



**Universidade Federal
do Rio de Janeiro**
Escola Politécnica

INCINERAÇÃO: UMA ANÁLISE DO TRATAMENTO TÉRMICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE BAURU/SP

Camila Frankenfeld Machado

Projeto de Graduação apresentado ao
Curso de Engenharia Ambiental da Escola
Politécnica, Universidade Federal do Rio
de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de
Engenheiro.

Orientador: Jo Dweck

Rio de Janeiro

Fevereiro, 2015

INCINERAÇÃO: UMA ANÁLISE DO TRATAMENTO TÉRMICO DOS RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS DE BAURU/SP

Camila Frankenfeld Machado

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Examinada por:

Prof. Jo Dweck, Dr. Eng.

Prof. Maria Claudia Barbosa, D. Sc.

Dr. Marcelo Mendes Viana, Dr. Eng.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO de 2015

Machado, Camila Frankenfeld

Incineração: Uma Análise do Tratamento Térmico dos Resíduos Sólidos Urbanos de Bauru/SP/ Camila Frankenfeld Machado. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2015.

IX, 88 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Jo Dweck

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/
Curso de Engenharia Ambiental, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 62-64.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Incineração: Uma Análise do Tratamento Térmico dos Resíduos Sólidos Urbanos de Bauru/SP

Camila Frankenfeld Machado

Fevereiro/2015

Orientador: Jo Dweck

Curso: Engenharia Ambiental

A geração de resíduos sólidos é consequência de grande parte das atividades realizadas pelo homem desde sua existência. Atualmente, a enorme quantidade de rejeitos produzidos é motivo de preocupação, principalmente nos grandes centros urbanos. O tratamento inadequado dado a esses materiais traz prejuízos diretos para a população e o meio ambiente, tais como contaminação ambiental, favorecimento à proliferação de vetores de doenças, geração de gases poluentes, entre outros. Além desses, a incorreta disposição dos resíduos resulta em desperdício material e energético uma vez que parte considerável deste material é passível de reaproveitamento e geração de lucro.

Este trabalho analisa a recuperação de energia dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), por meio do processo de incineração. A pesquisa propõe um estudo de caso a fim de estimar teoricamente a energia que pode ser disponibilizada pela incineração dos RSU gerados no município de Bauru de acordo com a segregação parcial dos materiais que o compõem.

Palavras-chave: Incineração, Resíduos Sólidos Urbanos, Tratamento Térmico, Tratamento Químico.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Environmental Engineer.

Incineration: A Thermal Treatment Analysis of Bauru/SP Municipal Solid Waste

Camila Frankenfeld Machado

February/2015

Advisor: Jo Dweck

Course: Engenharia Ambiental

The generation of solid waste is a consequence of the activities carried out by man since his existence. Currently, the huge amount of waste produced is a problem, especially in urban centers. The inadequate treatment of these materials brings direct damage to people and the environment, such as environmental pollution, proliferation of disease vectors, generation of greenhouse gases, among others. In addition to these, improper disposal of residues results in materials and energy lost once this material is also subject to reuse and profit generation.

This project analyzes the energy recovery from municipal solid waste through incineration process. The research proposes a case study in order to theoretically estimate the energy that may be generated from the incineration of the municipal solid waste generated in Bauru city, according to partial segregation of materials that compose it.

Keywords: Incineration, Municipal Solid Waste, Thermal Treatment, Chemical Treatment.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação e Relevância do Estudo.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Organização do Texto.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Resíduos Sólidos Urbanos.....	4
2.1.1. Definição e Caracterização.....	4
2.1.2. Contexto Nacional.....	5
2.2. Incineração.....	12
2.2.1. Estado da Arte da Tecnologia de Incineração.....	12
2.2.2. Contexto Mundial e Nacional.....	14
2.2.3. Tecnologias de Incineração.....	22
2.2.4. Tecnologia de Recuperação Energética.....	30
2.2.5. Questões Ambientais.....	35
3. ESTUDO DE CASO.....	40
3.1. Metodologia.....	40
3.1.1. Tipo de Pesquisa.....	40
3.1.2. Seleção da Localidade.....	40
3.1.3. Coleta e tratamento de dados.....	41
3.1.4. Limitações do Método.....	42
3.1.5. Descrição do Caso.....	42
3.2. Resultados.....	48
3.2.1. Combustível.....	48
3.2.2. Comburente.....	49
3.2.3. Gases de Combustão.....	50
3.2.4. Potencial de Geração de Energia.....	51
4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	57
5. CONCLUSÕES.....	60
5.1. Contribuições.....	60
5.2. Limitações da Pesquisa.....	61

5.3. Trabalhos Futuros _____	61
REFERÊNCIAS	62
Anexo I - Plantas de Waste to Energy no Mundo	65

Lista de Figuras

Figura 1 - Geração de RSU total e per capita no Brasil (ABRELPE, 2013)	6
Figura 2 – Percentual de resíduos gerados no Brasil em 2013 (ABRELPE, 2013).....	7
Figura 3 - Coleta de RSU total e per capita no Brasil (ABRELPE, 2013).....	8
Figura 4 - Índice de abrangência da coleta de RSU (%) (ABRELPE, 2013).....	9
Figura 5 - Iniciativas de coleta seletiva nos municípios brasileiros em 2013 (ABRELPE, 2013)	10
Figura 6 - Destinação final dos RSU Coletados no Brasil (ABRELPE, 2013)	11
Figura 7 - Quantidade de usinas de Incineração.....	17
Figura 8 - Capacidade de processamento (t/d) e potencial de geração de energia (MW)	18
Figura 9 - Composição requerida para a combustão espontânea da massa de resíduos (Adaptado de WtERT, 2013).....	24
Figura 10 - Modelos de sistemas de grelhas (Adaptado de Bilitewski et al., 1997)	27
Figura 11 - Incinerador de leito fluidizado do tipo <i>circulating</i> (Adaptado de Van Caneghem <i>et al.</i> , 2012).	29
Figura 12 - Estrutura das unidades que compõem o Ciclo de Rankine (Adaptado de WP, 2014).....	31
Figura 13 - Diagrama T-S e o Ciclo de Rankine (MSPC, 2008)	32
Figura 14 - Planta de usina de recuperação de RSU (Plastivida, 2012).....	34
Figura 15 – Diagrama esquemático do processo de incineração	43
Figura 16 - Potencial teórico de geração de energia considerando a segregação do material.....	55

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Quantidade de RSU gerados no Brasil por região.....	7
Tabela 2 - Distribuição das instalações de incineração WtE no mundo	16
Tabela 3 - Capacidade instalada da tecnologia de incineração WtE na Europa.....	16
Tabela 4 - Principais informações e características de unidades de incineração em operação no País.....	21
Tabela 5 - Padrões ambientais de emissão vigentes no Brasil e em países europeus	36
Tabela 6 - Padrões ambientais de emissão vigentes nos EUA	37
Tabela 7 - Condições para controle de emissão de poluentes em usinas de processamento térmico de RSU	37
Tabela 8 - Composição típica dos resíduos do aterro sanitário de Bauru.....	48
Tabela 9 - Análise elementar do RSU combustível em base úmida	49
Tabela 10 - Quantidades dos reagentes	50
Tabela 11 - Entalpias dos reagentes e produtos das reações químicas de combustão	52
Tabela 12 - Entalpia e massa molecular da água	54
Tabela 13 - Poder calorífico efetivo por segregação de material (MJ/kg)	55
Tabela 14 - Balanço de massa do processo de incineração	57

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e Relevância do Estudo

A geração de resíduos sólidos é consequência de grande parte das atividades realizadas pelo homem desde sua existência. Fruto dos avanços tecnológicos, do acentuado crescimento populacional e do padrão de vida consumista das sociedades, atualmente, a enorme quantidade de resíduos produzidos é motivo de preocupação, principalmente nos grandes centros urbanos.

De modo geral, o consumo excessivo e a demanda por bens cada vez menos duráveis vem sendo estimulados por diversas áreas do comércio e por diferentes tipos de indústrias. Entretanto, apesar do benefício gerado para o consumidor com a inserção de novos produtos em seu cotidiano, o consumismo tem consequências negativas preocupantes, que vão desde o esgotamento dos recursos naturais até a geração de resíduos sólidos em excesso.

Associado ao consumo e ao descarte exagerado de materiais pode-se mencionar que o incorreto gerenciamento da limpeza urbana, prática comum em diversas cidades brasileiras, é fator agravante. A disposição inadequada de rejeitos descartados aliada à falta de tratamento dos mesmos resulta não só na contaminação ambiental e no favorecimento à proliferação de vetores de doenças, mas também em desperdício material e energético uma vez que parte considerável dos resíduos é passível de reaproveitamento e geração de lucro.

Nesse contexto, o desenvolvimento sustentável passou a ser um dos grandes desafios mundiais atuais. Henriques (2004) reforça a responsabilidade da sociedade quanto à proposição de alternativas menos impactantes ao meio ambiente, mostrando então a necessidade da pesquisa de novas técnicas e tecnologias que visem a disposição de rejeitos. De forma associada, é exaltada por Mavropoulos (2010) a viabilidade do emprego da tecnologia de incineração como opção para a solução de problemas ambientais associados ao destino final dos resíduos sólidos urbanos.

De acordo com Henriques (2004), o desenvolvimento mais recente da tecnologia de incineração incluiu a modernização dos sistemas de controle e tratamento de gases poluentes, promovendo condições para a maior aceitabilidade de unidades baseadas no tratamento térmico de resíduos. Atualmente, são diversos os

países que utilizam a incineração como solução para a disposição final e o aproveitamento energético de RSU.

Além das questões que envolvem a limpeza urbana, a diversificação da matriz energética, independente do momento de crise, é um assunto também interessante, que torna a aplicação de incineração, assim como de outras técnicas que envolvem reaproveitamento energético, economicamente mais atraentes em virtude, principalmente, da geração de energia.

