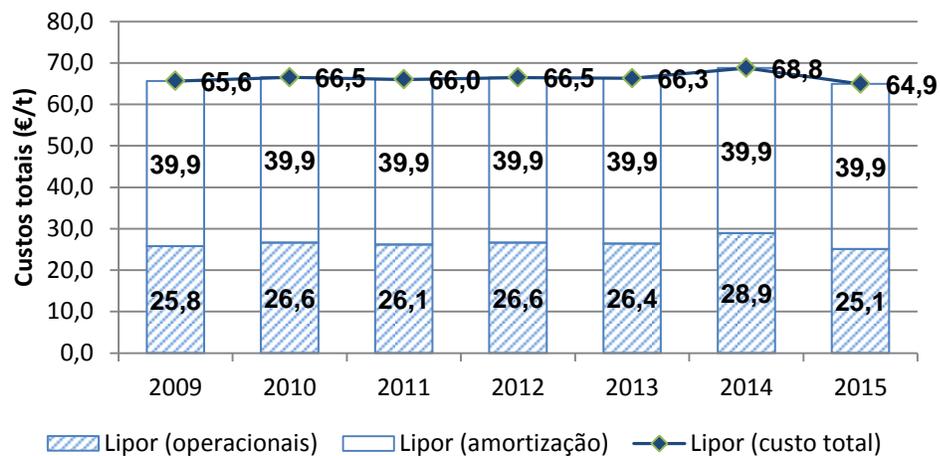


Fig. 5.3: Custos totais do tratamento térmico na unidade de valorização energética da LIPOR (a preços de 2016)

Receitas e Custo efectivo

As Fig. 5.4 e Fig. 5.5 representam as **receitas** e o **custo efectivo** (em €/t) dos sistemas de valorização energética. São apresentadas as parcelas referentes aos:

- (i) R, **receitas** da venda de electricidade; referentes aos períodos de operação desde 2009 a 2015.
- (ii) C_e, **custo efectivo** do tratamento; referentes aos períodos de operação desde 2009 a 2015.

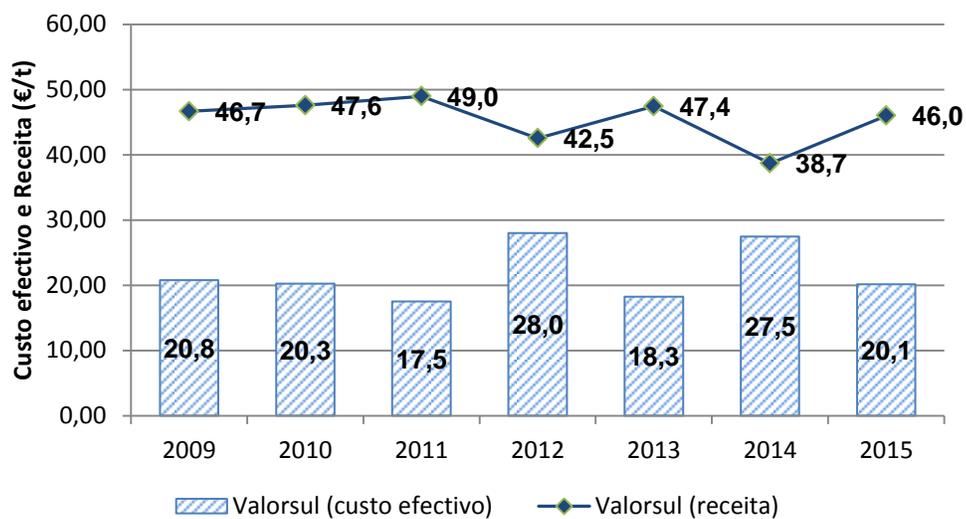


Fig. 5.4: Custo efectivo (inc. receita) do tratamento térmico na unidade de valorização energética da VALORSUL (a preços de 2016)

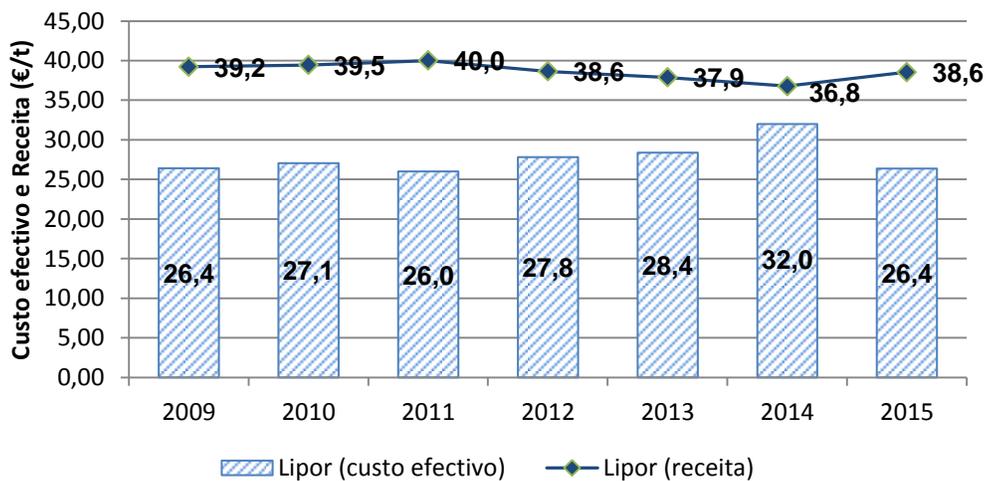


Fig. 5.5: Custo efectivo (inc. receita) do tratamento térmico na unidade de valorização energética da LIPOR (a preços de 2016)

5.5 Custos dos sistemas de dimensão <1 100 t/dia

5.5.1 Caracterização dos sistemas

Identificam-se no **Quadro 5.7** as características gerais das unidades de valorização de Ilha da Madeira, Ilha de São Miguel e Ilha Terceira.

Quadro 5.7: Característica das unidades de incineração existentes em Ilha da Madeira, Ilha de São Miguel e Ilha Terceira

Parâmetros	Ilha da Madeira	Ilha São Miguel	Ilha Terceira	Unidades
Capacidade de projecto	126.000 ¹	100.000	40.000 ²	t/ano
Capacidade eléctrica instalada	7,45	-	3,00	MW
Área total	42.500 ³	-	5.315 ¹	m ²
Entrada em funcionamento	6 Ago. 2002	(em fase de concurso)	29 Jun. 2016 ⁴	-
Nº de linhas em funcionamento	2 ⁵	-	2 ⁶	-

¹ARM (2016); ²DRA (2014); ³Xará et al.; ⁴CMAH (2015); ⁵ISWA (2012); ⁶Vaicaityte (2013).

5.5.1.1 Ilha da Madeira

A Água e Resíduos da Madeira (ARM) é responsável por recolher e tratar os resíduos das regiões municipais aderentes, sendo integrada pela própria região autónoma (98,21% da estrutura accionista) e pelos municípios de Câmara de Lobos, Machico, Ilha de Porto Santo, Ribeira Brava e Santana (ARM, 2015). A incineração de resíduos ocorre na *Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos da Meia Serra* (Santa Cruz, Ilha da Madeira), sendo que esta tem capacidade para incinerar 126.000 toneladas por ano com uma produção eléctrica equivalente a cerca de 473 kWh/ton, dos quais cerca de 75% são disponibilizados na rede eléctrica (ARM, 2016)

O sistema de valorização energética é constituído por duas linhas de produção providas de um forno caldeira onde ocorre a combustão dos resíduos numa grelha móvel da Lurgi® do tipo LENTJES Rostfeuerungen GmbH (ARM, 2016) e a produção de energia dá-se através de uma turbina a vapor do mesmo fornecedor (ISWA, 2012)

5.5.1.2 Ilha de S. Miguel

Além das unidades de incineração actualmente existentes nos arquipélagos, está prevista construção de uma unidade de incineração com valorização energética na ilha de São Miguel (Açores), estando esta ao cargo da Associação de Municípios da Ilha de São Miguel (AMISM). Não foi possível obter da parte da AMISM um valor do custo de investimento da unidade, mas estima-se que esta possa custar entre 90 e

100 milhões de euros. A unidade de valorização energética terá uma capacidade de projecto de 100.000 toneladas por ano e estima-se que permita processar cerca de 88.000 toneladas por ano (DA, 2015).

5.5.1.3 Ilha Terceira

A Central de Valorização Energética (CVE) está inserida na *Central de Tratamento e Valorização de Resíduos da Ilha Terceira* (CTVRIT) da empresa intermunicipal TERAMB. A TERAMB é constituída pelas participações dos municípios de Angra do Heroísmo (60%) e Praia da Vitória (40%) sendo responsável pela gestão dos resíduos dos referidos municípios e ainda da Ilha das Flores.

A CVE tem capacidade para incinerar 40.000 toneladas por ano, sendo que era estimado no ano de 2015 uma quantidade real de resíduos incinerados na ordem dos 36.000 toneladas por ano (DRA, 2014).

A CVE permite recuperar sob a forma de energia eléctrica cerca de 400 kWh/ton, dos quais 63% podem ser exportadas para a rede eléctrica. (DRA, 2014; AVALER, 2015).

O sistema de valorização energética é constituído por um forno caldeira onde ocorre a combustão dos resíduos numa grelha móvel sendo que a produção de energia se dá através de uma turbina a vapor (DRA, 2014).

Relativamente à instalação de valorização energética, a actividade económica principal da central é o *tratamento e eliminação de outros resíduos não perigosos*, sendo que em matéria de eficiência energética é atribuída a classificação R1, nos termos do disposto no Decreto Legislativo regional 28/2011/A, conferindo-lhe assim o estatuto de *Utilização principal na produção de combustíveis comercializáveis no mercado ou, quando tal não for possível, utilização directa ou indirecta como combustível para produção de energia* (DRA, 2014).

5.5.2 Resultados

Custo de investimento

Indicam-se no **Quadro 5.8** e **Fig. 5.6** os valores dos investimentos de cada unidade de valorização, a preços actualizados de 2016 e as respectivas fontes de dados.

Quadro 5.8: Custo de investimentos das unidades de valorização energética existentes em Ilha da Madeira, Ilha São Miguel e Ilha Terceira (a preços de 2016)

Parâmetros	Ilha Terceira	Ilha São Miguel	Ilha da Madeira	Unidades
Custo de investimento¹	29.711.265 ²	90.000.000 ³	64.974.935 ⁴	€

¹Preços actualizados a 2016; ²Comunicação pessoal com TERAMB (**Anexo 7**); ³Valor previsto de acordo com Antena 1 (2012);

⁴CNFC (2010) (“Incineradora da Madeira”).

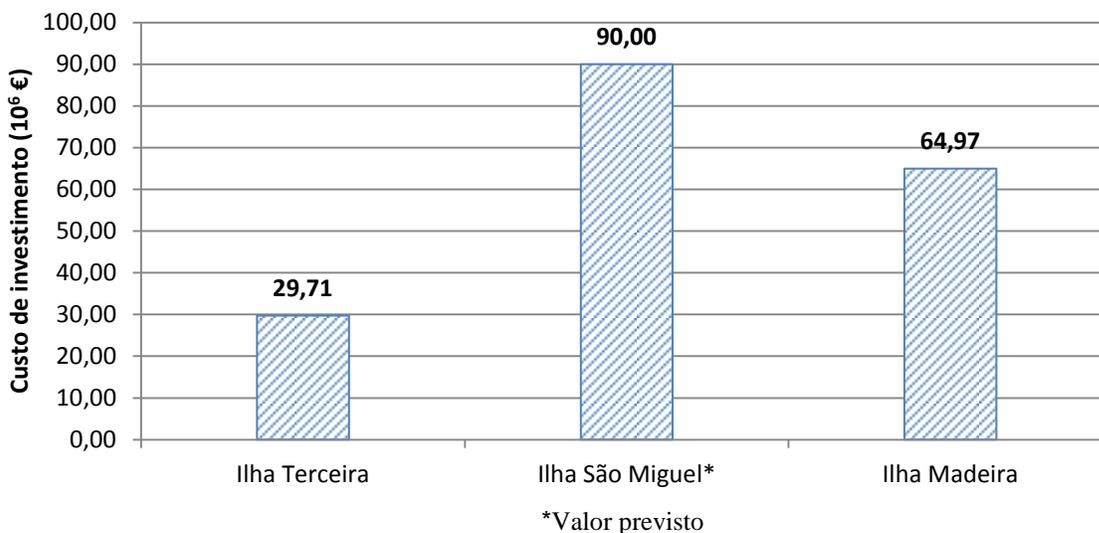


Fig. 5.6: Custo de investimento das unidades de valorização energética da Ilha Terceira, Ilha São Miguel e Ilha da Madeira (a preços de 2016)

O custo de investimentos da unidade de valorização da Ilha de São Miguel corresponde a um valor previsto, podendo este valor vir a sofrer alterações aquando da sua implementação.

Custos de amortização

Considerou-se uma taxa de actualização de 5% e um período de amortização do custo de investimento de 25 anos. Custos foram nivelados pela capacidade operacional, equivalente a 90% da capacidade de projecto.

Custos operacionais

Para a unidade de valorização de Ilha da Madeira, admite-se o custo operacional equivalente à média aritmética dos custos operacionais estimados no período decorrente entre 2009 e 2015 (preços actualizados a 2016).

Para a unidade da Ilha Terceira considerou-se o custo operacional fornecido pela TERAMB na comunicação efectuada (**Anexo 7**).

Para a unidade da Ilha de São Miguel (em fase de concurso) foi estimado um valor anual genérico.

Para o cálculo da parcela variável de custos operacionais teve-se em conta o valor de «electricidade produzida» (**Anexo 1**); à excepção da unidade da Ilha Terceira para a qual o valor é conhecido.

Relativamente à unidade de Ilha da Madeira, uma vez que apenas se obteve os valores de produção eléctrica por tonelada de resíduos (em kWh/t) assumiu-se que o valor de capacidade instalada é dado por:

$$Capacidade\ instalada = \frac{P_{eléctrica} \times \frac{C_{projecto}}{P_{efectivo}}}{1000} \quad (16)$$

Em que (ARM, 2016):

Capacidade instalada – capacidade instalada (MW)

$P_{eléctrica}$ - Produção eléctrica (473 kWh/t)

$C_{projecto}$ - Capacidade de projecto (126.000 t/ano)

$P_{efectivo}$ - Período efectivo de funcionamento (8.000 h/ano)

Pelo que, o valor estimado da capacidade instalada a partir da expressão (16) é 7,45 MW, referente à unidade de Ilha da Madeira.

Assim, tem-se que para o cálculo da parcela fixa de custos operacionais foi tido em conta um valor de capacidade instalada de 7,45 e 7,00 MW, respectivamente, para as unidades de Ilha da Madeira (valor estimado) e Ilha de São Miguel (Lusa, 2014).

A unidade de valorização da Ilha de São Miguel ainda está em fase de concurso, pelo que o valor indicado é um valor expectável, cuja fiabilidade dependerá das condições que se vierem a verificar na implementação da infra-estrutura.

Por forma a nivelar os custos (“*levelized*”) admitiram-se os valores de quantidade de «RU incinerados» indicados no **Anexo 1**.