Dessa forma, a principal motivação deste projeto é contribuir com a investigação do tema em questão, fazendo-se útil para a promoção tanto da destinação adequada de resíduos sólidos, como também estimular a pesquisa de técnicas com recuperação energética.

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal o estudo da tecnologia de incineração, com foco na conversibilidade da energia a partir dos resíduos sólidos urbanos. Como esta técnica já se encontra implementada em diversos países, a pesquisa propõe um estudo de caso a fim de estimar teoricamente a quantidade de energia que pode ser produzida com a incineração dos RSU gerados no município de Bauru, no estado de São Paulo, de acordo com a segregação parcial dos materiais que o compõem.

É também finalidade do projeto a descrição de conceitos básicos sobre resíduos sólidos urbanos e a apresentação de um panorama da situação da tecnologia de incineração no contexto nacional e internacional. Como demais objetivos específicos, foram levantados:

- Incentivo a discussão sobre soluções alternativas para o tratamento de resíduos sólidos;
- Incentivo a discussão da diversificação da matriz energética;
- Geração de novos conhecimentos tanto para Bauru, localidade de aplicação do Estudo de Caso, quanto para demais localidades interessadas;
- Contribuição para trabalhos futuros desenvolvidos nessa área.

1.3. Organização do Texto

O presente trabalho apresenta-se dividido em 5 capítulos:

O primeiro compreende a Introdução, onde são descritas as motivações, a relevância do tema e os objetivos da pesquisa, de forma a contextualizar o estudo.

O segundo compreende a Revisão Bibliográfica, onde são descritas definições e conceitos básicos sobre resíduos sólidos urbanos no Brasil. É apresentado ainda um panorama da tecnologia de incineração, que aborda o estado da arte da tecnologia, as principais técnicas utilizadas e algumas questões ambientais.

O terceiro compreende o Estudo de Caso, onde é descrita a parte prática do projeto, a metodologia empregada e os principais resultados alcançados.

O quarto compreende as Discussões de Resultado do projeto, onde são avaliados os resultados obtidos na parte prática e é realizada a associação dos mesmos com o referencial teórico.

O quinto compreende as Conclusões, onde são descritas as principais contribuições do trabalho e são propostos novos questionamentos a partir dos resultados e das limitações a que a pesquisa esteve sujeita.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Resíduos Sólidos Urbanos

2.1.1. Definição e Caracterização

Uma das principais leis brasileiras de resíduos sólidos é a Lei nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Essa lei contém instrumentos importantes para o avanço do País no tratamento dos resíduos não só em termos ambientais, mas também nos âmbitos social e econômico.

A mesma prevê a redução na geração de resíduos, propondo a prática de hábitos de consumo sustentáveis e instrumentos que incentivam a reciclagem, a reutilização e o tratamento dos resíduos sólidos, bem como a disposição ambientalmente correta dos rejeitos. Na esfera social, a lei propicia a inclusão de catadores de materiais recicláveis tanto na Coleta Seletiva, como na Logística Reversa dos resíduos e embalagens.

Resíduo sólido é definido nessa Política como um “material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível”.

Os resíduos sólidos podem ser classificados quanto à sua periculosidade e quanto à sua origem, sendo os resíduos perigosos aqueles que geram risco significativo ao meio ambiente ou à saúde pública em razão de suas propriedades¹. Assim sendo, os resíduos sólidos urbanos são enquadrados como não perigosos e englobam os resíduos domiciliares, que são originários de atividades domésticas em residências urbanas, e os resíduos de limpeza urbana, originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana.

¹inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade.

A NBR 10.004/2004, legislação técnica representada pela ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, também classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais à saúde e ao meio ambiente. A norma, além de classificar os resíduos em perigosos e não perigosos, subdivide o segundo caso em “não inertes” e “inertes”. Para a classificação do resíduo segundo a NBR em questão, devem ser identificadas suas características, propriedades e origem, além de realizada uma comparação entre o resíduo a ser classificado e as listagens apresentadas na norma. (ABNT, 2004)

A Empresa de Pesquisa Energética classifica os resíduos sólidos quanto à sua origem (urbanos, industriais e agrícolas) e propriedades (inertes e combustíveis). (EPE, 2008) Para o presente trabalho, a classificação do resíduo sólido como combustível é muito útil, uma vez que é de extrema importância para o tratamento via incineração com aproveitamento energético que o resíduo tenha boas propriedades combustíveis.

A respeito do gerenciamento dos resíduos sólidos, por meio da Lei nº 12.305, de 2010, entende-se esse processo como um conjunto de ações praticadas nas etapas de coleta, transporte, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Este trabalho tem, portanto, foco no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, material não perigoso, composto por resíduos domiciliares e resíduos de limpeza urbana, especificamente na parte do tratamento e destinação final ambientalmente adequada.

2.1.2. Contexto Nacional

Os dados apresentados a seguir foram extraídos do Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil, um relatório anual elaborado pela ABRELPE (2013) - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, onde são apresentadas informações sobre os resíduos sólidos no país referentes ao ano de 2013. Este é o estudo mais recente, até o presente momento, a respeito do assunto.

De acordo com o referido estudo, em 2013, foram gerados mais de 76,3 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos no Brasil, o que representou um crescimento de 4,1%, quando comparando ao ano anterior. Esse índice superou a

taxa de crescimento populacional do período, que foi de 3,7%, apontando um crescimento da geração per capita de RSU de 0,39%. Os dados de geração total e per capita de resíduos sólidos urbanos são apresentados na Figura 1.

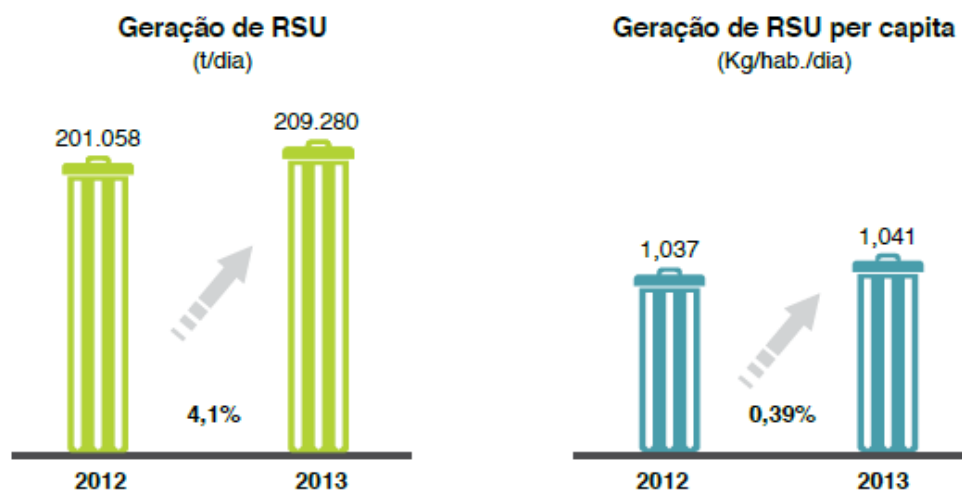


Figura 1 - Geração de RSU total e per capita no Brasil (ABRELPE, 2013)

Em relação às regiões brasileiras, em 2013, a região Sudeste foi responsável pela geração de 102 mil toneladas de resíduos por dia, aproximadamente, 50% do total gerado no País. A segunda região com a maior geração foi a região Nordeste, onde diariamente foram descartadas cerca de 53 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos, representando 26% do total. Em seguida, estão as regiões Sul, Centro-Oeste e Norte, as quais geraram entre 7% e 10% cada uma. A Tabela 1 apresenta as quantidades de RSU gerados para cada região no Brasil em 2012 e em 2013 e a Figura 2, o valor percentual de geração para cada região em 2013.

Tabela 1 - Quantidade de RSU gerados no Brasil por região

Regiões	2012	2013		
	RSU Gerado (t/dia)/ Índice (Kg/hab./dia)	População Total (hab.)	RSU Gerado (t/dia)	Índice (Kg/hab./dia)
Norte	13.754 / 0,841	17.013.559	15.169	0,892
Nordeste	51.689 / 0,959	55.794.707	53.465	0,958
Centro-Oeste	16.055 / 1,113	14.993.191	16.636	1,110
Sudeste	98.215 / 1,204	84.465.570	102.088	1,209
Sul	21.345 / 0,770	28.795.762	21.922	0,761
BRASIL	201.058 / 1,037	201.062.789	209.280	1,041

(ABRELPE, 2013)

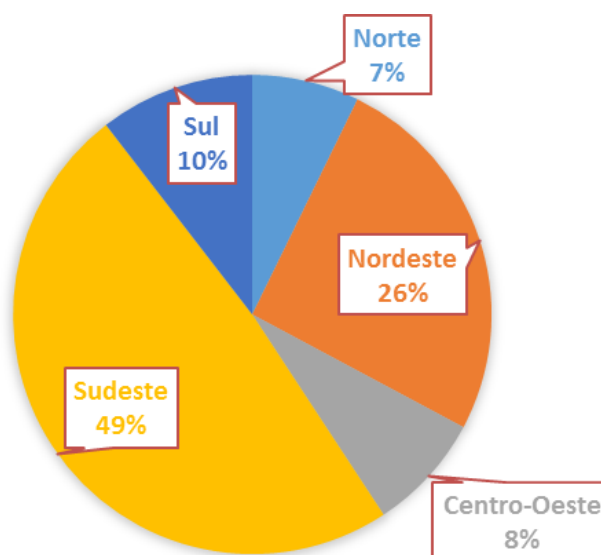


Figura 2 – Percentual de resíduos gerados no Brasil em 2013 (ABRELPE, 2013)

Do total de resíduos gerados em 2013 no País, 90,4% foram coletados, ou seja, aproximadamente 69 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos. A Figura 3, apresentada a seguir, mostra um aumento de 4,4% na quantidade de resíduos e de 0,64% na quantidade de resíduos per capita coletada em 2013 em relação ao ano anterior. A comparação deste índice com a taxa de geração aponta uma pequena evolução na cobertura da coleta, indicando um progresso na universalização desse serviço.