Custos totais anuais médios (resultados)

As **Fig. 5.7 e Fig. 5.8** reflectem os **custos totais** (em €/t) do sistema de valorização energética de Ilha da Madeira, Ilha São Miguel e Ilha Terceira. São apresentadas as parcelas referentes aos:

- (i) C_a , **custos de amortização** do custo de investimento (incluindo financiamento);
- (ii) C_o , **custos operacionais**.

Os valores referentes aos períodos de operação desde 2009 a 2015 apenas são indicados para a unidade de valorização energética da Ilha da Madeira.

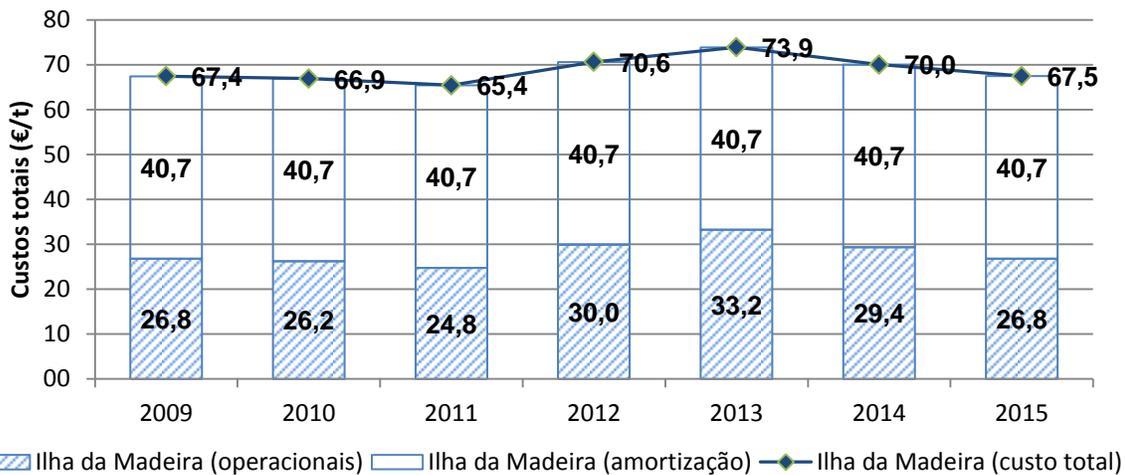


Fig. 5.7: Custos totais do tratamento térmico na unidade de valorização energética de Ilha da Madeira (a preços de 2016)

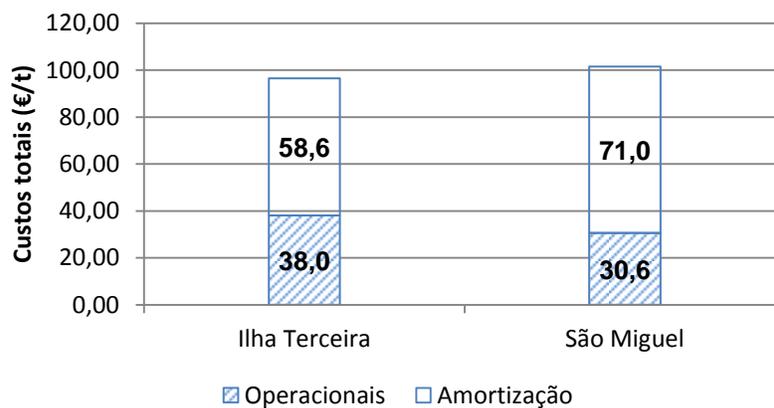


Fig. 5.8: Custos totais do tratamento térmico nas unidades de valorização energética da Ilha Terceira e Ilha São Miguel (a preços de 2016)

Receitas e Custo efectivo

As Fig. 5.9 e Fig. 5.10 representam as **receitas** e o **custo efectivo** (em €/t) dos sistemas de valorização energética. São apresentadas as parcelas referentes aos:

- (iii) R, **receitas** da venda de electricidade;
- (iv) C_e, **custo efectivo** do tratamento.

Os valores referentes aos períodos de operação desde 2009 a 2015 apenas são indicados para a unidade de valorização energética de Ilha da Madeira.

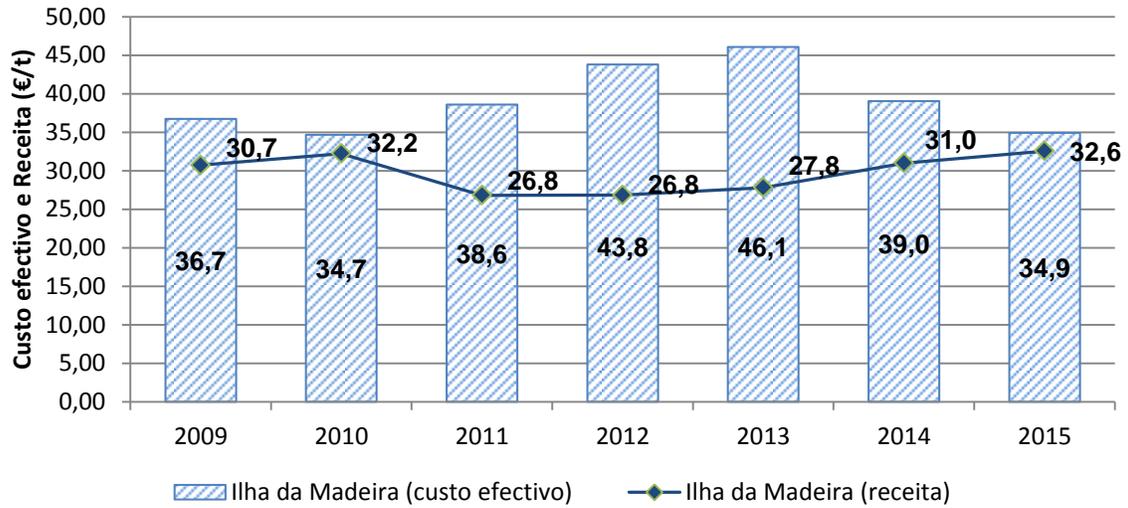


Fig. 5.9: Custo efectivo (inc. receita) do tratamento térmico na unidade de valorização energética de Ilha da Madeira (a preços de 2016)

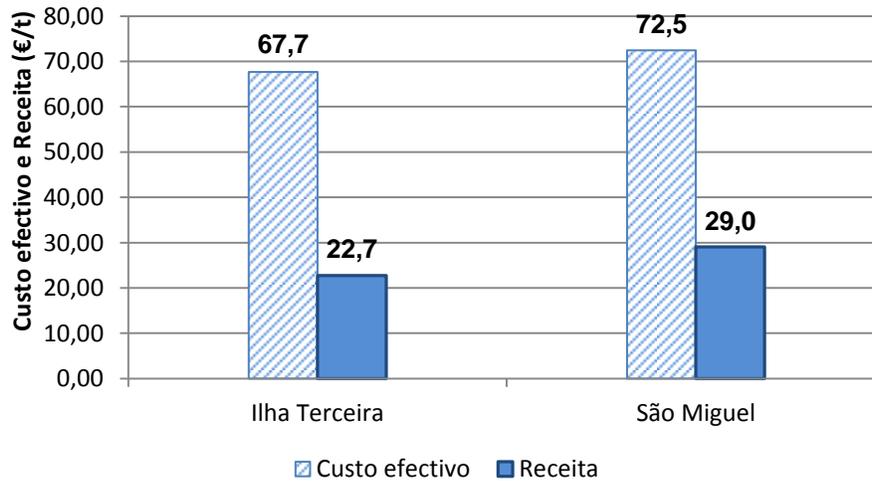


Fig. 5.10: Custo efectivo (inc. receita) do tratamento térmico nas unidades de valorização energética da Ilha Terceira (a preços de 2016)

6 Custos de sistemas de tratamento térmico avançado

6.1 Enquadramento

À data não se verifica a implementação de nenhuma unidade deste tipo em Portugal.

Os dados disponíveis relativos aos tratamentos térmicos avançados são limitados (European IPPC Bureau, 2006). A informação disponível aponta para a implementação de algumas unidades deste tipo em países da Europa, mas muitos dos sistemas estão ainda em desenvolvimento.

Designadamente, o último relatório do ISWA (2012) reporta apenas a existência de 3 unidades de gaseificação e 2 de pirólise, num total de 472 unidades analisadas, maioritariamente de incineração por combustão. Além destas, existem 8 unidades de gaseificação que não estão identificadas neste relatório, da responsabilidade da Energos®, implementadas na Noruega e no Reino Unido. (Leckner, 2014)

O relatório *IEA Bioenergy Task 36 member countries* realizou uma análise de 8 tecnologias específicas em avançado estado de desenvolvimento técnico e comercial: EDDITh® thermolysis process, Energos®, Foster Wheeler®, Finland, Compact-Power®, Naanovo Energy Inc. (NEI)®, Entech Renewable Energy Systems®, WasteGen UK® e TPS Termiska Processer AB®.

De acordo com os dados disponibilizados pelos fornecedores de tecnologias deste tipo, no Reino Unido, o *custo de investimento* pode variar entre 12 - 71 M€ para unidades com capacidade entre 25.000 e 100.000 t/ano (DEFRA, 2013).

No entanto, os *custos operacionais* estimados relativos a tratamentos térmicos avançados variam entre 40 -160 €/ton, sendo que a maioria dos fornecedores aponta para valores na ordem dos 56-88 €/ton (European IPPC Bureau, 2006).

É possível verificar que neste tipo de tratamentos, com recurso à gaseificação e pirólise, se procuram estabelecer condições relativamente ao combustível utilizado que lhe permitem maximizar os ganhos energéticos, uma vez que estas tecnologias são aplicáveis geralmente em pequenas e médias escalas, ou seja, com uma capacidade de processamento inferior a 250.000 t/ano. Se por um lado, a sua eficiência para processar produtos de carvão, para produzir gás natural ou outro tipo de produtos é elevada, quando aplicado ao tratamento de resíduos urbanos a sua eficiência energética, e consequentemente as receitas provenientes da venda de energia, estão à partida condicionadas pelos baixos valores de PCI dos resíduos urbanos (**Quadro 2.1**). Desta forma, o baixo poder calorífico dos resíduos pode não compensar o custo associado ao avanço tecnológico destas tecnologias para tratar resíduos urbanos. Por esta razão é comum serem utilizados como combustível um combinação de diversos resíduos urbanos e CDR, aquando da aplicação de tecnologias de gaseificação e pirólise neste âmbito.

- **Gaseificação - Energos®**

A tecnologia Energos® (**Anexo 8**) consiste numa tecnologia de gaseificação que permite tratar entre 10 e 70 kt/ano de resíduos, inserindo-se por isso na gama das tecnologias ditas de pequena escala. Representa, neste âmbito, a tecnologia de maior implementação na Europa, com 11 unidades (**Quadro 3.1**).

Começa-se por isso por estimar as parcelas de custos associadas a este tratamento.

No **Quadro 6.1** são estimados os custos operacionais de uma unidade modular de pequena escala do tipo Energos® Type 40. É ainda identificado o custo de investimento da unidade segundo o IEA Bioenergy Agreement – Task 36 (Stein, 2004), estando todos os valores monetários actualizados a preços de 2016, tendo por base o índice de preços no consumidor do INE.

Quadro 6.1: Estimativa de custos de uma unidade de gaseificação de tecnologia de Leito fixo: Energos® type 41 (a preços de 2016)

Parâmetros	Type 40	Unidades
Custo da tecnologia ^{1,2}	19,09	€10 ⁶
Capacidade de projecto ¹	40	kt/ano
Capacidade operacional ³	36	kt/ano
Capacidade nominal ¹	13,50	MW
Custos:		
Custos Operacionais ^{1,2}	2,03	M€/ano
Custos Operacionais ^{2,3}	56,34	€/t
Custo de Amortização ^{2,3}	37,65	€/t
Custo Total^{2,3}	- 93,99	€/t

¹ Stein (2004), os valores compreendidos no relatório são referentes a unidades Type 41, equivalente à unidade comercializável, respectivamente Tipo 40; ²Preços actualizados a 2016; conversão de dólares para euros com factor 0,895

³Assumindo um nível de operacionalidade de 90% (1 ano de operação = 365x24x0,9=7884 horas)

Os custos operacionais foram obtidos com base no custo operacional anual (2,03 M€/ano), procedendo-se à sua nivelção pela capacidade operacional:

$$\text{Custo}_{\text{operacional}} = \frac{2.028.091}{36.000} = 56,34€/t$$

O custo de amortização foi obtido com base no custo de investimento (19,57 M€), a partir da expressão (3):

$$\text{Custo}_{\text{amortização}} = \frac{19.087.917}{36.000} \times 0,071 = 37,65 €/t$$

O custo total foi obtido a partir do somatório das parcelas de custos operacionais e custo de amortização:

$$\text{Custo}_{\text{total}} = 56,34 + 37,65 = 93,98 \text{ €/t}$$

Pode notar-se o custo total anual é obtido simplesmente pela soma do custo de amortização e custos operacionais não nivelados, ou seja:

$$\text{Custo}_{\text{total, anual}} = 93,98 \times 36.000 = 2.028.091 + 19.087.917 \times 0,071 = 3.383.333,11 \text{ €/ano}$$

- **Pirólise - Thermostelect®**

A tecnologia Thermostelect® (Anexo 8) consiste numa tecnologia de pirólise que permite tratar entre 50 a 225 kt/ano de resíduos, abrangendo por isso a gama das tecnologias ditas de pequena e média escala. É comum os tratamentos que envolvem processos de pirólise abrangerem capacidades superiores aos processos de gaseificação. Isto deve-se em parte ao facto de, nestes sistemas, ser utilizada para consumo interno uma quantidade de energia superior uma vez que as reacções são promovidas por uma fonte de energia externa, que consome recursos da própria unidade (Chen, 2015).

Analogamente, representam-se no **Quadro 6.2** as parcelas de custos unitários (em €/t) associadas ao tratamento Thermostelect®. Para este caso de estudo foi utilizada uma unidade de referência situada em Karlsruhe (Alemanha) a operar a média capacidade (168,8 kt/ano).

Quadro 6.2: Estimativa de custos de uma unidade de pirólise de tecnologia de Forno rotativo: Thermostelect® (a preços de 2016).

Parâmetros	Thermostelect	Unidades
Custo da tecnologia ^{1,2}	124,11	M€
Capacidade ¹	225,00	kt/ano
Capacidade operacional ¹	168,80	kt/ano
Capacidade nominal _{th} ¹	100,00	MW
Capacidade nominal _{el} ¹	12,70	MW
Custos:		
Custos Operacionais ^{1,2}	9,59	M€/ano
Custos Operacionais ^{2,3}	56,81	€/ton
Custo de Amortização ^{2,3}	52,20	€/ton
Custo Total ^{2,3}	- 109,01	€/ton

¹Hesseling (2002); ²Preços actualizados a 2016; conversão de dólares para euros com factor 0,895; ³Assumindo um nível de operacionalidade de 90% (1 ano de operação = 365x24x0,9=7884 horas)

6.2 Estimativa dos Custos

Com o cálculo do custo das tecnologias da Energoss® e Thermoselect® pretendeu-se analisar a ordem de grandeza dos custos envolvidos com ambas as tecnologias. No entanto, estes dados impossibilitam a análise dos custos efectivo dos respectivos tratamentos tendo em conta o efeito da escala dos sistemas, quer ao nível dos custos, quer do desempenho energético e consequente receita.

A análise que se segue apenas foi determinada para a tecnologia de gaseificação Energoss®, uma vez que as tecnologias de pirólise são caracterizadas por baixos níveis de eficiência energética, podendo mesmo atingir valores negativos. Desta forma, não é expectável que a receita proveniente da venda de energia possa compensar o custo total do tratamento de RU por via da pirólise, que por si só é mais elevado do que a tecnologia de gaseificação Energoss® ou do que as tecnologias de incineração convencionais analisadas anteriormente.

- **Custo operacional e de amortização (custo total)**

Anteriormente determinou-se o custo total de uma unidade de tratamento com tecnologia Energoss®, provida de uma capacidade de projecto de 40 kt/ano (**Quadro 6.1**).

Pretende-se agora estimar, o custo total de uma unidade de tratamento com tecnologia Energoss® para uma capacidade genérica. O domínio de aplicação desta tecnologia situa-se entre 10 e 70 kt/ano (**Quadro 2.10**).

Tomando por referência a unidade modular Type 40, o custo total de referência, $C_{t,1}$, toma o valor de 93,98 €/t equivalente a 3.383.333,33 €/ano. Deve notar-se que este valor corresponde já a totalidade dos custos operacionais e de amortização anuais.

Segundo Lettieri et al (2010), a relação geral entre custo e capacidade, pode ser dada por:

$$\frac{\text{Custo}_1}{\text{Custo}_2} = \left(\frac{\text{Capacidade}_1}{\text{Capacidade}_2} \right)^n \quad (17)$$

Segundo Gerrard (2000) e Peters e Timmerhaus (1991), citados por Lettieri et al (2010), “o expoente que traduz a escala, n , deriva dos registos obtidos para sistemas idênticos e situa-se entre 0,6 e 0,8”.

Assim tem-se:

$$\text{Custo}_2 = \frac{\text{Custo}_1}{\left(\frac{\text{Capacidade}_1}{\text{Capacidade}_2} \right)^n} \quad (18)$$

Adoptando a expressão (18), admite-se:

$$\text{Custo}_1 = C_{t,1} - \text{custo de referência (€)}$$

$$\text{Custo}_2 = C_{t,2} - \text{custo estimado (€)}$$

Capacidade₁ - capacidade de projecto de referência (t/ano)

Capacidade₂ – capacidade de projecto genérica (t/ano)

n – factor de escala

Desta forma, admite-se que o custo total de unidade de gaseificação do tipo Energos® genérica, $C_{t,2}$ (expresso em 10^3 €/ano) é obtido a partir do custo total estimado, $C_{t,1}$, anteriormente, em função de uma capacidade de projecto genérica, x :

$$C_{t,2} = \frac{3.383.333,33}{\left(\frac{40}{x}\right)^n} \quad 10 < x < 70 \text{ (kt/ano)} \quad (19)$$

Com n entre 0,6 e 0,8 ($C_{t,2} > 0$).

Uma vez que se pretende o custo unitário (em €/t), admite-se uma disponibilidade de 90%, ou seja, os custos foram nivelados por uma capacidade operacional equivalente a 90% da capacidade de projecto, x .

A expressão (19) inclui o custo total do tratamento (em €). As parcelas de custos (amortização, operacionais) que compõem os custos totais foram obtidas separadamente da mesma forma e as respectivas expressões encontram-se indicadas no **sub-capítulo 6.4**.

6.3 Estimativa da Receita

6.3.1 Parâmetros técnico-económicos

Deve notar-se que o custo efectivo do tratamento apenas pode ser aferido após ser deduzido o valor da receita ao valor do custo total do tratamento. À semelhança das unidades de valorização energética da Ilha Terceira e Ilha de São Miguel, a receita foi estimada com base no método proposto em Lettieri et al. (2010). Pelo que os parâmetros técnico-económicos sistematizados no **Quadro 5.3** e as expressões (9), (10), (11), (12), (13) e (14) são relevantes para estimar a receita da unidade Energos®.

6.3.2 Pressupostos técnico-financeiros

Admitiram-se os seguintes pressupostos técnico-financeiros (**Quadro 6.3**) de forma a reproduzir o desempenho energético de uma unidade de gaseificação Energos® e as receitas provenientes da venda de electricidade, no domínio de capacidades da tecnologia. O preço de venda (P_{venda}) corresponde ao preço de referência para as unidades de incineração em Portugal continental. Os restantes valores indicados, bem como outras supunções feitas serão devidamente referenciadas e/ou justificadas.

Quadro 6.3: Pressupostos técnico-financeiros para determinação da «electricidade vendida»

Parâmetros	Símbolo	Valor
Valor calorífico bruto	PCI	8,0 MJ/Kg
Eficiência térmica	$\eta_{th,gasificador}$	70 %
Electricidade bruta auxiliar	$E_{auxiliar}$	0% $E_{electricidade,bruta}$
Preço de venda	P_{venda}	94,6 €/MWh

6.3.3 Desempenho energético

Para estimar a $E_{electricidade,líquida}$, adoptou-se o método proposto por Lettieri et al. (2010). Desta forma, têm-se que a capacidade térmica dos resíduos (E_{th}) depende directamente da taxa de alimentação da unidade de tratamento (r) e do valor calorífico dos resíduos (PCI):

$$E_{th, input} = r \times PCI \quad (20)$$

Deve fazer-se notar que a taxa de alimentação (r) (em t/h) corresponde simplesmente à capacidade operacional, assumindo, num ano, o número de horas correspondente ao Período anual de operação. Admitiu-se uma composição química dos resíduos tal que resulta no valor de PCI idêntico à da instalação da Ilha Terceira, ou seja, 8,0 MJ/kg (**Quadro 5.4**).

Assumindo uma eficiência térmica do gaseificador ($\eta_{th,gaseificador}$) de 70% (Lettieri et al., 2010), obtém-se a capacidade térmica do gás sintético ($E_{th, combustão}$):

$$E_{th, combustão} = \eta_{th,gaseificador} \times E_{th, input} \quad (21)$$

A eficiência bruta de produção eléctrica ($\eta_{turbina a vapor}$) depende do tipo de dispositivo de transformação energética que processa o gás sintético. No **Quadro 4.7** sistematizaram-se os principais dispositivos de aquisição de energia típicos de uma unidade de gaseificação e/ou pirólise, designadamente, para produção de electricidade: “a. turbina a vapor; b. turbina ou motor a gás”. Segundo os fornecedores a unidade de gaseificação Energos® é provida de um sistema de HRGS (“*Heat Recovery Steam generator*”) ou simplesmente caldeira de recuperação com turbina a vapor, ou seja, o sistema permite recuperar energia sob a forma de electricidade e calor.

Note-se ainda que segundo Arena (2012) a tecnologia Energos® é provida de uma caldeira de recuperação com produção de electricidade a partir de um ciclo de turbina a vapor, ou seja, o ciclo de Rankine (**Quadro 4.5**). Pode notar-se, pela análise feita aos sistemas de produção de energia e controlo de emissões no **sub-capítulo 4.2**, que a produção de vapor nestas condições (turbina a vapor) tem uma eficiência idêntica à dos incineradores convencionais. Sendo que o calor gerado subsequentemente é aproveitado (como se verá a baixo) mas não influi na eficiência eléctrica da unidade.

Feitas estas considerações, adopta-se a curva expressa pela expressão (13) que traduz a eficiência bruta de produção eléctrica ($\eta_{\text{turbina a vapor}}$) para uma turbina a vapor, em função da capacidade térmica do gás de sintético (E_{th}) que por sua vez havia sido estimada, pela expressão (21), com base no poder calorífico dos resíduos.

Nestas condições, é possível calcular a electricidade bruta gerada ($E_{\text{electricidade,bruta}}$) a partir da seguinte expressão:

$$E_{\text{electricidade,bruta}} = \eta_{\text{turbina a vapor}} \times E_{\text{th}} \quad (22)$$

A energia bruta auxiliar (E_{auxiliar}) foi ajustada tendo por referência os valores do relatório ISWA (2012), referentes à tecnologia Energos® implementada em Sandness (Noruega). Desta forma, verificou-se que a unidade apenas utiliza para consumo interno a componente de energia sob a forma de calor, sendo vendida a totalidade da electricidade bruta. Como se pretende analisar a unidade em termos de eficiência eléctrica (venda de electricidade), temos:

$$E_{\text{auxiliar,eléctrica}} = 0 \quad (23)$$

Obtém-se a electricidade líquida gerada ($E_{\text{electricidade,líquida}}$) a partir da expressão:

$$E_{\text{electricidade,líquida}} = E_{\text{electricidade,bruta}} - E_{\text{auxiliar}} \quad (24)$$

Determinaram-se, para os pressupostos técnico-financeiros identificados no **Quadro 6.3**, as curvas que traduzem a capacidade térmica dos resíduos ($E_{\text{th,input}}$) e a capacidade térmica do gás (E_{th}) resultante da oxidação dos resíduos, bem com a electricidade líquida ($E_{\text{electricidade,líquida}}$) gerada a partir deste. As curvas geradas traduzem o resultado das expressões (20), (21) e (24) em função da capacidade de projecto, nas condições enunciadas, traduzindo assim o efeito de escala pretendido.

Desta forma, a electricidade líquida gerada (em MW) ($E_{\text{electricidade,líquida}}$) é dada pela expressão (25), em função da capacidade de projecto, x :

$$E_{\text{electricidade,líquida}} = 0,0117 \ x^{1.3084} \quad 10 < x < 70 \ (10^3 \text{ t/ano}) \quad (25)$$

Em que:

$E_{\text{electricidade,líquida}}$ - electricidade líquida gerada ou «electricidade vendida» (MW_e)

X – capacidade de projecto (10^3 t/ano)

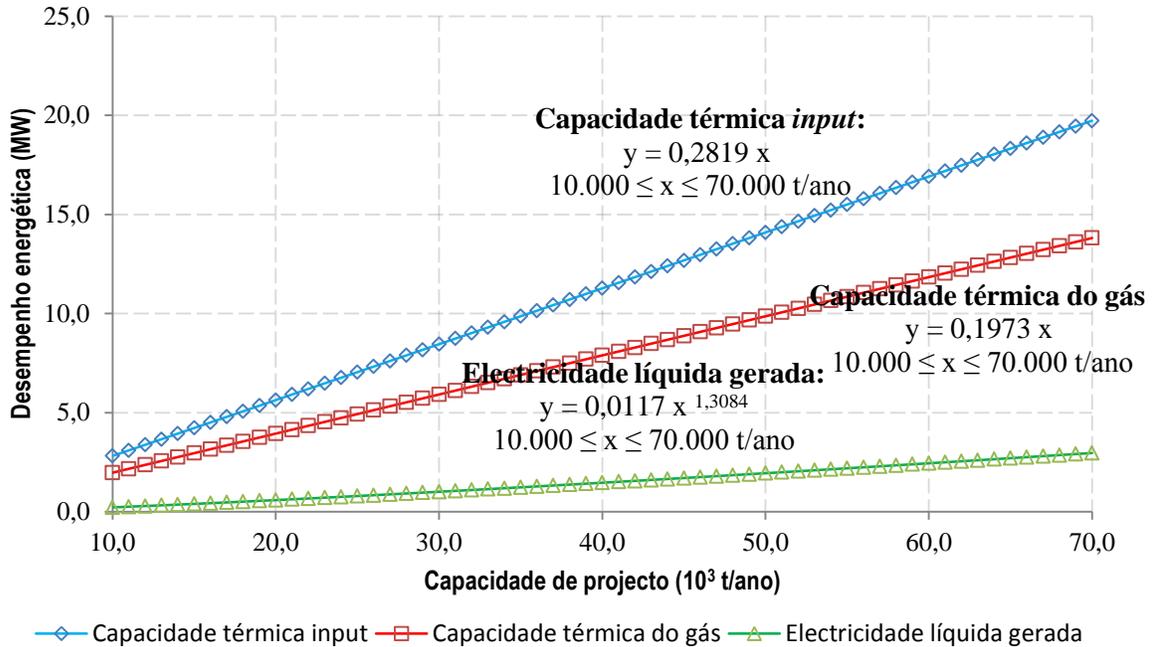


Fig. 6.1: Simulação do desempenho energético de uma unidade de tratamento Energos® pelo método proposto em Lettieri et al. (2010) de acordo com os pressupostos técnico-financeiros do Quadro 6.3

A eficiência da electricidade líquida gerada tem em conta a parcela da electricidade gerada que é utilizada para consumo interno do sistema e traduz o rácio entre a electricidade exportada para a rede eléctrica e a energia contida nos resíduos (Gohlke, 2009). Assim, a eficiência global do sistema, η_{global} , em função da capacidade operacional é dada por:

$$\eta_{\text{global}} = \frac{E_{\text{electricidade, líquida}}}{E_{\text{th, input}}} = \frac{0,0117 x^{1,3084}}{0,2819 x} = 0,0415041 x^{0,3084} \quad 10 < x < 70 \text{ kt/ano} \quad (26)$$

Em que:

η_{global} - eficiência global do sistema (%)

x - capacidade de projecto (10^3 t/ano)

Com $E_{\text{electricidade, líquida}}$ e $E_{\text{th, input}}$ dados, respectivamente pelas expressões (25) e (20).

Logo,

$$8,4\% < \eta_{\text{global}} < 15,4\%$$

Segundo Gohlke (2009) “a eficiência eléctrica líquida das unidades de gaseificação implementadas na Europa (e no Japão) corresponde a cerca de $\eta_{\text{eléctrica}} = 10\%$ ”. Pelo que se conclui que a gama de valores estimados, entre 8 a 15% está em linha com o que seria expectável.

6.4 Resultados

Os resultados obtidos traduzem o resultado da aplicação de uma tecnologia de gaseificação (simulação de uma unidade Energos®) no âmbito dos sistemas ditos de pequena escala, i.e. < 100 kt/ano, por forma a analisar o efeito de economia de escala das soluções de valorização energética por gaseificação. Para a tecnologia de gaseificação em revisão foram analisados dois factores de escala de custos (n=0,6 e 0,8). O factor n=0,6 representa o factor com maior sensibilidade face à escala do sistema.

As parcelas de custos e receita abaixo indicadas, bem como as respectivas expressões, foram obtidas a partir dos valores do **Quadro 6.1** com base no efeito de economia de escala traduzido pela expressão (18), no domínio de capacidades da tecnologia Energos® (10 a 70 kt/ano).

Os resultados foram estimados no domínio de capacidades de projecto entre 10.000 e 70.000 t/ano, a intervalos de 1000 t/ano. As expressões (27), (28), (29), (30), (31), (32) e (33) resultam de uma aproximação dada pela aplicação de uma função potencial a partir das funcionalidades do Excel®.

- **Custo de amortização**

No **Anexo 9**, estão representados o custo de amortização anual do investimento de ambas as tecnologias. Foram aplicadas as mesmas condições de crédito (Quadro 5.2) que anteriormente haviam sido utilizadas para estimar os custos das unidades de valorização energética em Portugal. Os dados mostram que a tecnologia de gaseificação comporta custos de amortização anual do investimento entre 65.5 e 30.1 €/t.