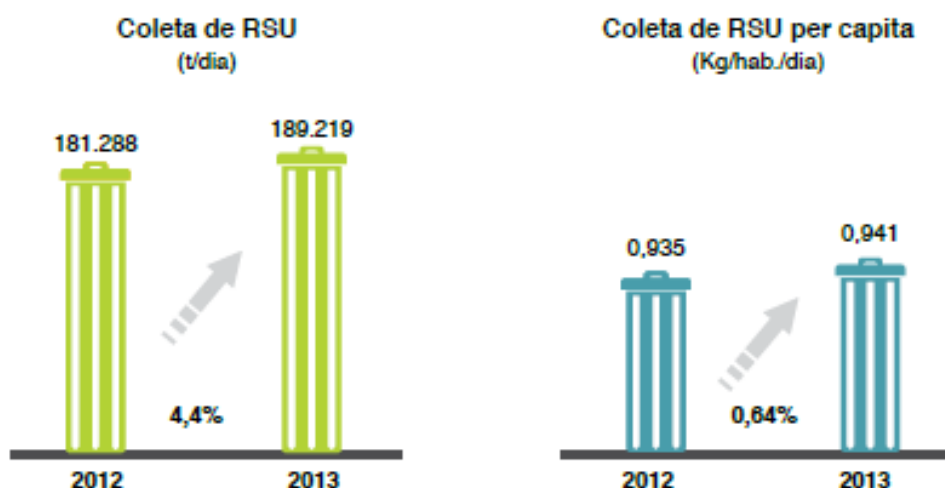


Figura 3 - Coleta de RSU total e per capita no Brasil (ABRELPE, 2013)

A região que apresentou o pior serviço de coleta em 2013 foi a região Nordeste. Mesmo com um crescimento em relação ao ano anterior, somente 78,2% dos resíduos sólidos urbanos gerados nesse período foram coletados nessa parte do País. Na região Sudeste a situação é inversa e 97,9% dos resíduos sólidos urbanos gerados foram coletados nesse período, apresentando o melhor serviço de coleta do País. Nas demais regiões, Sul, Centro-Oeste e Norte, foram coletados entre 80% e 94% de resíduos gerados em cada uma. Esses dados são apresentados na Figura 4, abaixo.

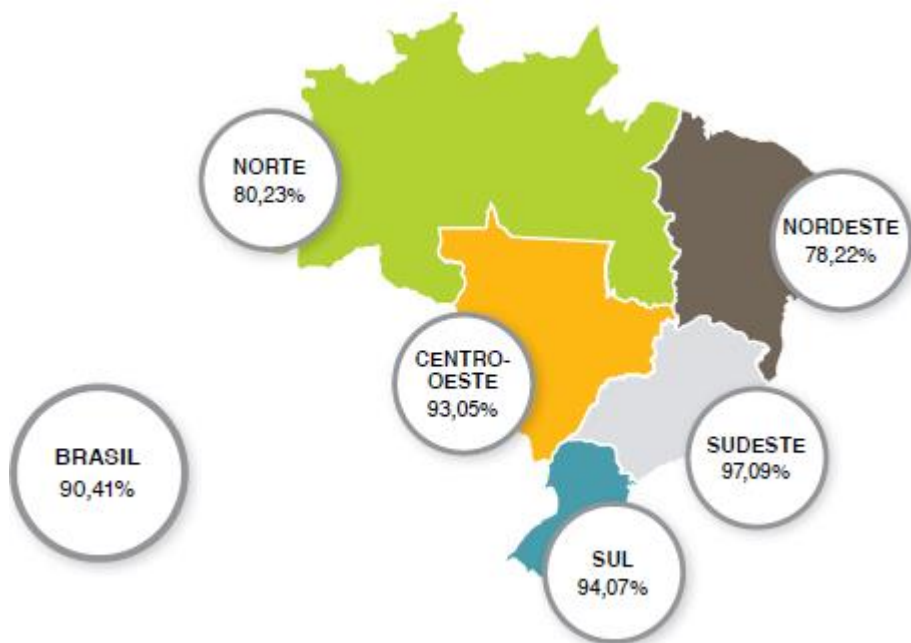


Figura 4 - Índice de abrangência da coleta de RSU (%) (ABRELPE, 2013)

Em 2013, os municípios brasileiros que registraram alguma iniciativa de coleta seletiva representavam cerca de 62% do total, conforme é apresentado na Figura 5. Entretanto, é conveniente salientar para o fato de que, embora esse número seja expressivo, estas iniciativas resumem-se, muitas vezes, apenas a convênios com cooperativas de catadores ou disponibilização de pontos de entrega voluntária, não abrangendo a totalidade da população ou do território do município.



Figura 5 - Iniciativas de coleta seletiva nos municípios brasileiros em 2013 (ABRELPE, 2013)

Analisando os dados apresentados, deve-se destacar que, no diz respeito à coleta de resíduos sólidos no Brasil, os índices de 2013 mostraram-se mais eficazes se comparados ao ano anterior, apresentando crescimento no período indicado. Entretanto, referente aos números geração de resíduos divulgados pelo Relatório, ainda não foram evidenciados avanços significativos no País para o controle desse indicador, o que é ilustrado pelo aumento per capita da quantidade de resíduos sólidos descartados.

A destinação final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, última etapa do gerenciamento da limpeza pública, apresenta também valores negativos. Segundo a referida pesquisa, mais de 41% dos RSU coletados no País em 2013, foram dispostos inadequadamente, totalizando cerca de 28,8 milhões de toneladas de material coletados encaminhados para lixões ou aterros controlados. Em 2012, esse valor correspondia a 22,6 milhões de toneladas, o que mostra um aumento na destinação inadequada de resíduos sólidos. A Figura 6 apresenta o quadro descrito.

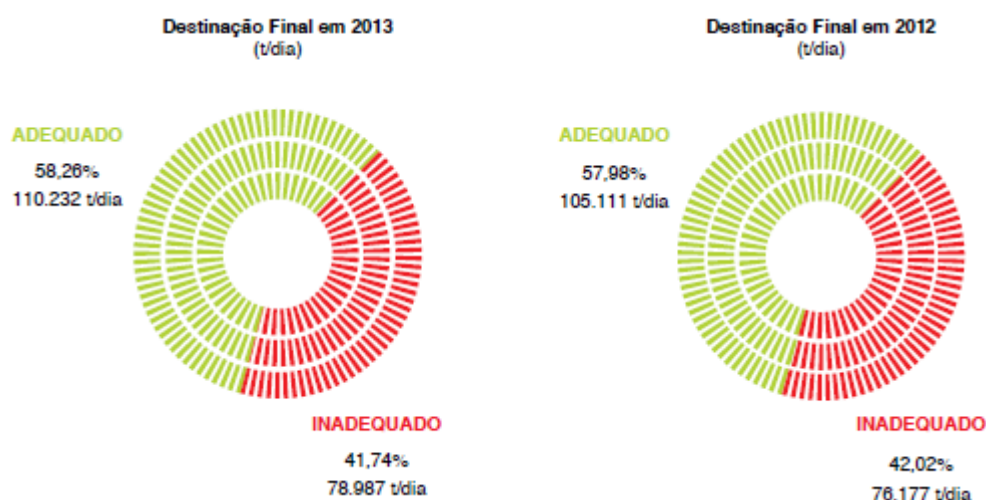


Figura 6 - Destinação final dos RSU Coletados no Brasil (ABRELPE, 2013)

Tendo em vista que, atualmente, o tratamento adequado dos resíduos sólidos urbanos coletados no País resume-se ao encaminhamento dos mesmos para aterros sanitários ou para a atividade de reciclagem, que é realizada em proporções muitíssimo menores, pode-se fazer uma análise final negativa a respeito do gerenciamento brasileiro deste material. Considerando as diversas possibilidades de reciclagem e produção de renda por meio dessa atividade, temos que a destinação inadequada de resíduos sólidos urbanos deve ser encarada como uma prática extremamente danosa, geradora de grande prejuízo para o País.

Ainda, mesmo com a legislação mais restritiva, o conjunto de índices apresentados reflete a carência de recursos aplicados ao setor limpeza urbana no Brasil, que em 2013 foi aproximadamente R\$ 10,00 por habitante por mês para todos os serviços de limpeza urbana (varrição de vias, coleta, transporte, destinação). Esse quadro agrava ainda mais os problemas expostos e distancia a efetividade da Lei 12.305/2010, já que as mudanças demandadas por essa política requerem investimentos concretos que dependem de sustentabilidade econômica.

Aliado ao problema exposto, temos que os estímulos por parte das autoridades em relação à reciclagem e à coleta seletiva foram também escassos, repercutindo em índices limitados para essas atividades, que mesmo com o esforço da população e entidades privadas, avançaram pouco nos últimos anos, mostrando que o modelo desenvolvido até agora no País precisa ter maiores investimentos.

Por fim, tendo por base os dados apresentados nesse capítulo, é possível verificar que o Brasil apresenta evolução bastante lenta tanto no que diz respeito à implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, de 2010, quanto para o estabelecimento de uma gestão de resíduos sólidos eficaz e sustentável. Vê-se, portanto, a necessidade de desenvolvimento de uma nova estratégia, de forma a otimizar o aproveitamento dos recursos existentes nos materiais descartados.