Desta forma, o *custo de amortização* (C_a) obtido a partir do **Quadro 5.2** e da expressão (6), pode ser dado numa primeira aproximação (em €/t), respectivamente, pelas seguintes expressões, em função da capacidade de projecto, x (a preços de 2016):

$$C_a = 164,64 x^{-0,4} \quad 10 < x < 70 \text{ (} 10^3 \text{ t/ano)} \quad (27)$$

ou

$$C_a = 78,727 x^{-0,2} \quad 10 < x < 70 \text{ (} 10^3 \text{ t/ano)} \quad (28)$$

Respectivamente, para um factor de escala, n , igual a 0,6 e 0,8.

- **Custos operacionais**

No **Anexo 9** estão representados os custos operacionais (C_o) da tecnologia de gaseificação. As tecnologias de gaseificação (e.g. a solução estudada – Energos®) comportam geralmente maiores custos operacionais, neste caso entre 98,1 e 45,0 €/t).

Deve notar-se que a totalidade dos custos associada a cada operação de tratamento corresponde à soma destas duas componentes ($\sum C_i = C_t = C_a + C_o$), expresso pela expressão (4).

Desta forma, os *custos operacionais* (C_o) obtidos a partir do **Quadro 6.1** e da expressão (18), podem ser dados numa primeira aproximação (em €/t), respectivamente, pelas seguintes funções, em função da capacidade de projecto, x (a preços de 2016):

$$C_o = 246,38 x^{-0.4} \quad 10 < x < 70 \text{ (10}^3\text{t/ano)} \quad (29)$$

ou

$$C_o = 117,81 x^{-0.2} \quad 10 < x < 70 \text{ (10}^3\text{t/ano)} \quad (30)$$

Respectivamente, para um factor de escala, n , igual a 0,6 e 0,8.

- **Custo efectivo**

O custo efectivo (C_e) de cada tratamento que se pretende analisar definido nos termos da expressão (8), tem em conta o desempenho energético das unidades, aqui traduzida pela receita proveniente da venda de electricidade (c / preço de venda igual a 94,6 €/MWh). Por essa razão, o valor da receita calculado resulta da simulação de uma unidade Energos® feita anteriormente. Representam-se os resultados obtidos no **Anexo 9**. Deve notar-se que é visível o efeito de economia de escala do desempenho obtido para a simulação de receitas da unidade Energos®, com um encaixe médio entre 16,4 e 31,6 €/t. Pelo que, se aos custos totais, C_t , forem deduzidas as receitas (R) o custo efectivo (C_e) fica entre 146,8 e 43,51 €/t.

A receita (R) foi obtida a partir da expressão (7) tendo em conta:

- A electricidade líquida gerada ($E_{\text{electricidade, líquida}}$) dada pela expressão (25);
- O preço de venda (P_v) de 94,6 €/MWh.

Assim, a receita (R) é dada (em €/t), pela seguinte expressão, em função da capacidade de projecto, x (a preços de 2016):

$$R = 8,6921 x^{-0,3084} \quad 10 < x < 70 \text{ (10}^3\text{t/ano)} \quad (31)$$

Desta forma, o custo efectivo (C_{efectivo}) obtido pode ser dado (em €/t) de forma aproximada, respectivamente, pelas seguintes funções, em função da capacidade de projecto, x (a preços de 2016):

$$C_e = 676,57 x^{-0,635} \quad 10 < x < 70 \text{ (10}^3\text{t/ano)} \quad (32)$$

ou

$$C_e = 261,87 x^{-0,374} \quad 10 < x < 70 \text{ (10}^3\text{t/ano)} \quad (33)$$

Respectivamente, para um factor de escala, n , igual a 0,6 e 0,8.

7 Análise comparativa de tecnologias WtE

7.1 Enquadramento

Pretende-se comparar os custos e receitas obtidos para as unidades de valorização energética analisadas nos **capítulos 6 e 7**, admitindo os pressupostos de cálculo considerados.

No âmbito de gestão dos resíduos urbanos o factor económico é determinante na escolha das soluções de tratamento que compõem o conjunto de operações inerentes aos sistemas de gestão.

Embora não se possa dissociar a operação de tratamento das restantes operações associadas (e.g. transporte) a compreensão das componentes de custos do tratamento é essencial na fase preliminar de planeamento.

Contudo, os custos aferidos traduzem indirectamente o tipo de solução tecnológica inerente. Por exemplo: embora o aterro sanitário seja a solução mais económica, está longe de ser a solução preferível, pelo que está longe de ser a solução preferível. Assim, embora os sistemas analisados possam consistir em soluções relativamente onerosas, estas traduzem já o carácter valorativo dos resíduos, devido ao aproveitamento de energia que daí decorre e não menos importante, por traduzirem uma operação de desvio de aterro.

No âmbito das soluções estudadas, por agora, é importante estabelecer a relação entre os custos e a dimensão dos sistemas, tendo por base que é expectável que a dimensão destes traduza o efeito de economia de escala. Desta forma, pretendeu-se analisar as componentes de custos e receitas numa base nivelada (*“levelized”*), pelo que os custos associado a um determinado período de operação, (normalmente considera-se uma base anual) podem ser expressos em €/t.

Admite-se que se verifica um efeito de economia de escala sempre que a relação entre os custos expressos em valor absoluto (em €) e a dimensão dos sistemas (em t/ano) seja dada por uma função potencial cujo expoente da variável independente (x) seja inferior à unidade (Tsilemou, 2006), ou seja:

$$y = \alpha x^\beta \tag{34}$$

Em que:

α e β são constantes e $\beta < 1$.

X – capacidade dos sistemas

Y – custo do sistema

7.2 Custos de investimento

Os custos de investimento das unidades de valorização energética em Portugal foram estimados para 5 unidades com diferentes capacidades de projecto. Representa-se na **Fig. 7.1** os referidos custos obtidos, em função da escala das unidades. Note-se que todas as unidades implementadas ou previstas em Portugal consistem em sistemas de incineração convencional.

Por outro lado, pretende-se analisar o custo de investimento das unidades de incineração no mercado Europeu de tecnologias de valorização energética, no qual Portugal se insere. Para isso representa-se, igualmente na **Fig. 7.1**, o custo de investimento estimado por Tsilemou (2006) para um conjunto de 32 unidades de incineração providas do sistema de grelha (idêntico ao das unidades analisadas em Portugal) num domínio de capacidades que abrange a capacidade dos sistemas portugueses.

No entanto, deve notar-se que apenas se representa a curva de regressão obtida (por Tsilemou, 2006), estando os valores do custo de investimento das 32 unidades de incineração indicado no **Anexo 6**. Nesta amostra não se encontra nenhuma das unidades de incineração existentes em Portugal. A curva de Tsilemou (2006) que traduz o custo de investimento foi actualizada a preços de 2016, segundo o índice de preços no consumidor de acordo com o INE, aplicando-se um factor de 1.22 (entre 2003 e 2016).

Analogamente, representou-se a curva de regressão obtida (função potencial) que traduz o custo de investimento (actualizado a preços de 2016) das 5 unidades de incineração portuguesas analisadas.

Os resultados estão sistematizados no **Quadro 7.1**.

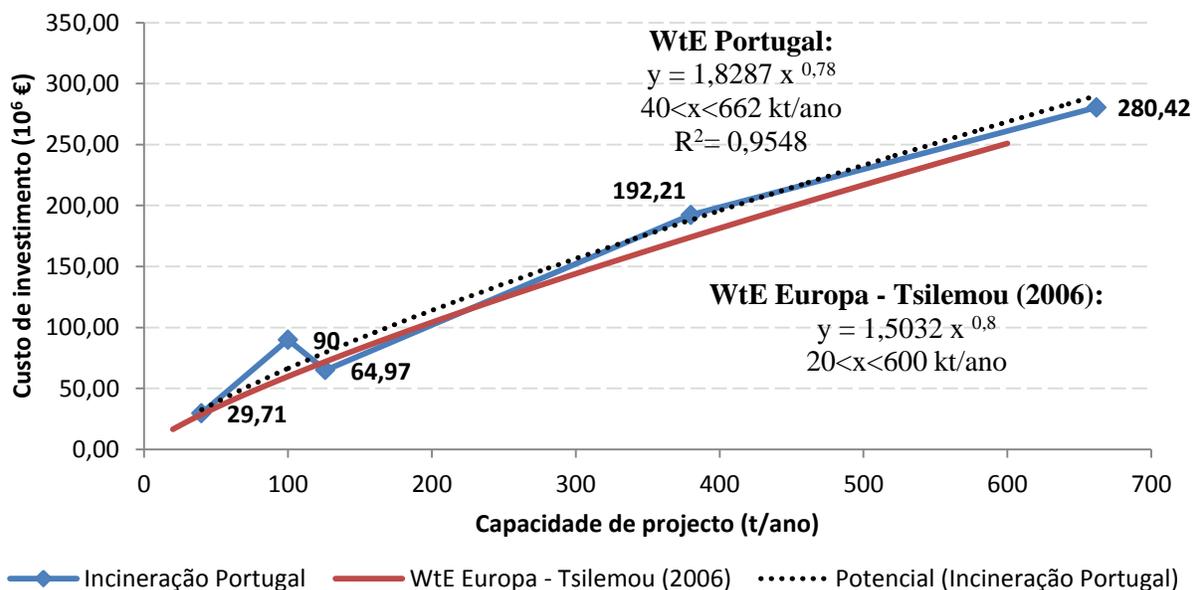
Em termos comparativos o custo de investimento das unidades WtE de Portugal está em linha com o mercado europeu de tecnologias de incineração implementadas no resto da Europa. Embora não se pretenda aprofundar em detalhe o estudo efectuado por Tsilemou (2006) a variação dos resultados obtidos face à ordem de grandeza dos valores em causa pode ser desprezada.

Ambas as expressões sistematizadas no **Quadro 7.1** traduzem bons índices de determinação (superiores a 89%), sendo que estatisticamente as curvas obtidas validam os resultados em boa medida, traduzindo assim um modelo de custos que se conclui ser viável neste âmbito, traduzindo assim o efeito de economia de escala que era expectável (com factor de escala dado por $n=0,8$).

Por outro lado, deve notar-se que a actualização de custos na mesma base anual traduz a evolução de custos dada pela inflação, mas não necessariamente o estado de evolução tecnológica das tecnologias existentes, i.e. o índice que traduz a evolução dos custos não coincide necessariamente o «índice de evolução tecnológica». Uma vez que não se dispõe de informação suficiente para aferir este critério, optou-se por não analisar a relação entre estes dois factores.

Quadro 7.1: Funções de custos de investimento aproximadas de unidades WtE em Portugal e na Europa (a preços de 2016)

Parâmetros	Instalações em Portugal	Instalações na Europa	Unidades
Amostra	5 unidades	32 unidades	-
Capacidade de projecto (x)	40 - 662	20 - 600	kt/ano
Custo de investimento (y)	$1,83 x^{0,8}$	$1,50 x^{0,8}$	M€
Coefficiente de determinação (R ²)	0,955	0,890	-

**Fig. 7.1:** Custos de investimento das unidades WtE em Portugal e na Europa.

Ainda em relação a estes critérios, a nivelção do estado de evolução tecnológica das unidades WtE tem sido alvo de debate por parte dos órgãos da União Europeia. Assim, foi aprovado recentemente o factor de correcção climática de R1 a nível europeu (AVALER, 2015b) beneficiando as unidades implementadas antes de 1/09/2015 em 1,25, ou seja, um factor correctivo de 25% no factor de eficiência energética R1. Este factor é menos favorável (1,12) para as unidades implementadas após esta data. Ainda de acordo com a AVALER (2015b), “estão agora criadas todas as condições para que a nível nacional se proceda à criação de regulamentação que permita a classificação das unidades de valorização de resíduos como R1 ou como D10.”

Por outro lado, a tradução dos custos de investimento nos custos anuais dos sistemas, sob a forma de custo de amortização, pode ser variável e depende fortemente das condições de aplicação em cada país e da capacidade de financiamento das entidades gestoras de resíduos.

Relativamente ao custo de investimento da unidade de gaseificação Energos®, analisada num espectro entre 10 e 70 kt/ano, verifica-se que a unidade de incineração convencional da Ilha Terceira (40 kt/ano) é a única entre as instalações em Portugal que cuja capacidade de projecto pode ser analisada nesse domínio.

Assim, comparando o custo de investimento da unidade de gaseificação Energos® Type 40 para uma capacidade de 40.000 t/ano, verifica-se que a instalação de gaseificação comporta um custo de investimento inferior – 19,09 M€ face à instalação da Ilha Terceira (29,71 M€). De facto, este resultado era expectável uma vez que, de modo geral, as instalações modulares mais compactas são constituídas por componentes pré-fabricados que têm associado um método de produção mais barato (Grillo 2013). Como se viu, acresce a este facto que os sistemas de limpeza de gases são de dimensões mais reduzidas (por processarem menos quantidade de volume de gás) (Stein, 2004)

7.3 Custos totais do tratamento

Como se pode observar pela expressão (4), os custos totais incluem os custos de amortização e os custos operacionais, não representando a receita proveniente da venda de electricidade.

Os custos de amortização traduzem simplesmente a aplicação das condições de financiamento ao custo de investimento das unidades WtE de acordo com o enunciado no **Quadro 5.2**.

Tendo em conta as parcelas dos custos totais do tratamento das unidades de incineração convencional existentes em Portugal (apresentadas no **capítulo 5**) representa-se na **Fig. 7.2** os respectivos custos nivelados pelo valor de capacidade operacional.

Como se viu, para determinadas unidades foram estimados os custos totais no período decorrente entre 2009 e 2015, enquanto para as unidades mais recentes (implementadas há menos de um ano ou não implementadas) foi estimado um valor anual genérico. No caso das primeiras unidades referidas, o valor identificado na **Fig. 7.2** corresponde ao valor médio do período estimado (**Anexo 4**).

Verifica-se que os custos totais quando nivelados pela capacidade operacional das unidades situam-se entre os 101,51 €/t (Ilha de São Miguel) e 66,37 €/t (LIPOR). No entanto, caso se exclua as unidades de pequena escala (i.e. <100 kt/ano) os custos totais são praticamente constantes, entre os 66 €/t e os 69 €/t. De facto, a grande variação ocorre para os sistemas de São Miguel e Ilha Terceira cujo efeito de economia de escala é bastante acentuado. Deve notar-se que o custo estimado relativamente à Ilha de São Miguel corresponde a um valor meramente indicativo, uma vez, que a construção da instalação está ainda em fase de concurso, não existindo bibliografia suficiente que permita obter um valor realístico.