2.2. Incineração

2.2.1. Estado da Arte da Tecnologia de Incineração

No passado, o principal objetivo da tecnologia de incineração resumia-se na redução da massa, do volume, e da periculosidade dos resíduos. Atualmente, além destes mesmos objetivos, e que podem resultar em redução superior a 90%, a tecnologia de Incineração se apropria do poder calorífico dos resíduos de natureza combustível, e propicia o aproveitamento da energia térmica decorrente do próprio processo de combustão. (Menezes, 2000)

A tecnologia de Incineração hoje empregada no mundo incorpora além dos mecanismos de aproveitamento da energia térmica, o desenvolvimento de sistemas de tratamento e depuração de gases, capazes de controlar, significativamente, a emissão de poluentes atmosféricos, e satisfazer, em geral, aos padrões ambientais de emissão vigentes.

Em função da tecnologia de Incineração inicialmente empregada no mundo, a partir do início do século passado, não contemplar o controle da emissão de gases poluentes, problemas ambientais relacionados à poluição do ar foram de fato a ela associados, influenciando, negativamente, seu maior desenvolvimento. Observa-se que em todo o mundo, e inclusive no Brasil, o imaginário popular sobre a tecnologia de Incineração sempre a associou, e continua a associando a uma fonte de emissão de gases poluentes.

Processos de licenciamento ambiental de unidades de processamento térmico de RSU se dedicam principalmente a assegurar o rigoroso controle das emissões atmosféricas. O desenvolvimento mais recente da tecnologia, incluindo a modernização dos sistemas de controle e tratamento de gases poluentes, promoveu ambiente para a maior aceitabilidade de unidades de Incineração baseadas em

tecnologia Waste-to-Energy (WtE); atualmente são diversos os países que a utilizam como solução para a disposição final e de aproveitamento energético de RSU (Henriques, 2004).

A viabilidade do emprego da tecnologia de Incineração WtE depende da compreensão de que a mesma se constitui em opção para a solução de problemas ambientais associados ao destino final dos RSU, e não, contrariamente, e de forma irreversível, se constitui em uma fonte de outros problemas ambientais. Além de aspectos ambientais e econômicos, outras questões sociais, culturais e políticos-institucionais são também determinantes no processo de decisão pela adoção de uma dada solução tecnológica, e no caso dos RSU não é diferente (Mavropoulos, 2012).

Obviamente, a tendência mundial de crescimento populacional e, analogamente, de crescimento do volume de RSU, requererá a consolidação de tecnologia capaz de viabilizar técnica e economicamente, e de forma ambientalmente sustentável, uma efetiva solução para a disposição final dos RSU. A tendência de ênfase à aplicação da escala hierárquica do modelo de Gestão Integral de Resíduos Sólidos (GIRS), e que contempla a redução da geração, o incremento da reciclagem de materiais e a restrição do emprego de aterros sanitários, implicará no contínuo desenvolvimento de soluções tecnológicas WtE, e dentre estas, desponta o processamento térmico de RSU. (Mavropoulos, 2012)

Pode-se afirmar que a incineração de RSU com base em tecnologia WtE é consistente com os objetivos e diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos, uma vez que além de satisfazer os critérios de emissão atmosférica vigentes, a otimização do processo depende de adequada triagem e prévia separação de resíduos não combustíveis, possibilitando o desenvolvimento de toda a cadeia de coleta seletiva, e que inclui a geração de empregos diretos e indiretos.

O processo de incineração depende da manutenção de elevada temperatura em fornos, que na presença de oxigênio em excesso, é capaz de promover a queima de resíduos combustíveis. A incineração promove a geração de cinzas inertes, isentas de matéria orgânica e inorgânica combustível, como resíduo do processo. A tecnologia de incineração atualmente contempla processos baseados em técnicas do tipo *Mass Burning* e *Refuse-derived Fuel*, e em reatores de incineração do tipo Grelha e Leito Fluidizado.

2.2.2. Contexto Mundial e Nacional

O primeiro incinerador de RSU, construído em 1876 em Manchester, na Inglaterra, foi operado por aproximadamente 27 anos. Somente após a 2ª Guerra Mundial, é que se observa o significativo aumento do emprego da tecnologia de Incineração, e desde então, somente visava a redução mássica e volumétrica dos resíduos. Pode-se afirmar que as instalações anteriores a 1950 caracterizavam-se como em estágio de evolução incipiente e ainda primário, se comparadas às plantas instaladas a partir de 1950 (Henriques, 2004).

Neste contexto, a evolução da tecnologia pode ser classificada segundo 4 períodos distintos, compreendidos entre os anos de 1950 e 1965, 1965 e 1975, 1975 e 1990, e 1990 aos dias atuais (Henriques, 2004).

Na primeira fase, entre 1950 e 1965, a tecnologia de Incineração ainda somente visava a redução do volume de resíduos, sem qualquer preocupação em relação ao controle das emissões de gases poluentes. Enquanto sistemas mais modernos atualmente atingem concentrações de até $3\text{mg}/\text{Nm}^3$, a poeira gerada pela tecnologia da época era capaz de alcançar valores de até $1000\text{mg}/\text{Nm}^3$. As principais unidades de Incineração instaladas durante esta fase foram as usinas de Lausanne (1959), Berna (1954), e Bruxelas (1957). (Henriques, 2004)

Durante os anos 60 e 70, se observa o largo desenvolvimento da aplicação da tecnologia, e no período compreendido entre os anos de 1965 e 1975 é que a mesma passa a incorporar os primeiros sistemas de controle de gases poluentes, capazes de limitar emissões atmosféricas segundo concentrações da ordem de $100\text{mg}/\text{Nm}^3$. Este período também é caracterizado pelo desenvolvimento dos incineradores de câmara dupla, dos sistemas tipo grelha, e dos primeiros estudos relacionados ao potencial de aproveitamento da energia térmica gerada pelo processo. (Henriques, 2004)

Entre 1975 e 1990, a tecnologia é caracterizada pelo impulso ao desenvolvimento de sua eficiência energética e pelo cerceamento de restrições ambientais relacionadas à emissão de gases poluentes. Os problemas de poluição começam a ganhar mais atenção do público. EUA, Japão e países europeus estabelecem rigorosos requisitos no âmbito da legislação ambiental, obrigando a adequação das instalações existentes, que quando inviável técnica ou economicamente, levou inúmeras plantas de incineração em desconformidade ao encerramento de suas atividades. Neste contexto, desenvolve-se tecnologia mais

complexa para o tratamento de gases ácidos e a neutralização de HCl, SO_x, HF e metais pesados. As caldeiras sofrem processos de melhoria, assim como o processo de combustão de constituintes orgânicos. As plantas são também equipadas com tecnologia de instrumentação, automação e controle. A cogeração de energia térmica e elétrica a partir do processamento de RSU passa a ser difundida como opção sustentável de geração de energia renovável. (Henriques, 2004)

A partir de 1990, por exigência de setores organizados da sociedade, é ampliado o rigor do controle das emissões atmosféricas, estabelecendo-se como meta a “emissão zero”. Surge a maior atenção sobre a emissão de NO_x, furanos e dioxinas, o que passa a requerer o desenvolvimento de tecnologias de tratamento cada vez mais avançadas. Por outro lado, observa-se também a preocupação em relação à qualidade dos resíduos finais da incineração, de forma que cinzas inertes possam ser, de forma segura, recicladas ou dispostas no ambiente. A sofisticação da tecnologia de incineração passa envolver as etapas de pré-tratamento dos RSU, visando sua melhor homogeneização e redução de umidade, e por conseguinte, o aumento do poder calorífico para a geração de energia. Os reatores de combustão contemplam a sofisticação no sentido do melhoramento dos sistemas de turbilhonamento, secagem, ignição e controle da combustão. (Henriques, 2004)

No contexto Waste-to-Energy (WtE), os processos de recuperação energética a partir dos RSU são atualmente bem estabelecidos, promovendo anualmente o processamento de mais de 100 milhões de toneladas, através de mais de 550 instalações em todo o mundo.

Na União Europeia, mais de 20% dos RSU são destinados a plantas de incineração WtE, sendo desta mesma forma processados na Holanda, Suíça e Dinamarca mais de 40% dos resíduos gerados. No Japão, este valor se eleva para 79%, projetando-se que a partir de 2010 sejam gerados 4.170 MW de energia a partir do processamento de RSU. Nos EUA, 13% da totalidade de RSU é processada em plantas de Incineração WtE. A Tabela 2 resume a distribuição das instalações de Incineração WtE no mundo. (Riscado *et al.*, 2010)

Tabela 2 - Distribuição das instalações de incineração WtE no mundo

País/Região	Instalações em Operação	Capacidade (10 ⁶ t/ano)	Potencia Instalada (MW)
União Europeia	301	50,2	8.800 MW: 30% Elétrica e 70% Térmica
Japão	189	39	847 MW: Elétrica e Térmica
EUA	98	29,4	2.760 MW: 90% Elétrica e 10% Térmica

(Adaptado de Riscado *et al.*, 2010)

Em relação ao início da década passada, a Tabela 3 indica a estimativa da capacidade instalada da tecnologia de Incineração WtE na Europa, totalizando valor superior a 40 milhões t/ano, e a geração elétrica e térmica, de respectivamente, 41 e 110 milhões GJ (Themelis, 2004).