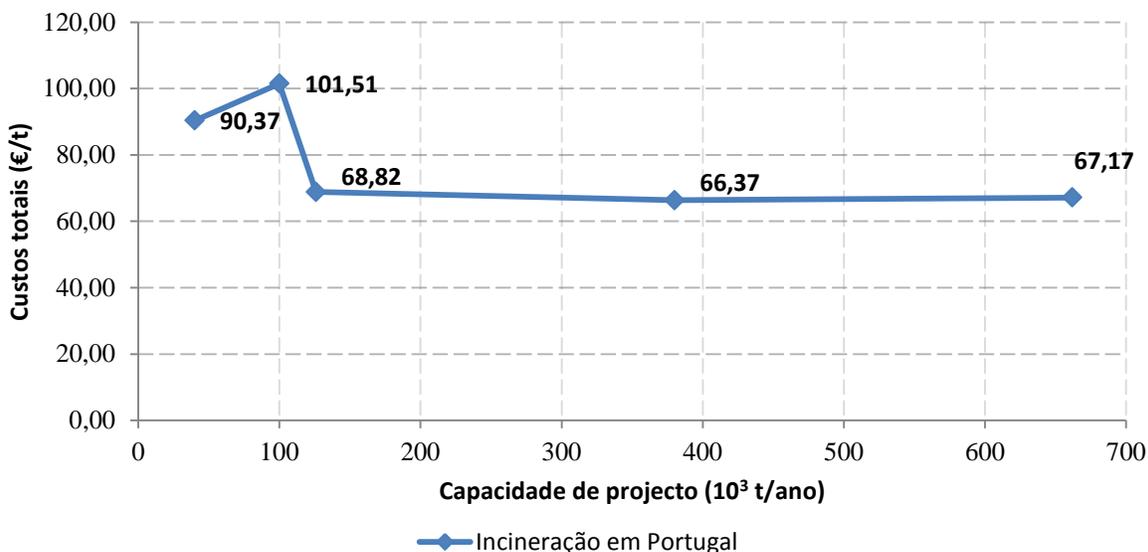


Fig. 7.2: Custos totais do tratamento térmico nas unidades WtE em Portugal

Por outro lado, a maior componente dos custos da gaseificação diz respeito aos custos operacionais (Fig. 6.3), como se viu.

Deve notar-se que a tecnologia de gaseificação Energos® apenas é válida no domínio de capacidades entre 10 e 70 kt/ano, pelo que apenas é frutífero comparar os custos associados no âmbito das soluções de escala mais reduzida (inferiores a 150 kt/ano). Representa-se na Fig. 7.3 o custo total do tratamento das 3 unidades de incineração convencional existentes em Portugal analisadas no sub-capítulo 5.5 (Ilha da Madeira, Ilha de São Miguel e Ilha Terceira) e por outro lado, o custo total da aplicação de uma tecnologia Energos®, no domínio de capacidades válido para a respectiva tecnologia sub-capítulo 6.1.

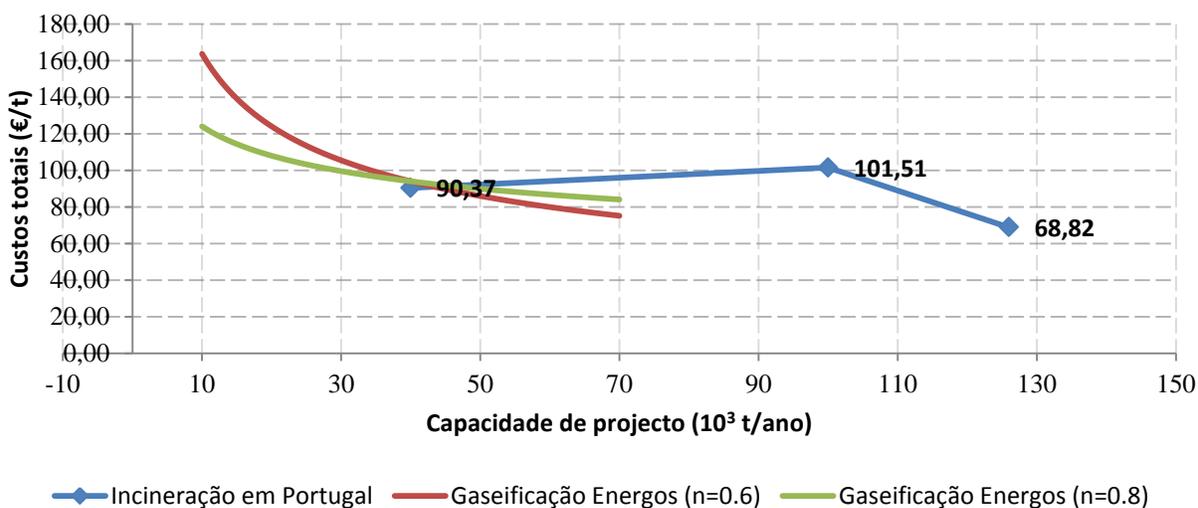


Fig. 7.3: Comparação dos custos do tratamento térmico nas unidades WtE em Portugal e Energos® com capacidade inferior a 150 kt/ano

As curvas de custos da tecnologia Energos® representam a expressão (19) que traduz os custos totais do sistema de gaseificação, respectivamente, para um factor de escala de 0,6 e 0,8, domínio de capacidade válido entre 10 e 70 kt/ano.

A única unidade de incineração existente em Portugal compreendida neste domínio de capacidades é a unidade de incineração implementada na Ilha Terceira (40 kt/ano), para a qual foi estimado um custo total de 90,37 €/t. Assim verifica-se que tendo em conta apenas as instalações de incineração convencional existentes em Portugal, o tratamento térmico da unidade referida representa um custo total muito superior às unidades de incineração convencionais de escalas maiores (na ordem dos 67 €/t). Porém, o custo total da incineração convencional da unidade estudada é ligeiramente inferior ao tratamento térmico por via da gaseificação numa unidade Energos® para uma capacidade de 40 kt/ano.

Por forma a comparar os custos totais, aplicou-se a expressão (19) a uma capacidade de projecto equivalente à da instalação da Ilha Terceira. Nestas condições verifica-se que a gaseificação comporta um custo total superior em cerca de 4,0%.

Sistematiza-se no **Quadro 7.2** o cálculo efectuado.

Quadro 7.2: Comparação dos custos do tratamento térmico na unidade WtE da Ilha Terceira e Energos® com capacidade de 40 kt/ano (a preços de 2016)

Parâmetros	Ilha Terceira (Incineração convencional)	Energos® (Gaseificação)	Unidades
Capacidade de projecto (x)	40	40	kt/ano
Custo total (y)	90,37	93,98	€/t
Relação de custos	93,98/90,20= 1,040		-

Note-se que para uma capacidade de projecto de 40.000 t/ano o valor de custo total da unidade de gaseificação é igual para $n=0,6$ e $n=0,8$, por corresponder à capacidade de projecto igual à unidade de referência utilizada (Type 40). Assim é indiferente (para este efeito) a aplicação do factor de escala.

7.4 Desempenho energético

Tendo-se analisado os custos totais do tratamento térmico, quer por via da incineração convencional quer por via da gaseificação, pretende-se agora analisar o desempenho energético das unidades estudadas por forma a aferir o efeito que o aproveitamento de energia vendida tem na redução dos custos totais.

Representa-se na **Fig. 7.4** os quantitativos anuais de «electricidade vendida» (em MWh) de cada uma das unidades, em função da capacidade de projecto das instalações existentes em Portugal (**Anexo 2**).

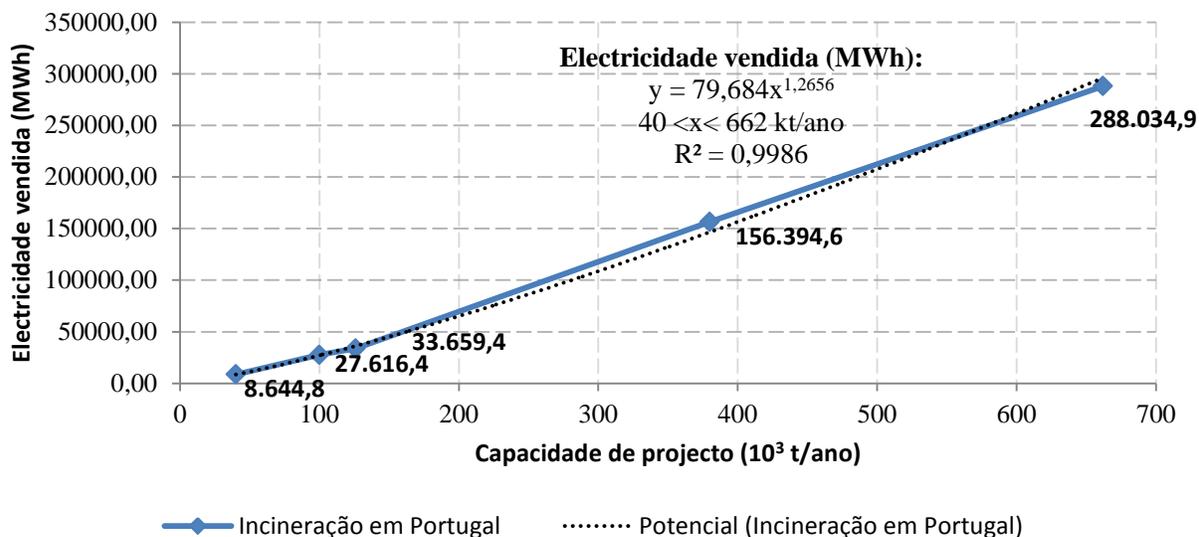


Fig. 7.4: Valores de electricidade vendida por parte das unidades WtE em Portugal

Analisando os quantitativos de «electricidade vendida» das instalações em função das suas capacidades de projecto verifica-se que a energia vendida é traduzida por uma função potencial com um elevado coeficiente de determinação (R^2), dada aproximadamente por:

$$y = 79,68 x^{1,2656} \quad (35)$$

Em que:

y - «electricidade vendida» (MWh)

x – capacidade de projecto (10³ t/ano)

Pretende-se agora, especificar para uma gama de capacidade mais reduzidas (<150 kt/ano) a comparação entre os valores de «electricidade vendida» das unidades de incineração de Ilha da Madeira, São Miguel e Ilha Terceira, bem como da unidade de gaseificação analisada (Energos®).

A representação da «electricidade vendida» da unidade Energos® apresentada corresponde ao valor de electricidade líquida gerada ($E_{\text{electricidade, líquida}}$) dada pela expressão (25), no respectivo domínio de capacidades.

Nestas condições verifica-se que a unidade de gaseificação permite gerar maiores quantitativos de «electricidade vendida». Note-se no entanto, que este sistema corresponde a um sistema de co-geração permitindo alocar toda a quantidade de electricidade produzida para venda, apenas sendo utilizado para consumo interno parte da energia gerada sob a forma de calor na fase subsequente à geração de electricidade. Por outro lado, nas unidades de tratamento da Ilha Terceira e São Miguel apenas é produzida energia sob a forma de electricidade, sendo utilizado para consumo interno parte da energia gerada durante o processo de aquisição de energia, reduzindo assim a eficiência do processo.

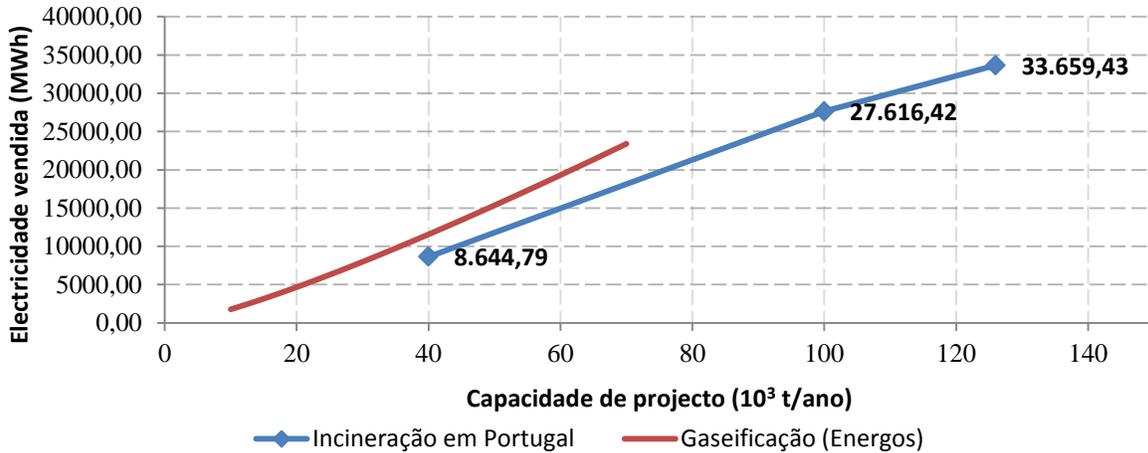


Fig. 7.5: Comparação dos valores de electricidade vendida por parte das unidades WtE em Portugal e Energos® com capacidade inferior a 150 kt/ano

7.5 Receita e Custo efectivo

Anteriormente foram estimados os custos totais do tratamento térmico. Pretende-se agora deduzir a esse valor a receita proveniente da venda de electricidade, obtendo assim o custo efectivo do tratamento.

Representa-se na **Fig. 7.6** o custo efectivo estimado (em €/t) das 5 instalações de incineração existentes em Portugal (**Anexo 4**). Representa-se ainda o valor a receita proveniente da venda de electricidade (**Anexo 2**).

Verifica-se que o custo efectivo estimado situa-se entre 72,48€/t (AMISM, Ilha de São Miguel) e 21,77€/t (VALORSUL, Lisboa). De facto, como era expectável a dimensão dos sistemas introduz um efeito de economia de escala relativamente ao custo efectivo do tratamento.

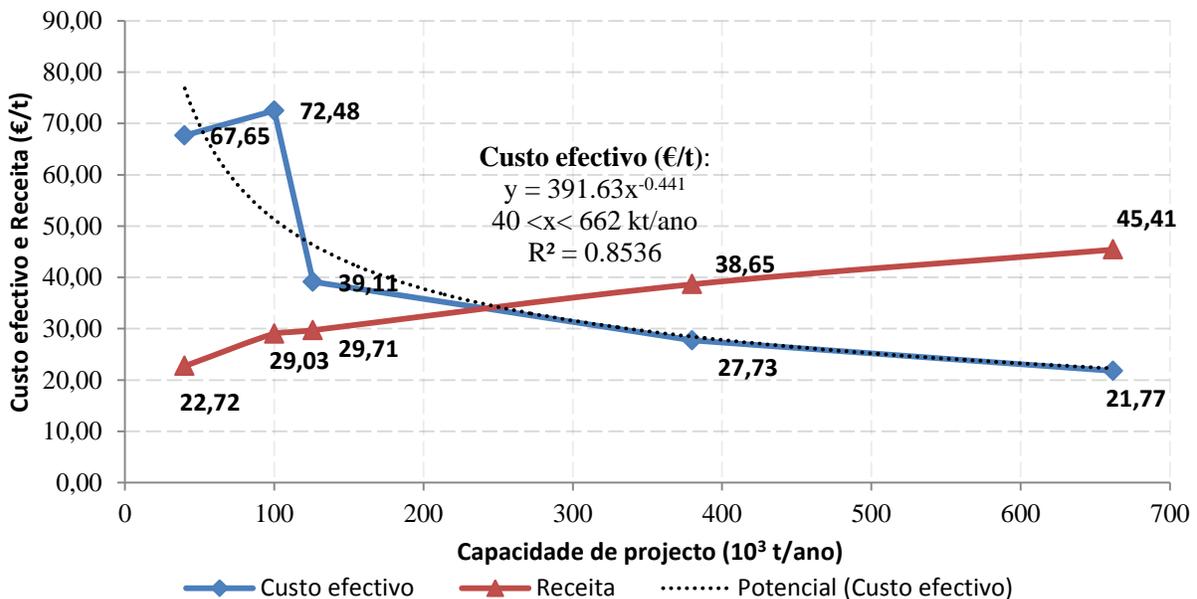


Fig. 7.6: Custo efectivo e receita do tratamento térmico nas unidades WtE em Portugal

A expressão que permite determinar o custo efectivo (em €/t) dos sistemas de tratamento térmico analisados em Portugal é dada por uma função potencial com elevado índice de determinação ($R^2=0.85$):

$$y = 391,63 x^{-0.441} \quad (36)$$

Em que:

y – Custo efectivo (em €/t)

x – capacidade de projecto (em 10^3 t/ano)

Uma vez que os custos são representados de forma nivelada (em €/t), o factor de escala pode ser determinado simplesmente multiplicando a expressão obtida pela capacidade operacional (base de nivelção).