Tabela 3 - Capacidade instalada da tecnologia de incineração WtE na Europa

País	Capacidade (10 ³ t/ano)	Energia Térmica (GJ)	Energia Elétrica (GJ)
AUSTRIA	450	3.053.000	131.000
DINAMARCA	2.562	10.543.000	3.472.000
FRANÇA	10.984	32.303.000	2.164.000
ALEMANHA	12.853	27.190.000	12.042.000
HUNGRIA	352	2.000	399.000
ITALIA	2.169	3.354.000	2.338.000
HOLANDA	4.818		9.130.000
NORUEGA	220	1.409.000	27.000
PORTUGAL	322	1.000	558.000
ESPAÑA	1.039		1.934.000
SUÉCIA	2.005	22.996.000	4.360.000
SUÍÇA	1.636	8.698.000	2.311.000
REINO UNIDO	1.074	1.000	1.895.000
TOTAL	40.484	109.550.000	40.761.000

(Adaptado de Themelis, 2004)

O gráfico da Figura 7 consolida para diferentes países do mundo, a quantidade de usinas de Incineração WtE cujas informações e indicadores principais foram objeto de levantamento realizado no âmbito do presente trabalho (apresentado no Anexo I), e que contempla o local de instalação da usina, operador, potência de geração de energia, início de operação, tipo de resíduos processados, fabricante da tecnologia, capacidade nominal da usina, e tipo de tecnologia aplicada. (Idustcards, 2013)

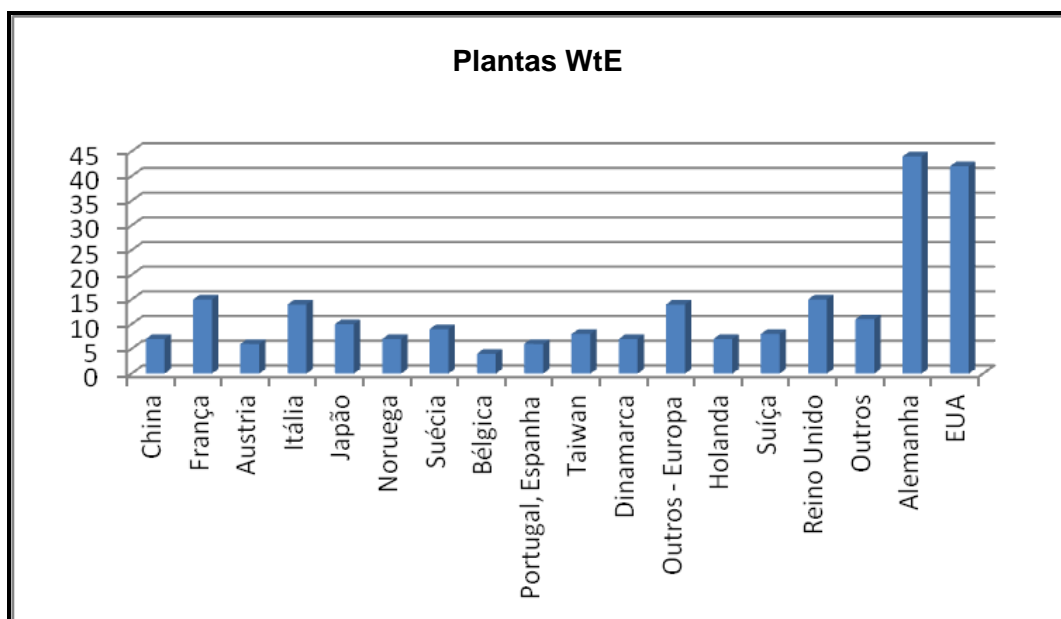


Figura 7 - Quantidade de usinas de Incineração

Das informações e indicadores obtidos deste universo de unidades, pode-se destacar que:

- A maioria das unidades encontra-se em países da Europa, aonde totalizam a geração de 3.051 MW de energia;
- O levantamento contempla informações de mais 40 instalações de Incineração WtE existentes nos EUA, aonde totalizam a geração de 1.541 MW; outros países são responsáveis pela geração de 727 MW;
- A maioria da totalidade das instalações apresenta capacidade de processamento inferior a 1.500 t/d e potencial de geração de energia inferior a 40 MW;

- Grande parte das instalações emprega a tecnologia de Incineração WtE baseada em sistema de grelhas, e sistemas de tratamento de gases baseados em lavadores químicos e precipitadores eletrostáticos;
- Dentre as unidades cadastradas, a de maior potência instalada - 124 MW, encontra-se implantada nos EUA; instalações de muito pequeno porte – de até 1 MW, foram também cadastradas.

Baseada neste mesmo universo, e considerando aquelas usinas cujas informações encontravam-se disponíveis, o gráfico da Figura 8 relaciona a capacidade de processamento instalada (t/d) ao potencial de geração de energia (MW) que estas usinas apresentam.

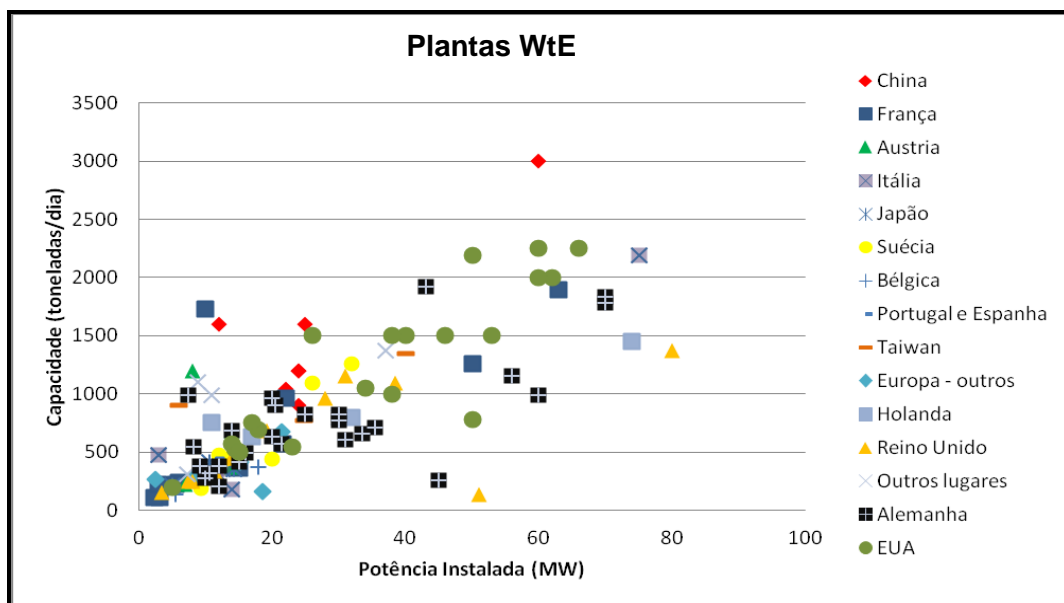


Figura 8 - Capacidade de processamento (t/d) e potencial de geração de energia (MW)

Como anteriormente mencionado, a eficiência de geração de energia a partir do processamento de RSU em plantas de incineração é muito variável e o grau de incerteza sobre estes valores pode ser atribuído às variações regionais da quantidade e composição dos resíduos, bem como à tipologia da tecnologia e às condições de operação do processo. Themelis (2004) estima que esta eficiência possa alcançar até 65 kW/ (t/dia) de resíduo processado. Os resultados que expressam o gráfico da Figura 8 indicam que para o universo de usinas analisadas, a eficiência de geração de

energia da tecnologia por elas empregadas encontra-se compreendida entre 25 e 60 kW/(t/dia) de resíduo processado.

No Brasil, o primeiro incinerador de RSU foi instalado em 1896, em Manaus. O equipamento possuía capacidade de processamento da ordem de 60 t/d, tendo sido desativado por problemas de manutenção, 62 anos após sua instalação. Em Belém, outra unidade com características similares, foi pelo mesmo motivo, também desativado em 1978 (Henriques, 2004).

Em 1913, em São Paulo, tem-se o registro da instalação de um incinerador com capacidade de processamento de 40 t/d, alimentado manualmente, e tendo lenha como combustível primário. Devido à limitação de sua capacidade de processamento para atendimento a quantidade de RSU coletados, e por sua desfavorável localização, a unidade foi desativada em 1948 (Henriques, 2004).

Em 1949, outro incinerador com capacidade de 200t/dia foi instalado no bairro em Pinheiros, São Paulo. Com tecnologia americana baseada em regime de batelada, a unidade era dotada de sistema rotativo vertical para a homogeneização dos resíduos. Atualmente desativado, este incinerador foi operado por cerca de 40 anos. Outros dois incineradores com capacidade de 300 t/d foram instalados também na cidade de São Paulo, em Ponte Pequena e Vergueiro, respectivamente em 1959 e em 1968. Todas estas instalações não foram capazes de atender aos padrões ambientais impostos pela legislação vigente, e desde o ano 2000, encontram-se também desativadas. (Henriques, 2004).

Já no Rio de Janeiro, a partir de 1950, observa-se a proliferação do emprego de incineradores residenciais, principalmente em edificações mais altas, e de vários andares, como solução descentralizada para a destinação final dos resíduos sólidos. Cerca de 20 anos depois, com o desenvolvimento do sistema de coleta pública municipal de RSU e restrições ambientais devido a emissão difusa de gases poluentes, sem qualquer tipo de controle, este modelo foi abolido (Henriques, 2004).

Por outro lado, incineradores para o processamento de resíduos hospitalares, aeroportuários e industriais, foram também objeto de implantação no País a partir de 1970. Uma grande quantidade de incineradores de porte muito pequeno e com baixa capacidade de processamento, inferior a 100 kg/hora, foram instalados em estabelecimentos e serviços de saúde no País, para o processamento dos resíduos hospitalares. A grande maioria destes encontra-se desativada ou é operada mediante

elevadas emissões de poluentes atmosféricos e em desconformidade com a legislação ambiental.

Já em 1994, por iniciativa da administração da cidade de São Paulo, projeto previa a construção de dois grandes incineradores, com capacidade de processamento de 2.500 t/d cada. Dificuldades diversas ocorreram no sentido de sua viabilidade técnica e econômica, destacando-se a indefinição quanto às fontes e o valor de remuneração dos serviços prestados e à oferta de garantias ao empreendedor pela concessão de serviços de longo prazo, bem como a forte pressão contrária exercida por parte da opinião pública, baseada em receio quanto aos impactos ambientais do projeto (Henriques, 2004). A Tabela 6 resume as principais informações e características de unidades de incineração em operação no País.

Tabela 4 - Principais informações e características de unidades de incineração em operação no País

Planta	Tecnologia	Tipo	Capacidade (t/ano)	Tipos e Características dos Resíduos	Tratamento dos gases	Destino final das cinzas
BASF Guaratinguetá SP	Inter-Uhde	Rotativo	2.700	Sólido, líquido, pastoso Exceto ascarel	Lavadores ácido e alcalino O ₂ , CO e SO _x	Aterro industrial terceirizado
BAYER Berfort Roxo RJ	Inter-Uhde	Rotativo	3.200	Sólido, líquido, pastoso Inclui Difenilas	Lavadores ácido e alcalino O ₂ , CO	Aterro industrial próprio
CETREL Camaçari BA	Sulzer	Rotativo	10.000	Líquidos organoclorados	Lavadores ácido e alcalino O ₂ , CO ₂ e NO _x	Aterro industrial próprio
CETREL Camaçari BA	Andersen	Rotativo	4.500	Sólidos Classe I	Coletor ciclone + Lavadores ácido e alcalino CO, O ₂ , CO ₂ , NO _x , SO ₂	Aterro industrial próprio
CIBA Taboão da Serra SP	Inter-Uhde	Rotativo	3.200	Org. e Inorgânicos Exceto ascarel	Coletor ciclone + Lavadores ácido e alcalino NO _x , SO _x , O ₂ , CO, MP	Aterro industrial próprio
CINAL Mal. Deodoro AL	CBC/Nittetu	Câmara horizontal	11.500	Sólido, líquido, pastoso Inclui PCBs e organoclorados	Lavadores ácido e alcalino CO, CO ₂ , O ₂ , NO _x , SO _x , MP	Aterro industrial próprio
CLARIANT Suzano SP	Inter-Uhde	Rotativo	2.700	Sólido e pastoso	Lavadores ácido e alcalino CO, CO ₂ , O ₂ , NO _x , SO _x , MP	Aterro industrial terceirizado
ELLILLT Cosmópolis SP	Inter-Uhde	Rotativo	10.400	Sólido, líquido, pastoso	Lavadores ácido e alcalino O ₂ , CO, CO ₂	Aterro industrial próprio
KOMPAX Fortaleza CE	Kompac	Câmara horizontal	10.950	Serviços de saúde e industriais	Lavadores ácido e alcalino CO ₂ , CO, O ₂ , SO ₂ , NO _x , HCl, Cl ₂	Aterro industrial
RHODIA Cubatão SP	Rhone-Poulanc	Rotativo	18.000	Sólido, líquido, pastoso Inclui organoclorados	Lavadores ácido e alcalino O ₂ , CO, CO ₂ , NO _x	Aterro industrial
SILCON Paulínea SP	Hoval	Leito fixo pirolítico	3.600	Serviços de saúde	Lavadores ácido e alcalino O ₂ , CO, CO ₂ , NO _x	Aterro industrial

(Adaptado de IPM, 2002)

Hoje em operação no Brasil, a USINAVERDE desenvolve tecnologia para a implantação de Usinas de Recuperação Energética de resíduos sólidos urbanos. Situada no Campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) da Ilha do Fundão, essa empresa de capital privado tem como objetivo a consolidação e aplicação da tecnologia em conjunto com agentes interessados na implantação da incineração como solução ambiental.

Atualmente, o Centro Tecnológico da USINAVERDE tem capacidade nominal para tratar 30 toneladas por dia de resíduos com geração de energia elétrica. Este Centro opera como uma Usina Modelo, apresentando seus processos para interessados na replicação das Usinas de Recuperação Energética e, deste trabalho, já podem ser destacadas diversas melhorias como:

- “Novos equipamentos e processos que representaram uma expressiva melhoria de eficiência energética;
- Novos equipamentos e processos que reduziram o espaço necessário à instalação da URE;
- Comprovação de atendimento de emissões de gases de combustão abaixo dos limites mais rígidos do mundo, compatível com normas europeias e americanas;
- Histórico de operação que permite a eficiente e econômica gestão de manutenção e desgaste de materiais submetidos aos resíduos brasileiros.” (USINAVERDE, 2014)

2.2.3. Tecnologias de Incineração

A incineração utiliza-se de processos que geram elevadas temperaturas quando da queima de RSU combustíveis em fornos na presença de oxigênio em excesso. Tem-se a geração de cinzas (materiais inorgânicos), com algum material carbonáceo residual como principal resíduo do processo.

Atualmente, as técnicas de incineração mais utilizadas são o *Mass Burning* e o *Refuse-derived Fuel*. Na modalidade *Mass Burning*, os resíduos são incinerados de forma bruta, sem qualquer pré-tratamento, excetuando a remoção de partes de grandes dimensões. Por outro lado, na modalidade *Refuse-derived Fuel*, os resíduos

são previamente processados, de forma a remover materiais recicláveis e minimizar a heterogeneidade da massa a ser efetivamente incinerada. Por não requerer a etapa prévia de processamento, a técnica *Mass Burning* é a mais frequentemente utilizada.

A tecnologia de incineração apresenta como principais características operacionais a pressão de trabalho, em torno de 50 bar; a elevada temperatura, superior a 450°C; e o rendimento limitado a 25%. O processo de combustão pode ser otimizado a partir do controle dos seguintes três fatores: temperatura, turbulência e tempo de detenção.

Desde a introdução dos resíduos no incinerador, e em função do tipo de sistema utilizado, a massa em combustão é sujeita a diversas temperaturas. Em um primeiro momento, ao ser lançado no compartimento de acesso ao incinerador, sob temperatura da ordem de 100°C, inicia-se o processo de perda de umidade por mecanismos de radiação ou convecção. Ainda antes de alcançar a câmara de combustão propriamente dita, sob baixa pressão atmosférica e temperatura da ordem de 250°C, inicia-se o processo de volatilização. Já na câmara de combustão, sob temperatura compreendida entre 600°C e 1.300°C e razão entre ar e resíduo entre 1,5 e 2,0 é que ocorre a completa oxidação.

A velocidade de transição entre estas fases é função da composição e do poder calorífico dos resíduos em combustão. A Figura 9, seguinte, ilustra a composição requerida para a combustão espontânea da massa de resíduos, baseada somente no potencial combustível que apresenta, sem a necessidade de uso de fonte externa e adicional de energia após atingida a temperatura de processo. A composição padrão do RSU europeu apresenta 35% de material combustível, 30 % de cinzas e 35% de água, resultando em poder calorífico da ordem de 6.0 MJ/kg (Bilitewski *et al.*, 1997).

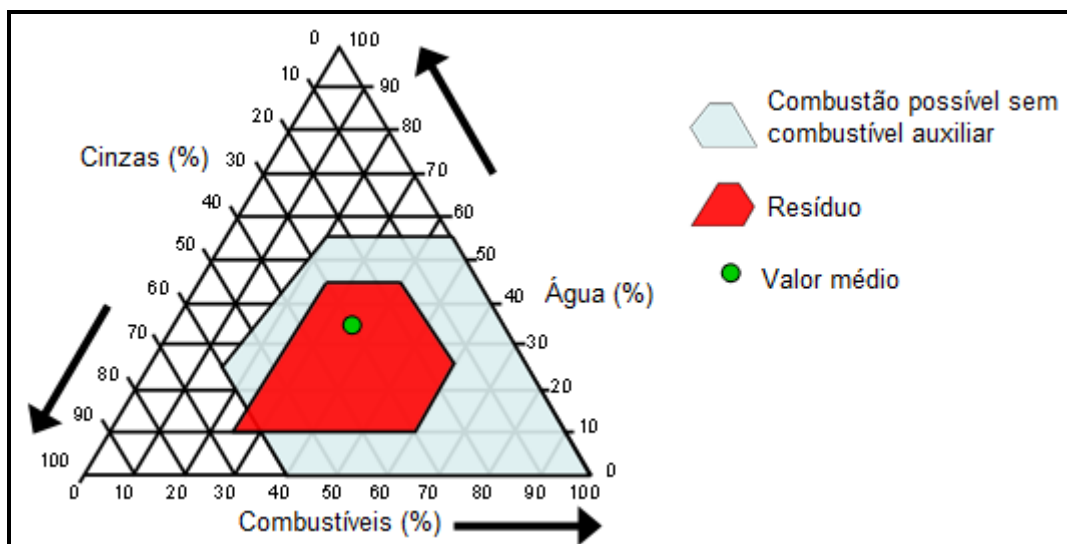


Figura 9 - Composição requerida para a combustão espontânea da massa de resíduos (Adaptado de WtERT, 2013)

Embora toda parte orgânica não reciclável dos RSU seja fonte combustível para incineração, poderá o poder calorífico da massa em combustão mostrar-se insuficiente, requerendo, eventualmente, a injeção de combustíveis auxiliares, tais como GLP, gás natural ou óleo diesel. Em geral, este auxílio faz-se necessário no momento da partida do incinerador (Henriques, 2004).

Materiais e parâmetros utilizados tanto no projeto como também na construção do incinerador – como queimadores, sopradores, material refratário, isolante térmico, interface refratário-aço, e a sincronia entre as câmaras – também são pontos primordiais para minimizar a quantidade de combustível auxiliar necessária a ser utilizada. Existem hoje no mercado, incineradores com baixo teor de emissões, alta eficiência de queima e baixo consumo de combustível.

Em geral, a tecnologia de incineração WtE é constituída por unidades modulares de duplo estágio. No caso, a massa bruta de RSU é introduzida na câmara primária e na qual ocorre, de forma efetiva, o processo de combustão. Mediante elevada temperatura, compreendida entre 500°C e 900°C, obtém-se nesta primeira câmara, a volatilização de alguns compostos e a transformação dos resíduos não volatilizados em partículas de tamanho muito diminuto.