Pelo que, independentemente da disponibilidade dos sistemas, se pode determinar o factor de escala (n) associado ao custo efectivo dos sistemas em termos absolutos (em €):

$$n = 1 - 0.441 = 0.559 \cong 0.6$$

Sistematizam-se no **Quadro 7.3** os resultados obtidos.

Quadro 7.3: Custo efectivo do tratamento térmico nas unidades WtE em Portugal (a preços de 2016)

Parâmetros	Instalações em Portugal	Unidades
Amostra	5 unidades	-
Capacidade de projecto (x)	40 - 662	kt/ano
Custo efectivo (y)	$391,6 x^{-0.441}$	€/t
Coefficiente de determinação (R^2)	0,85	-

Pretende-se agora analisar o custo efectivo da unidades de gaseificação analisada (Energos®) no âmbito das unidades de pequena e média escala (<150 kt/ano). Representa-se na **Fig. 7.8** o custo efectivo das instalações da Ilha Terceira, São Miguel e Ilha da Madeira, bem como da unidade de gaseificação Energos®.

As curvas de custos da tecnologia Energos® representam as expressões (32) e (33) que traduzem o custo efectivo do sistema de gaseificação, respectivamente, para um factor de escala de 0,6 e 0,8, domínio de capacidade válido entre 10 e 70 kt/ano.

A única unidade de incineração existente em Portugal compreendida neste domínio de capacidades é a unidade de incineração implementada na Ilha Terceira (40 kt/ano), para a qual foi estimado um custo efectivo de 67,65 €/t. Assim verifica-se que o custo efectivo da incineração convencional da unidade estudada é ligeiramente superior ao tratamento térmico por via da gaseificação numa unidade Energos®.

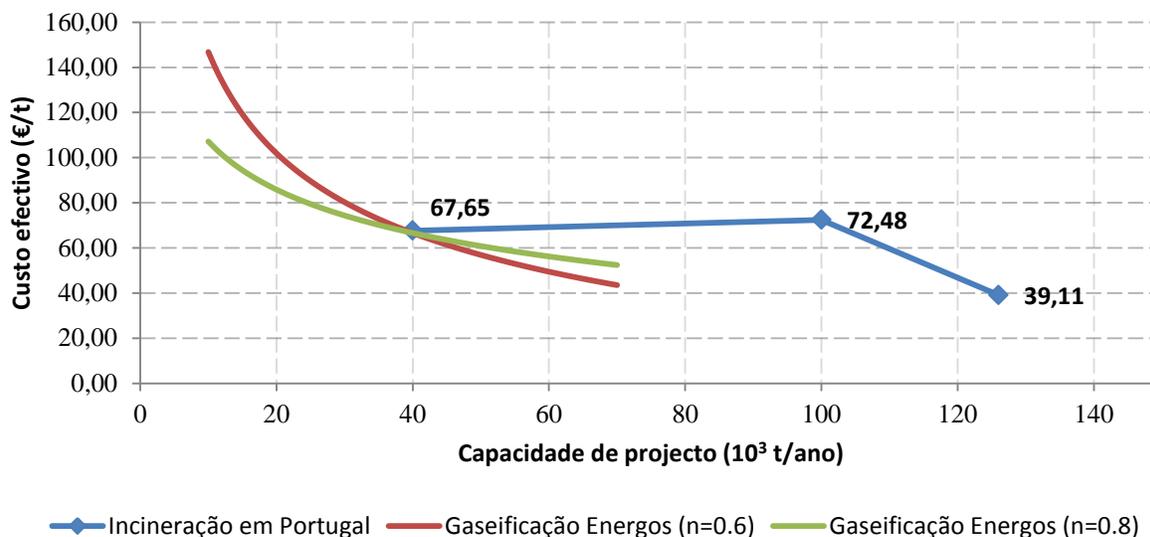


Fig. 7.1: Comparação do custo efectivo do tratamento térmico nas unidades WtE em Portugal e Energos® com capacidade inferior a 150kt/ano

Por forma a analisar o custo efectivo de ambas as unidades, comparou-se o custo efectivo da unidade Energos® para uma capacidade de projecto equivalente à da instalação da Ilha Terceira.

Nestas condições verifica-se que a incineração convencional comporta um custo total superior em 1,6%.

Sistematiza-se no **Quadro 7.4** o cálculo efectuado.

Quadro 7.4: Comparação do custo efectivo do tratamento térmico na unidade WtE da Ilha Terceira e Energos® com capacidade de 40 kt/ano (a preços de 2016)

Parâmetros	Ilha Terceira (incineração convencional)	Energos® (Gaseificação)	Unidades
Capacidade de projecto (x)	40	40	kt/ano
Custo efectivo (y)	67,65	66,61	€/t
Relação de custos	67.65/66.61 = 1,016		-

Pode concluir-se que apesar da unidade de gaseificação Energos® possuir uma maior quantidade de «electricidade vendida», que se traduz numa componente de receita superior, o custo total de tratamento associado à gaseificação é também superior não compensando de forma significativa este acréscimo de receita. No entanto, o tratamento térmico de resíduos por via da gaseificação tendo em conta a tecnologia Energos® constitui a solução de tratamento menos onerosa entre estas duas instalações analisadas. Porém, verifica-se que a diferença do custo efectivo da gaseificação Energos® face ao tratamento térmico por incineração convencional no domínio das soluções de pequena escala é residual. Ainda assim, torna-se evidente que as tecnologias de gaseificação são soluções viáveis técnica e economicamente quando se pretendam implementar soluções a escalas reduzidas.

8 Conclusões

8.1 Discussão de resultados

O nível de instalação de unidades WtE na Europa mostra que o tratamento térmico de resíduos se tem revelado como uma solução bastante recorrente ao nível da gestão de resíduos, nomeadamente, como forma de reduzir a quantidade de resíduos biodegradáveis encaminhados para aterro. Apesar desta ser uma matéria controversa, os tratamentos térmicos de resíduos com a aproveitamento de energia devem continuar a ser uma solução de tratamento equacionada no âmbito da gestão de resíduos urbanos. Os índices de valorização energética em países da Europa demonstram que este tratamento é compatível com um aumento da reciclagem e validam esta solução técnica como uma das formas mais eficazes de desvio de aterro. No entanto, estes sistemas têm custos associados ao tratamento muito elevados, que são repercutidos nas tarifas municipais, pelo que devem continuar a ser desenvolvidas tecnologias que permitam aproveitar mais eficientemente o calor gerado, devendo-se explorar sempre que possível a implementação de sistemas de co-geração, pois permitem alocar uma maior parte de electricidade para venda. A implementação deste tipo de tratamentos em Portugal demonstra que os custos de investimento das instalações estão em linha com o observado nos países europeus em geral. Após deduzida a receita que é proveniente da venda de electricidade, estimou-se que o tratamento térmico de RU nos grandes centros urbanos do país comportam um custo efectivo entre os 20 e 30 €/t, porém a instalação existente na Ilha Terceira (Açores), com uma capacidade operacional de 40.000 t/ano comporta um custo muito superior, na ordem dos 70€/t. De facto, a diferença de valores quantifica o efeito de economia de escala que era expectável. Nomeadamente ao nível do aproveitamento energético, verifica-se que as unidades da VALORSUL e LIPOR permitem alocar um consumo interno apenas de 14%, enquanto a instalação da Ilha Terceira consome 25% dos recursos eléctricos próprios da unidade.

Por outro lado, tem-se notado a implementação cada vez mais marcada de unidades WtE providas da tecnologia Energos®. De facto, esta solução que se enquadra nos ditos tratamento térmicos avançados (TTA) têm-se revelado proeminente no Reino Unido e Noruega, contrariando a tendência de desmantelamento que as tecnologias de gaseificação e pirólise têm sofrido. É de realçar que a tecnologia Energos® é uma tecnologia compacta, concebida para operar em escalas reduzidas e consiste numa tecnologia onerosa. Nesse sentido analisaram-se os custos associados ao tratamento de resíduos urbanos por via desta tecnologia. Se por um lado, o grau crescente de implementação da tecnologia parece demonstrar a sua viabilidade técnica-económica, por outro lado pretendeu-se analisar, tendo por base a instalação de incineração convencional da Ilha Terceira (com uma capacidade equivalente), as condições de implementação de uma unidade Energos®. Apesar do custo efectivo depender directamente da componente de receita obtida (e este corresponder a um valor estimado), concluiu-se que para condições de partida equivalentes às da unidade da Ilha Terceira (taxa de alimentação, PCI dos

resíduos) a tecnologia Energos® revela-se como uma solução viável no âmbito das soluções ditas de pequena escala (66 €/t). Pelo que representa uma alternativa sempre que por imposição de condicionalismos externos (modelo de proximidade), sejam necessárias soluções de pequena escala.

8.2 Trabalhos futuros

Na sequência da análise feita aos sistemas de tratamento térmico, considera-se vantajoso a continuação do estudo do tema, nomeadamente, tendo em conta os seguintes pontos:

- Análise custo-benefício de introduzir sistemas de produção de Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR) a montante do tratamento de valorização energética.
- Analisar a relação entre o custo de transporte em áreas rurais ou menos densas e a introdução de sistemas de valorização energética de pequena escala que permitam evitar o encaminhamento de resíduos para aterros para zonas de confinamento distantes (modelo de proximidade).
- Estudar o mercado de sub-produtos gerados em operações de gaseificação e pirólise em Portugal
- Analisar as possibilidades de introdução de determinados fluxos de materiais (e.g. pneus de borracha) nos sistemas de incineração existentes em Portugal (sistemas mistos) por forma a reduzir os custos globais do sistema.

Referências

AECOM, *Management of Municipal Solid Waste in Metro Vancouver – A comparative analysis of options for Management of Waste after Recycling* (2009).

Agência Portuguesa do Ambiente (APA), Licença de exploração n.º 5/2008, Lipor, Lisboa: APA, 2008.

Agência Portuguesa do Ambiente (APA), Averbamento n.º 1/2013, Lipor, Amadora: APA, 2013.

Agência Portuguesa do Ambiente (APA), Silva F., Mateus I., Marçal A., Ricardo S., Pires S., *Relatório Anual de resíduos urbanos 2013*, I.P (2014).

Agência Portuguesa do Ambiente (APA), Licença de exploração n.º 3/2015, Valorsul, Amadora: APA, 2015.

Agência Portuguesa do Ambiente (APA) (página online), cop. 2016 [consultado em: 2015-03-05], disponível em: <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=108>.

Água e Resíduos da Madeira (ARM), *A IIRSU – Instalação de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos* (disponível na página online), cop. 2016 [consultado em 10-05-2015], disponível em: <http://www.aguasdmadeira.pt/Portals/0/Documentos/Instala%C3%A7%C3%B5es/ETRS%20-%20IIRSU.pdf>.

Água e Resíduos da Madeira (ARM), *Relatório e Contas 2014*, Funchal: ARM, SA., 2015.

Antena Um Açores, 2012-06-04 «Incineração Avança em São Miguel antes do final do ano», Rádio Televisão Portuguesa (RTP), consultado em 2016-07-25.

Arena, U., Di Gregorio, F., Amorese, Mastellone, M.L., 2011. *A techno-economic comparison of fluidized bed gasification of two mixed plastic wastes*, *Waste Management* 31 (2011), no. 7, 1494–1504.

Arena, U., *Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review*, *Waste Management* 32 (2012), no. 4, 625–639.

Associação de Entidades de Valorização Energética de Resíduos Sólidos Urbanos (AVALER), *Indicadores estatísticos – Resíduos tratados por valorização energética em Portugal* (disponível na página online), cop. 2015 [consultado em 2016-07-25], disponível em: http://www.avaler.pt/indicadores_estatisticos.htm.

Associação de Entidades de Valorização Energética de Resíduos Sólidos Urbanos (AVALER), *Informação Sobre Resíduos em Portugal, Newsletter AVALER n.º 23* (disponível na página online), cop. 2015 [consultado em 2016-07-25], disponível em: http://www.avaler.pt/newsletter_avalerm.htm.

Austin, J.S., *Air quality equipment and systems for waste to energy (WTE) conversion plants*, Woodhead Publishing Limited, 2013..

Bajić, B.Z., Dodić, S.N., Vućurović, D.M., Dodić, J.M., Grahovac, J.A., *Waste-to-energy status in Serbia*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50 (2015), 1437–1444.

Basu, P., *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction, Chapter 7 - Gasification Theory*, Elsevier Inc., 2013, 199-248.

Bébar, L., Stehlík, P., Havlen, L., Oral, J., *Analysis of using gasification and incineration for thermal processing of wastes*, *Applied Thermal Engineering* 25 (2005), no. 7 SPEC. ISS., 1045–1055.

Câmara Municipal de Angra do Heroísmo (CMAH), *Artigos - Central de Valorização Energética já produz energia* (página online), cop. 2015 [consultado em 2016-07-25], disponível em: <http://www.cmah.pt/artigos/ver.php?id=1821>.

Comissão Europeia (CE), *O Fundo de coesão e o Ambiente – Portugal*, Luxemburgo: Serviço das Publicações Oficiais das Comunidades Europeias, 1999. ISBN 9282867285.

Confederation of European Waste-to-Energy Plants (CEWEP), *What is Waste-to-Energy? – WtE FAQ* (página online), cop. 2016 [consultado em 2015-04-09], disponível em: http://www.cewep.eu/information/whatiswastetoenergy/wtfaq/474.What_is_the_history_of_waste_incineration.html.

Coordenação Nacional do Fundo de Coesão (CNFC), *O Fundo de coesão na vida dos Portugueses*, Lisboa: Instituto Financeiro para o Desenvolvimento Regional, IP, 2010, ISBN 9789729352867.

Chen, D., Yin, L., Wang, H., He, P., *Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review*, *Waste Management* 34 (2014), no. 12, 2466–2486.

Comissão Europeia (CE), *Reference Document on Economics and Cross-Media Effects*, Integrated Pollution Prevention and Control, 2006.

Couto, N., Silva, V., Monteiro, E., Teixeira, S., Chacartegui, R., Bouziane, K., Brito, P.S.D., Rouboa, A., *Numerical and experimental analysis of municipal solid wastes gasification process*, Applied Thermal Engineering 78 (2015), 185–195.

DEFRA, *Energy from Waste A guide to the debate*, Department for Environment Food & Rural Affairs (2014).