De forma a evitar gradientes de temperatura muito elevados, capazes de também induzir a volatilização de grandes quantidades de metais contidos nos resíduos em combustão, mantém-se rigoroso controle da oferta e disponibilidade de

oxigênio livre no processo. Em geral, nesta primeira etapa, o tempo de residência do processo é da ordem de 30 minutos (Henriques, 2004).

O sistema de ar primário pré-aquecido é injetado através do compartimento inferior da caldeira, propiciando a mistura e a ignição do resíduo combustível. O fornecimento equilibrado de ar primário à câmara de combustão contribui para a queima controlada dos resíduos sem a emissão de compostos voláteis poluentes, e para a manutenção do equilíbrio térmico da caldeira.

Toda a fase gasosa gerada nesta câmara primária, sob temperatura mínima de 850°C, é então encaminhada para a câmara secundária, na qual ocorre, de forma complementar, a queima da mistura entre partículas remanescentes da queima, dióxido de carbono, água e cinzas. Esta 2ª etapa é operada mediante temperatura ainda mais elevada, compreendida entre 750°C e 1250°C, com tempo de residência muito curto. Nesta 2ª câmara, ocorre a oferta e a disponibilidade de oxigênio em excesso, de forma a propiciar atmosfera extremamente oxidante, e a sobre-elevação da temperatura (Henriques, 2004).

O ar secundário é, de forma complementar, responsável pela queima da mistura de partículas remanescentes da combustão e gases então gerados. A relação entre a vazão de ar primário pré-aquecido e de ar secundário quente recuperado do próprio processo tende a ser da ordem de 2/3 (Yin *et al.*, 2008).

A tecnologia de Incineração WtE contempla a conexão de uma série de outras unidades e equipamentos aos reatores de combustão, no sentido de promover a recuperação do calor então liberado pelo processo de queima. Os sistemas de incineração mais empregados atualmente para combustão de RSU são do tipo Grelhas e o do tipo Leito Fluidizado.

A quantidade de material resultante do processo de queima, quando comparada à quantidade original de resíduos, corresponde valores compreendidos entre 12% e 30% em termos de massa e 4% e 10% em termos volumétricos. As cinzas resultantes do processo podem ainda ser processadas no sentido da recuperação de materiais principalmente ferrosos. Como destino final, podem ser empregadas como material agregado em formulações de cimento.

As partículas mais finas presentes em suspensão nos gases exauridos da câmara de combustão são retidas no sistema de tratamento de gases, por tecnologia de separação por filtração ou por precipitação eletrostática (Henriques, 2004).

2.2.3.1. Sistema de Grelhas

A tecnologia de incineração desenvolveu-se a partir dos incineradores do tipo grelha. Este sistema é constituído por 4 compartimentos principais: recepção de resíduos e alimentação do incinerador, câmara de combustão (grelha), sistema de ar, e sistema de descarte de cinzas (Yin *et al.*, 2008). O sistema opera na modalidade *Mass Burning*, sendo os resíduos incinerados de forma bruta, sem qualquer pré-tratamento, excetuando a remoção de partes de grande dimensão.

Por um sistema de acionamento mecânico, os resíduos são introduzidos no incinerador pela parte inferior da câmara de combustão. Logo imediatamente e sujeitas ao fluxo forçado de ar ascendente, as partículas de menor dimensão entram em combustão na própria atmosfera da fornalha, enquanto as partículas de maior dimensão se depositam na superfície da grelha, onde são também queimadas (Yin *et al.*, 2008).

O sistema de grelha pode ser do tipo inclinado e fixo, favorecendo a sucessiva exposição dos resíduos ao ambiente térmico, mediante o deslizamento gravitacional dos mesmos, desde o ponto de entrada na câmara de combustão, até o compartimento de recolhimento das cinzas (*ash pit*).

Já os sistemas móveis contam com estrutura mecânica capaz de promover o transporte dos resíduos, também desde o ponto de entrada na câmara de combustão, até o compartimento de recolhimento das cinzas. Neste contexto, destacam-se os sistemas do tipo grelha móvel (*traveling grate*, (a)), de sentido único de movimentação dos dispositivos mecânicos; o sistema *counter direction push over grate* (b), que promove a movimentação alternada e em 2 sentidos; o sistema *reciprocating grate* (c), cuja movimentação dos dispositivos mecânicos ocorre em sentido contrário à movimentação da massa de resíduos em combustão, propiciando eficiente grau de mistura e de acumulação de cinzas. A tecnologia conta ainda com os sistemas do tipo grelha vibratória e do tipo tambor rotativo. A Figura 10 ilustra desenhos esquemáticos dos diversos modelos de sistemas de grelhas (Bilitewski *et al.*, 1997).

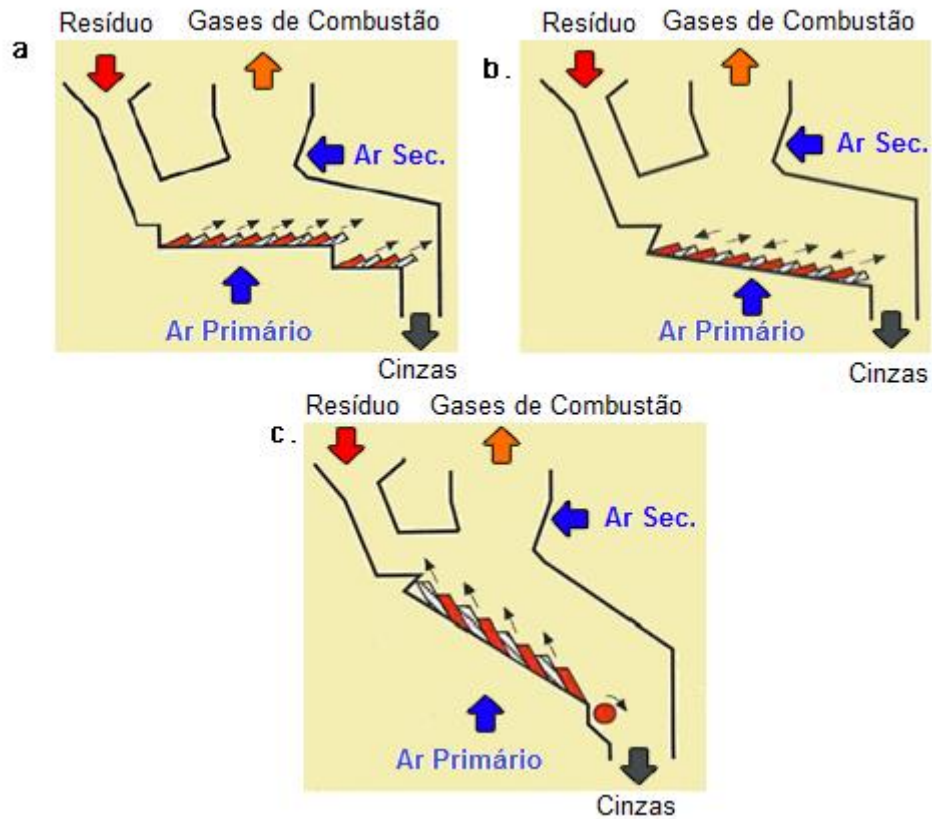


Figura 10 - Modelos de sistemas de grelhas (Adaptado de Bilitewski et al., 1997)

O sistema de grelha é capaz de processar resíduos combustíveis de tamanho e forma heterogênea, contendo maior ou menor teor de umidade. Por não promover a intensa mistura do material em combustão, o processo pode apresentar transientes de instabilidade, e que podem ser compensados, mediante controle do sistema de ar secundário.

2.2.3.2. Sistema de Leito Fluidizado

Em reatores de leito fluidizado, material sólido granulado e inerte, tal como areia, calcário ou alumina, é mantido em suspensão no ambiente de combustão, sob condições turbulentas, por meio da injeção de jato de ar ascendente. A eficiente transferência de calor para a massa de resíduos em combustão é garantida pelo calor emitido a partir do próprio leito aquecido de material sólido granulado. A turbulência que a injeção de ar promove no ambiente impõe condições ideais de mistura no interior da câmara de combustão.

Incineradores do tipo leito fluidizado que operam sob excesso de ar compreendido entre 30 e 40%, e sob temperatura entre 750 e 850°C, mostram-se energeticamente mais eficientes que o sistema de grelhas (Bontoux, 1999).

São três os tipos principais de incineradores de leito fluidizado: *bubbling*, *rotating* e *circulating*. No tipo *bubbling*, o leito fluidizado permanece em estado praticamente estacionário no fundo da câmara de combustão. O ar primário, fornecido através de um distribuidor na parte inferior da caldeira, mantém as partículas em suspensão mediante velocidade de “fluidização” compreendida entre 0,5 e 3,0 m/s. Neste modelo, o pré-tratamento dos resíduos é condição fundamental para a garantia da adequada fluidização dos resíduos (Van Caneghem *et al.*, 2012).

No tipo *rotating*, a distribuição não uniforme do ar primário promove o estabelecimento de zonas de maior e menor turbulência, impondo melhores condições de mistura. Neste modelo, a tecnologia admite o processamento de resíduos de diferentes tamanhos, sem a necessidade de tão rigorosa etapa de pré-tratamento.

Já no tipo *circulating*, velocidades mais elevadas e da ordem de 3,0 a 9,0 m/s impõem a contínua expulsão das partículas para o exterior da câmara de combustão, de onde, separadas por um ciclone externo, retornam novamente ao fundo da câmara de combustão (Van Caneghem *et al.*, 2012). O desenho esquemático da Figura 11 ilustra um incinerador de leito fluidizado do tipo *circulating*.