DEFRA, *Incineration of Municipal Solid Waste*, (2013).

Dias, S.M., Silva, R.B., Barreiro, F., Costa, M., *Avaliação do Potencial de Produção e Utilização de CDR em Portugal Continental*, Instituto Superior Técnico - Centro de Engenharia Biológica e Química (2006).

Diário dos Açores (DA), 2015-01-19 «Quercus pede ao executivo para impedir financiamento de incineradora da ilha de São Miguel», consultado em 2016-07-25.

Direcção Regional do Ambiente (DRA), Licença ambiental n.º 13/2014, Teramb, Horta: DRA, 2014
EEA Briefing 2008/01, *Better management of municipal waste will reduce greenhouse gas emissions*, (2008). ISSN 1830-2246.

Energy Information Administration, U.S. (EIA), *Updated Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants*, Washington, DC: Independent Statistics and analysis, 2013.

Environmental Planning and Management, S.A. (EPEM), *Database of Waste Management Technologies - Thermal Treatment Technologies* (página online), cop. 2014 [consultado em 2015-09-15], disponível em: <http://www.epem.gr/demo/waste-c-control/database/html/WtE-01.htm>.

European IPPC Bureau, *Reference document on the Best Available Techniques for Waste Incineration*, Integrated Pollution Prevention Control (2006).

Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), *Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: Guia de orientações para governos municipais de Minas Gerais*, (2012), 163.

Fitzgerald, G.C., *Pre-processing and treatment of municipal solid waste (MSW) prior to incineration*, Woodhead Publishing Limited, 2013.

Global Environment Centre Foundation (GECF), *Waste Management Technology in Japan* (página online), consultado em: [2016-03-18], disponível em: <http://nett21.gec.jp/WASTE/>.

Gohlke, O., *Efficiency of energy recovery from municipal solid waste and the resultant effect on the greenhouse gas balance.*, Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA 27 (2009), no. 9, 894– 906.

Grieco, E.M., and Baldi, G. Pyrolysis of polyethylene mixed with paper and wood: Interaction effects on tar, char and gas yields, Waste Management 32 (2012), no. 5, 833–839.

Grillo, L.M. *Municipal solid waste (MSW) combustion plants*, Woodhead Publishing Limited, 2013.

Grosso, M., Motta, A., Rigamonti, L., 2010. *Efficiency of energy recovery from waste incineration, in the light of the new Waste Framework Directive.* Waste Management 30, 1238–1243.

Hesseling W. F. M., *Case Study ThermoSelect Facility Karlsruhe*, TNO Environment, Energy and Process Innovation (2002).

Hoornweg, D., Bhada-Tata, P., 2012. *What a waste: a global review of solid waste management.* Urban development series. Knowledge papers no. 15. Washington, DC: World Bank.

International Solid Waste Association (ISWA), *Waste-to-Energy State of the Art Report (6^a ed.)*, Dinamarca: RAMBØLL Danmark A/S, 2012.

Karagiannidis, A., *Waste to Energy - Opportunities and challenges for developing and transition economies*, Spring, 2006.

Klein, A., 2002, *Gasification: An Alternative Process for Energy Recovery and Disposal of Municipal Solid Wastes*, Columbia University.

Klinghoffer, N.B., Themelis, N.J., Castaldi, M.J., *Waste to energy (WTE): an introduction*, Woodhead Publishing Limited, 2013.

Klinghoffer, N.B., Castaldi, M.J., *Waste to Energy Conversion Technology*, 2013

Leckner, B., *Process aspects in combustion and gasification Waste-to-Energy (WtE) units*, Waste Management (2014).

Lettieri, P., Yassin, L., Simons, S., *Advanced thermal treatment of composite wastes for energy recovery*, (2010).

Levy J. Q., Cabeças, A., *Resíduos Sólidos Urbanos – princípios e processos*, Lisboa: AEPSA, 2006, ISBN 9899505900.

Lusa, Agência., 2014-11-07 «Incineradora de São Miguel produzirá 10% da energia consumida na ilha em 2018», Porto Canal, consultado em 2016-07-25.

Maybach, *Engine Types and Their Operation - Engine Classifications, engine cycles* (página online), cop. 2012 [consultado em 2016-01-30], disponível em: http://maybach300c.blogspot.pt/2012/07/1-introduction_12.html.

Michael, T., *Environmental and social impacts of waste to energy (WTE) conversion plants*, Waste to Energy Conversion Technology (2013), 15–28.

Nixon, J. D., Wright, D. G., Dey, P. K., Ghosh, S. K., Davies P., *A comparative assessment of waste incinerators in the UK*, Waste Management 33 (2013), no. 11, 2234–2244.

Pato, J. H., *História das políticas públicas de abastecimento e saneamento de águas em Portugal*, Lisboa: ERSAR, 2011. ISBN 9789898360083.

Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU II), Lisboa : Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2007.

Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU 2020), Lisboa : Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2014.

Plano Nacional de Gestão de Resíduos (PNGR), Lisboa: Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2014.

Psomopoulos, C. S., Bourka, A., Themelis, N. J., *Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA*, Waste Management 29 (2009), no. 5, 1718–1724.

Rand, T., Haukohl J., Marxen, U., *Municipal solid waste incineration*, Municipal waste combustion (1999).

Reimann, D.O., *CEWEP Energy Report II (Status 2004–2007), Results of Specific Data for Energy, R1 Plant Efficiency factor and Net Calorific Value (NCV) of 231 European WtE Plants* (2009)

Spakovszky, Z. S., *Unified: Thermodynamics and Propulsion*, Massachusetts Institute of Technology (página online), cop. 2008 [consultado em 2016-01-15], disponível em: <http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/>.

Spliethoff, H., *Power Generation from Solid Fuels. Power Systems*, Berlin: Springer Verlag, 2010, ISBN 9783642028564.

Stein, W., *Review of Small Scale Waste To Energy Conversion Systems*, Renewable Energy (2004).

Tsilemou, K., *Approximate cost functions for solid waste treatment facilities*, Waste Management & Research 24 (2006), no. 4, 310–322.

Vaicaityte, A., Guddat, M., Vestarchi, M.E., Kop, S., Dasyra, Z., *Approaching a 100% Sustainable Electricity System for Terceira*, 2013, Aalborg University.

Vainikka, P., Tsupari E., Sipila K., Hupa, M., *Comparing the greenhouse gas emissions from three alternative waste combustion concepts*, Waste Management 32 (2012), no. 3, 426–437.

Valorsul, *Valorização energética - Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos* (página online), cop. 2016 [consultado em 2014-05-14], disponível em: <http://www.valorsul.pt/pt/o-sistema/valorizacao-energetica/ctrsu.aspx>.

Wärtsilä, *Gas Turbine for Power Generation: Introduction* (página online), cop. 2016 [consultado em 2016-01-30], disponível em: <http://www.wartsila.com/energy/learning-center/technical-comparisons/gas-turbine-for-power-generation-introduction>.

Xará, S., Almeida, M.F., Costa, C., *ENERGY FROM WASTE IN PORTUGAL: THE STATE OF THE ART*, Fundação para a Ciência e Tecnologia, [ano de publicação desconhecido].

ANEXO 1

Valores de «RU incinerados» e «electricidade produzida»

Instalação	Capacidade de projecto (kt/ano)	Capacidade eléctrica instalada (MW)	Resíduos incinerados ⁶ (t):							Capacidade operacional (valor médio) (t/ano)	Disponibilidade
			2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015		
Ilha Terceira	40	3,00 ¹	-	-	-	-	-	-	-	36.000,00 ⁷	90%
São Miguel	100	7,00 ²	-	-	-	-	-	-	-	90.000,00 ⁷	90%
Santa Cruz	126	7,45 ³	112.466	115.682	120.855	97.672	87.440	101.192	112.879	106.883,71	85%
Lipor	380	24,70 ⁴	394.987	380.085	389.733	380.035	382.451	343.173	407.054	382.502,57	100%
Valorsul	662	50,00 ⁵	595.764	589.197	619.026	532.224	633.040	605.769	619.697	599.245,29	91%

Fontes: ¹ Vaicaityte (2013) ²Lusa (2014) ³ Valor estimado ⁴APA (2008) ⁵APA (2015) ⁶ AVALER (2015a) ⁷Assumindo uma disponibilidade de 90% (1 ano=365x24x0.9=7884 horas)

Electricidade produzida ¹ (MWh)								
Instalação	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Valor médio
Ilha Terceira	-	-	-	-	-	-	-	11.526,39 ²
São Miguel	-	-	-	-	-	-	-	36.821,89 ²
Santa Cruz	50.147	53.178	47.502	39.101	36.597	44.951	52.205	46.240,14
Lipor	190.008	183.979	191.707	181.539	180.142	156.917	193.069	182.480,14
Valorsul	343.416	345.663	370.163	278.179	364.508	288.356	345.929	333.744,86

Fontes: ¹ AVALER (2015a) ² Valor estimado no **Anexo 5**

ANEXO 2

Valores de «electricidade vendida» e «receita estimada»

Electricidade exportada ¹ (MWh)								
Instalação	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Valor médio
Ilha Terceira	-	-	-	-	-	-	-	8.644,79 ²
São Miguel	-	-	-	-	-	-	-	27.616,42 ²
Santa Cruz	36.512,00	39.412,00	34.270,00	27.716,00	25.713,00	33.142,00	38.851,00	33.659,43
Lipor	163.739,00	158.509,00	164.816,00	155.253,00	153.174,00	133.383,00	165.888,00	156.394,57
Valorsul	293.837,00	296.325,00	320.424,00	239.291,00	317.363,00	247.644,00	301.360,00	288.034,86

Fontes: ¹ AVALER (2015a) ² Valor estimado no **Anexo 2**

Receita estimada (€/t)								
Instalação	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Valor médio
Ilha Terceira	-	-	-	-	-	-	-	22,72
São Miguel	-	-	-	-	-	-	-	29,03
Santa Cruz	30,71	32,23	26,83	26,84	27,82	30,98	32,56	29,71
Lipor	39,22	39,45	40,01	38,65	37,89	36,77	38,55	38,65
Valorsul	46,66	47,58	48,97	42,53	47,43	38,67	46,00	45,41

ANEXO 3

Valores de «custos operacionais estimados»

Custos operacionais fixos estimados (€/t)								
Instalação	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Valor médio
Ilha Terceira	-	-	-	-	-	-	-	-
São Miguel	-	-	-	-	-	-	-	27,35
Santa Cruz	23,29	22,64	21,68	26,82	29,96	25,89	23,21	24,78
Lipor	21,99	22,85	22,28	22,85	22,71	25,31	21,34	22,76
Valorsul	29,51	29,84	28,40	33,03	27,77	29,02	28,37	29,42
Custos operacionais variáveis estimados (€/t)								
Instalação	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Valor médio
Ilha Terceira	-	-	-	-	-	-	-	-
São Miguel	-	-	-	-	-	-	-	3,20
Santa Cruz	3,49	3,60	3,08	3,14	3,28	3,48	3,62	3,38
Lipor	3,77	3,79	3,85	3,74	3,69	3,58	3,71	3,73
Valorsul	4,51	4,59	4,68	4,09	4,51	3,73	4,37	4,36
Custo operacional total estimados (€/t)								
Instalação	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Valor médio
Ilha Terceira	-	-	-	-	-	-	-	37,99 ¹
São Miguel	-	-	-	-	-	-	-	30,55
Santa Cruz	26,8	26,2	24,8	30,0	33,2	29,4	26,8	28,17
Lipor	25,8	26,6	26,1	26,6	26,4	28,9	25,1	26,50
Valorsul	34,0	34,4	33,1	37,1	32,3	32,8	32,7	33,78

¹Anexo 7 - comunicação pessoal com Teramb (1.367.502,33 €/ano). Valor nivelado assumindo uma disponibilidade de 90% (1 ano=365x24x0.9=7884 horas)

ANEXO 4

Valores de «custo total estimado» e «custo efectivo estimado»

Custo total estimado (€/t)								
Instalação	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Valor médio
Ilha Terceira								90,37
São Miguel								101,51
Santa Cruz	67,44	66,90	65,41	70,61	73,89	70,02	67,48	68,82
Lipor	65,63	66,52	66,01	66,47	66,28	68,77	64,93	66,37
Valorsul	67,42	67,83	66,48	70,52	65,68	66,15	66,14	67,17

Custo efectivo estimado (€/t)								
Instalação	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Valor médio
Ilha Terceira	-	-	-	-	-	-	-	67,65
São Miguel	-	-	-	-	-	-	-	72,48
Santa Cruz	36,73	34,67	38,58	43,77	46,07	39,04	34,92	39,11
Lipor	26,42	27,07	26,01	27,83	28,39	32,00	26,38	27,73
Valorsul	20,76	20,25	17,51	27,99	18,25	27,47	20,13	21,77

ANEXO 5

**Valores de «performance energética» das unidades WtE: Energos
Type 40, Ilha Terceira e Ilha de São Miguel**

Performance energética (método adaptado de Lettieri, 2010)					
Parâmetros	Símbolo	Energos Type 40	Ilha Terceira	São Miguel	Unidades
Capacidade de projecto	Cap,d	40,00	40,00	100,00	kt/ano
taxa de alimentação	r	5,07	5,00	12,68	t/h
Poder calorífico	PCI	8,00	8,00	8,00	MJ/kg
Capacidade térmica, input	Eth,input	11,27	11,11	28,19	MWth
Eficiência térmica	$\eta_{th,gas}$	0,70	0,70	0,70	%
Capacidade térmica do gás	Eth	7,89	7,78	19,73	MWth
Eficiência bruta de produção eléctrica	$\eta_{turbina\ a\ vapor}$	18,60	18,52	23,33	%
Electricidade bruta gerada	E,electricidade bruta	1,47	1,44	4,6	MW
		-	11.526,39	36.821,89	MWh
Consumo interno	E,auxiliar	0,00	0,36	1,15	MW
Electricidade líquida gerada	E,electricidade líquida	1,47	1,08	3,45	MW
		11.573,29	8.644,79	27.616,42	MWh
Eficiência global	$\eta_{eléctrica}$	13,02	9,73	12,25	%
Preço de venda	P,venda	0,0946	0,0946	0,0946	Eur/kWh
Receita	R	1.094.832,88	-	-	Eur/ano
		27,37	22,72	29,03	Eur/t

ANEXO 6

Valores de «custo de investimento» de unidades WtE na Europa

Unidades WtE (dados de Tsilemou, 2006) – preços de 2003		
Capacidade (10 ³ t/ano)	País/Região	Custo de investimento (10 ⁶ €)
18.70	França	11.80-13.30
36.50	Grécia	23.57-27.03
37.50	França	18.07-21.06
37.50	França	17.20-21.51
40.00	Suécia	13.34
40.00	Suécia	24.25
40.00	Dinamarca	26.00
50.00	Europa	25.00
50.00	Alemanha	-
75.00	França	33.55-39.57
100.00	Grécia	35.00
100.00	Alemanha	-
100.00	Reino Unido	56.62
100.00	Europa	45.00
120.00	Reino Unido, Irlanda	67.20
150.00	França	72.26-89.47
150.00	Bélgica	59.49
150.00	Bélgica	63.80
200.00	Alemanha	121.93
200.00	Irlanda	84.24
200.00	Reino Unido	81.62
200.00	Europa	90.00
230.00	Dinamarca	128.80
300.00	Itália	146.81
300.00	Suécia	52.49
300.00	Suécia	95.49
300.00	Alemanha	-
450.00	Holanda	463.50
420.00	Reino Unido, Irlanda	180.60
500.00	Europa	160.00
584.00	Itália	200.00
600.00	Alemanha	-

ANEXO 7

Comunicação pessoal com Teramb

«De: **Maria Ekstrom - Teramb** <maria.ekstrom@teramb.pt>

Data: 17 de agosto de 2016 às 15:10

Assunto: RE: INFORMAÇÃO sobre unidade de valorização

Para: "joao.neves.abrantes@gmail.com" <joao.neves.abrantes@gmail.com>

Boa tarde,

Seguem abaixo os dados solicitados:

1) o valor da totalidade dos custos de investimento da unidade de valorização - **29,711,265€**

2) o valor dos custos operacionais da unidade em termos médios ou no último ano com dados aferidos (despesas com matérias-primas, exames laboratoriais (reagentes, produtos químicos, etc.), energia e outros serviços públicos, eliminação de águas residuais, trabalho, supervisão, manutenção das instalações e equipamentos, seguros, despesas gerais, programas de formação, etc) - **1.367.502,33 € /ano**

- Custo de amortização do capital investido na unidade **1.317.454,50 (incluia totalidade dos investimentos no valor de 36.651.038,29)**

- Preço de venda da electricidade - **94,6 €/MWh**

Com os melhores cumprimentos,

Maria do Anjo Ekström

Empresa Municipal de Gestão e Valorização
Ambiental da Ilha Terceira, EM

Central de Tratamento e Valorização de Resíduos
da Ilha Terceira
Biscoito da Achada, Ribeirinha
9700-135 Angra do Heroísmo
NIF:509620515

E-mail: geral@teramb.pt

Website: www.teramb.pt

Por favor, tenha em consideração o ambiente antes de imprimir este mail!»

«De: João Abrantes [<mailto:joao.neves.abrantes@gmail.com>]

Enviada: quarta-feira, 27 de julho de 2016 15:35

Para: Geral - Teramb <geral@teramb.pt>

Assunto: INFORMAÇÃO sobre unidade de valorização

Boa tarde,

estou a contactar no sentido de requerer algumas informações na sequência de um estudo sobre as unidades de valorização energética em Portugal.

A análise das referidas unidades insere-se no âmbito de uma dissertação de tese de mestrado, do curso de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, da parte de João Abrantes (nº 67437 IST).

Sendo a unidade de incineração da Teramb a mais recente unidade de valorização energética em Portugal, as informações que gostaria de solicitar dizem respeito aos seguintes parâmetros, sobre a unidade de incineração:

- o valor da totalidade dos custos de investimento da unidade de valorização
- o valor dos custos operacionais da unidade em termos médios ou no último ano com dados aferidos (despesas com matérias-primas, exames laboratoriais (reagentes, produtos químicos, etc.), energia e outros

serviços públicos, eliminação de águas residuais, trabalho, supervisão, manutenção das instalações e equipamentos, seguros, despesas gerais, programas de formação, etc)

- Custo de amortização do capital investido na unidade
- Preço de venda da electricidade

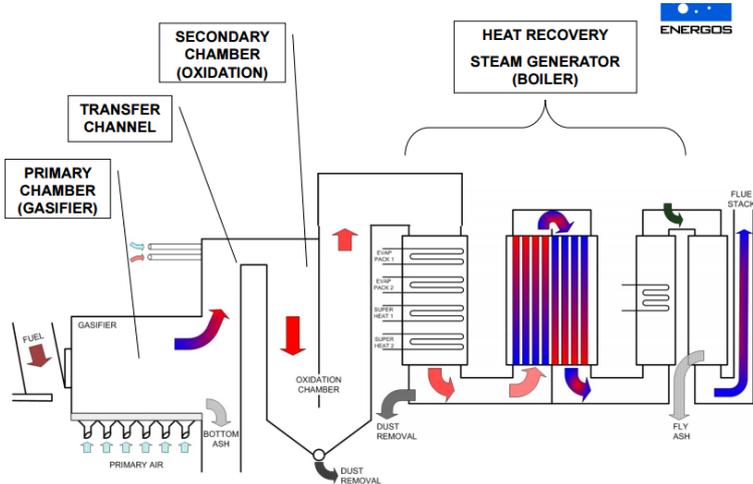
Os custos que se pretendem obter são em eur/ton e, para o efeito, não será necessário a discriminação das parcelas de custos indicados.

Agradeço antecipadamente a disponibilização desta informação, caso seja possível e a colaboração da Teramb

Cumprimentos
João Abrantes»

ANEXO 8

Tecnologias de gaseificação e pirólise

Tecnologia	Descrição do processo	Capacidade (t/ano)	Implementação
Energos (Noruega)	<p>Grelha fixa em regime de gaseificação com combustão do gás sintético em câmara própria a elevadas temperaturas. Pré-tratamento requerido. Adequado para produção de electricidade ou CHP.</p> 	10.000 – 70.000	Reino Unido (1+6 em construção) Noruega (6) Alemanha (1)
Foster Wheeler (Finlândia)	<p>Leito fluidificado com circulação em regime de gaseificação. Concebido para operar em CHP. Flexível ao nível do combustível utilizado.</p>	25.000 – 50.000	Finlândia (1)
TPS Termiska Processer AB	<p>Leito fluidificado com circulação em regime de gaseificação. Concebido para RDF. Produção de electricidade (6.7 MW).</p>	75.000	Itália (1)

¹ Chen et al. (2014); Nixon et al. (2013); Stein e Tobiasen, 2004

Descrição de tecnologias que envolvem processos de pirólise de RU aplicáveis em pequenos e médios aglomerados.

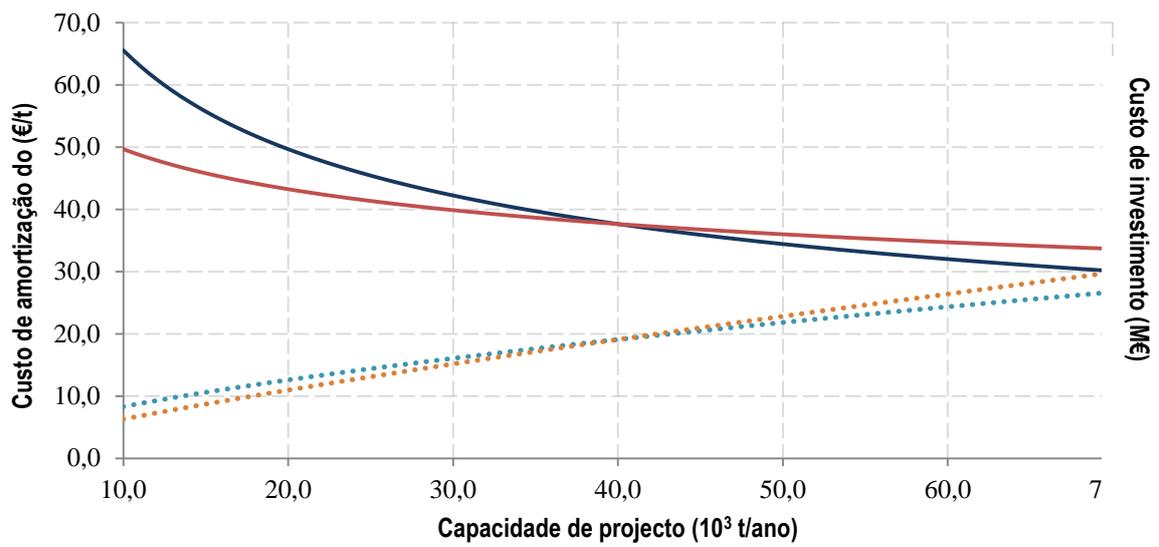
Tecnologia	Descrição do processo	Capacidade (t/ano)	Implementação
RWE-ConTherm	Forno rotativo em regime de pirólise com combustão do gás sintético. Apropriado para produção de electricidade através de uma turbina a vapor. Pré-tratamento requerido (fragmentação) ¹	100.00	Alemanha (1), actualmente interrompida
Thermoselect process (Suíça)	Grelha móvel em regime de pirólise até 600C. Gaseificação do gás pirolítico após purificado a 1200-2000°C. Não necessita de qualquer tratamento prévio dos resíduos. ⁴ Uma, duas ou três linhas. ⁶	50.000 (Mutsu), 225.000 ³ (Karlsruhe), 100.000 ⁶ (Chiba), 32.000 ⁶ (Fondotoce – projecto piloto 1991-1998 gas motor)	RU: Mutsu ¹ , Nagasaki, Tokushima ⁵ , Fondotoce ³ (Itália) RU + RI: Kurashiki, Chiba Karlsruhe ^{3,6}
Compact-power (Reino Unido) (Ethos Renewables Avonmouth (ERA) Limited)	Combinação de pirolisador tubular e câmara de gaseificação. Combustão do gás sintético ¹ . Adaptável para operar em CHP devido ao poder calorífico do gás expulso. Pode utilizar RU. Adequado principalmente para resíduos hospitalares (8.000 t/ano) ¹	6.000 – 30.000	Reino Unido (1 planta de demonstração a operar em condições comerciais)
EDDITh Process/EDDITh Thermolisis (França)	Forno rotativo em regime de pirólise a 450-600C com câmara de combustão do gás sintético a 1100C. Produção de combustíveis sólidos. Apropriado para produção de calor e electricidade. Produção de electricidade inviável para pequenas escalas. Pré-tratamento requerido	10.000 – 80.000	Japão (3) França (1) c/ 50.000 t/ano ¹

Tecnologia	Descrição do processo	Capacidade (t/ano)	Implementação
	para RU (secagem e shred) ¹		
Entech Renewable Energy Systems	Gaseificação pirolítica. Pré-tratamento não requerido.	40.000 – 180.000	Australia, Singapura, Hong-Kong
WasteGen UK (Reino Unido)	Forno rotativo em regime de pirólise. Em colaboração com sistema de reciclagem e compostagem.	50.000 – 200.000	Alemanha (1)

¹ Chen et. Al. (2015, 2014); Nixon et al. (2013); ³ Stein e Tobiasen (2004); ⁴Malkow (2004); ⁵Slides; ⁶IEA (está na pasta do costs 2002); RU – resíduos urbanos; RI – resíduos industriais

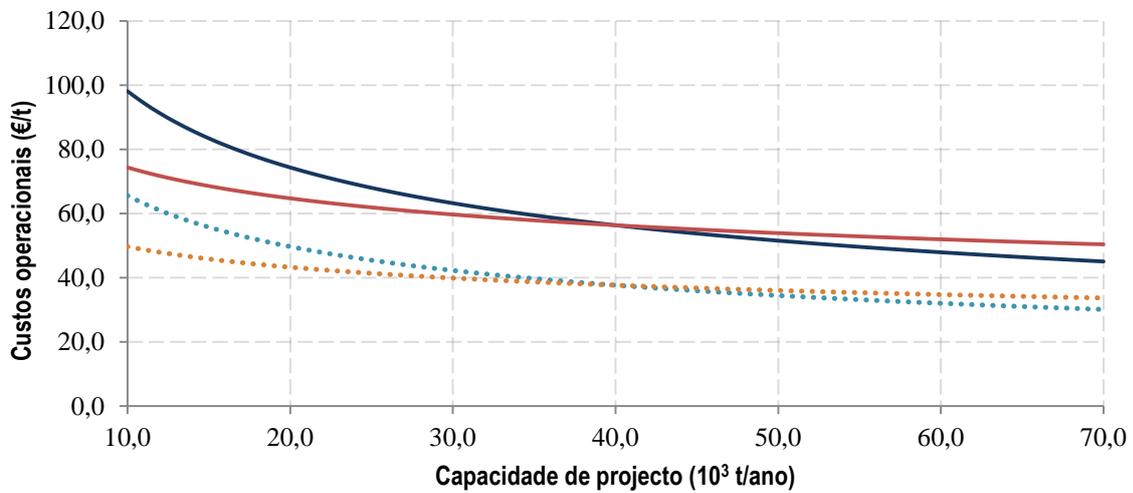
ANEXO 9

Custos e Receitas do tratamento por gaseificação Energoss®



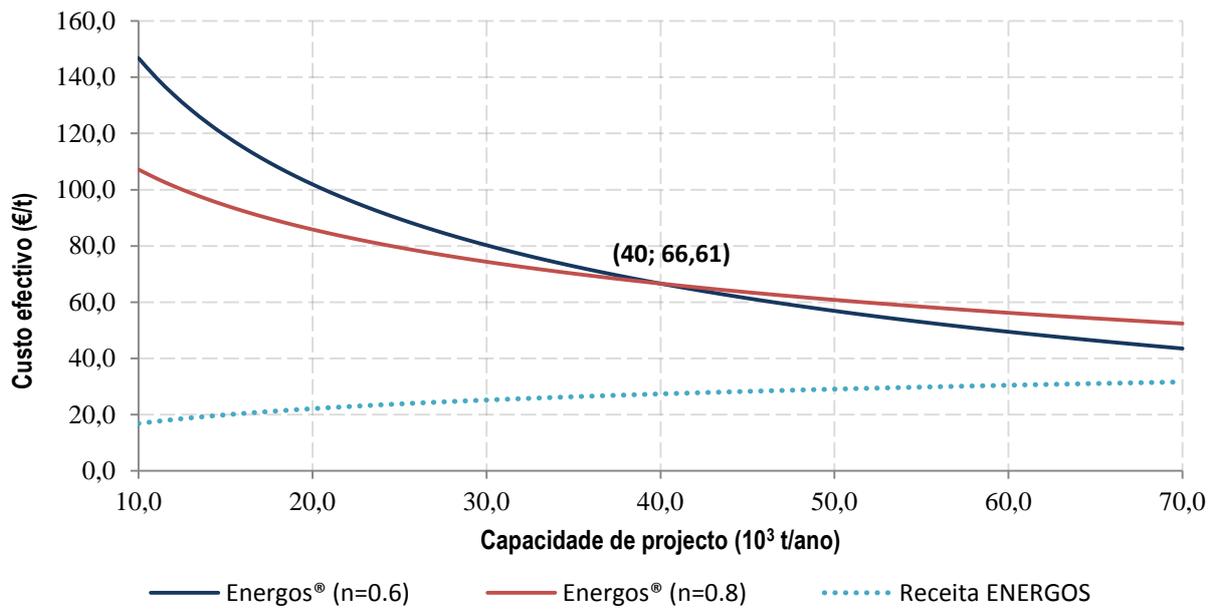
— Energos® (n=0.6) — Energos® (n=0.8) CI ENERGOS (n=0.6) CI ENERGOS (n=0.8)

Custo de amortização e custo de investimento do tratamento térmico por via da tecnologia Energos®



— Energos® (n=0.6) — Energos® (n=0.8) CA ENERGOS (n=0.6) CA ENERGOS (n=0.8)

Custos operacionais e custo de amortização do tratamento térmico por via da tecnologia Energos®



Custo efectivo (inc. receita) do tratamento térmico por via da tecnologia Energos®