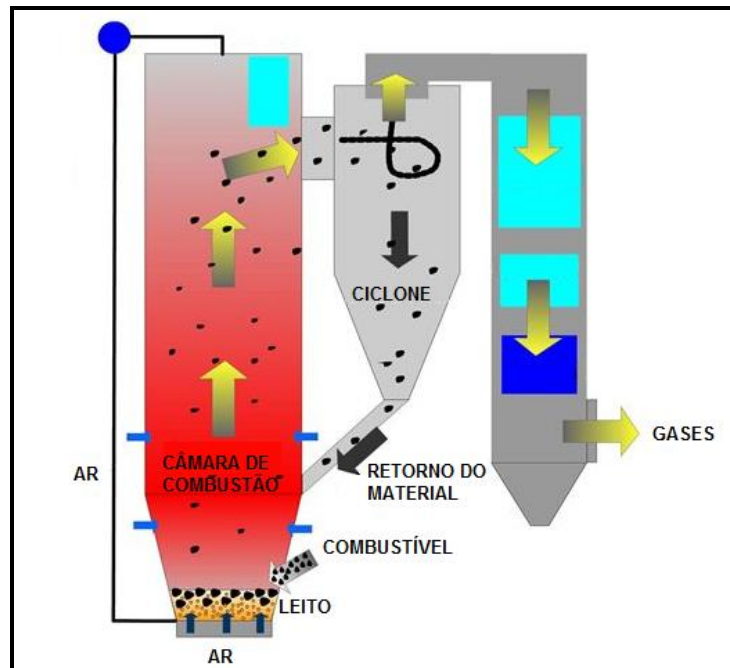


Figura 11 - Incinerador de leito fluidizado do tipo *circulating* (Adaptado de Van Caneghem *et al.*, 2012).

Dentre as vantagens dos incineradores de leito fluidizado, pode-se destacar a adaptabilidade a uma vasta variedade de tipos de resíduos, incluindo aqueles com maior teor de umidade e menor poder calorífico. Elevadas taxas de combustão são alcançadas em função da ação erosiva do material do leito e consequente exposição de menores partículas ao ambiente, e em função da maior e melhor exposição das mesmas devido à turbulência do leito fluidizado. A tecnologia assegura a completa e uniforme combustão dos resíduos, com mínima geração de carvão (*char*) nas cinzas (Van Caneghem *et al.*, 2012).

A tecnologia opera na modalidade *Refuse-derived Fuel*, a qual requer o processamento prévio dos resíduos, no sentido de minimizar a heterogeneidade da massa a ser efetivamente incinerada; de reduzir o tamanho dos sólidos presentes na massa bruta; de remover metais alcalinos com potencial de corrosão e incrustação, e de remover cinzas originalmente presentes em resíduos com alto teor de formação de cinzas.

2.2.4. Tecnologia de Recuperação Energética

O aproveitamento energético de resíduos por meio de processos térmicos se dá, principalmente, por meio da utilização de turbinas a vapor. São diversos os conceitos termodinâmicos necessários ao amplo entendimento da tecnologia de aproveitamento da energia térmica proveniente da combustão de RSU. Dentre estes, merecem inicial atenção os princípios em que se baseia o ciclo de Rankine.

O ciclo termodinâmico de Rankine expressa a conversão da energia térmica (Q) em trabalho mecânico (W). Como fonte externa de energia (Q_{in}), o calor é fornecido a um sistema hidráulico cujo circuito utiliza a água na forma de vapor para a conversão da energia em trabalho mecânico. Este sistema é o que induz o funcionamento dos motores a vapor, sendo responsável por grande parte da energia elétrica produzida no mundo. Os 2 tipos mais comuns de geração de energia que utilizam os princípios do Ciclo Rankine são a fissão nuclear e a queima de combustíveis fósseis, como o carvão, gás natural e petróleo. (Henriques, 2004).

O sistema de aproveitamento energético é constituído por quatro componentes principais: a caldeira ou *boiler*, aonde a água armazenada é aquecida e vaporizada a partir do calor proveniente da combustão dos resíduos; a turbina, que utiliza a pressão do vapor gerado na caldeira, para produzir energia mecânica; o condensador, aonde ocorre o resfriamento e a condensação do vapor efluente da turbina; e o sistema de bombeamento responsável pela circulação de água através de todo o sistema (Logan, E., 1999)

O desenho esquemático da Figura 12 ilustra as principais etapas que compõem o Ciclo de Rankine. A energia térmica proveniente da combustão é transmitida à água, por meio da circulação do gás quente através de tubulação de água inserida no interior da caldeira (2). A alta temperatura atingida pela água, a transforma em vapor de elevada temperatura e pressão, que se expande no interior da turbina (3), promovendo a geração de energia elétrica. Após o vapor sair da turbina com pressão menor, sua condensação é promovida por sistema de refrigeração à água (4), retornando a água ao estado líquido inicial, que, por um sistema de bombeamento (1), é dirigido à caldeira.

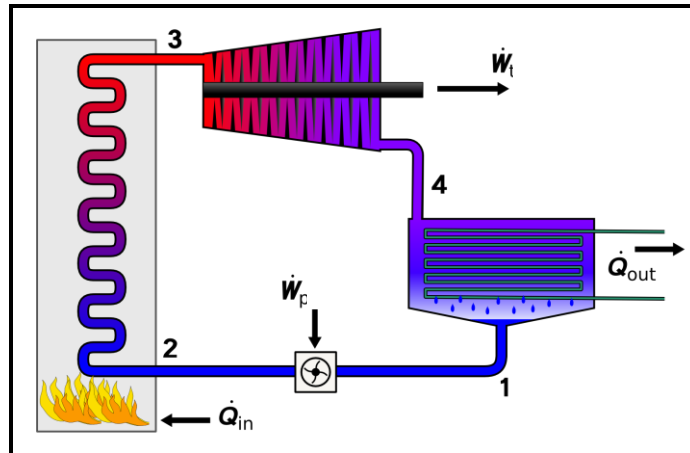


Figura 12 - Estrutura das unidades que compõem o Ciclo de Rankine (Adaptado de WP, 2014)

É pertinente mencionar que durante a operação do sistema a eficiência da caldeira deve ser monitorada constantemente, de forma a manter um alto rendimento e evitar perdas de calor. Dentre as perdas existentes em uma caldeira pode-se citar às associadas ao combustível nas cinzas de fundo, à radiação e convecção e à ineficiência da combustão.

O diagrama tipo T-S expressa a relação entre a temperatura e a entropia. Utilizada como ferramenta para estudos termodinâmicos, o diagrama facilita a percepção entre variações de temperatura e exata entropia durante um processo ou ciclo termodinâmico.

De acordo com a 2ª. Lei da Termodinâmica, trabalho pode ser completamente convertido em calor, e por tal em energia térmica; porém, energia térmica não pode ser integralmente convertida em trabalho. Assim é que a entropia simboliza o grau de irreversibilidade de um sistema, e representa a quantidade de energia que não pode mais ser transformada em trabalho.

Em equilíbrio termodinâmico, a parcela de energia interna de um sistema que não pode mais ser convertida em trabalho é determinada pelo produto da entropia S pela temperatura absoluta T , e desta forma, somente a parcela $F = U - T.S$ da energia interna U disponível pode ser convertida em trabalho. Portanto, a entropia é uma grandeza que não busca mensurar matéria ou energia contida em sistemas termodinâmicos, porém a forma como matéria e energia encontram-se armazenadas e distribuídas em um sistema termodinâmico definido.

No ciclo ideal de Rankine, a água evaporada e condensada, configuraria o processo como isotérmico, e o trabalho realizado pela bomba e pela turbina como adiabático ou isentrópico. Entretanto, processos reais não são isotérmicos ou adiabáticos perfeitos, e enquanto por um lado, a presença de água e vapor reduziria a eficiência mecânica e o trabalho da turbina, por outro, comprometeria a eficiência do sistema de bombeamento. (Logan, E., 1999).

No ciclo de Rankine, para processos idealmente reversíveis, a área representada abaixo da curva T-S do diagrama da Figura 13, indica a quantidade relativa de calor transferida para o sistema, de forma bifásica, na presença de água líquida e vapor.

No mesmo diagrama, o trecho 3–4 representa a expansão adiabática da turbina, na qual pressão e temperatura são reduzidos. O trecho 4–1 define a compressão isotérmica devida ao calor trocado no condensador, e no qual, sob pressão constante, o vapor é resfriado até a condição de líquido saturado. A compressão adiabática do fluido devida ao trabalho fornecido à bomba – trecho 1-2, permite a elevação da pressão do fluido. Por fim, no trecho 2-3 ocorre a expansão isotérmica devida ao calor da queima do combustível, e que em função da transferência isobárica de calor, é convertido a vapor, completando o ciclo.

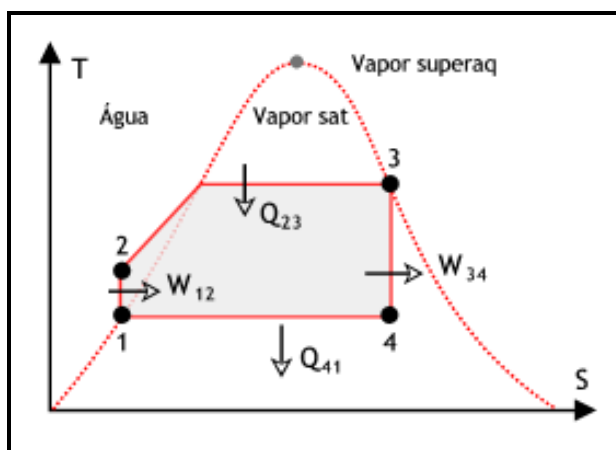


Figura 13 - Diagrama T-S e o Ciclo de Rankine (MSPC, 2008)

Como já mencionado, a eficiência de uma turbina a vapor é limitada pela presença de gotículas de água sobre as estrutura metálica das pás, capaz de também provocar corrosão, diminuindo gradualmente sua eficiência e vida útil. É possível evitar

a presença de gotículas de água, por meio do superaquecimento do vapor, passando a operação do sistema para acima da curva expressa pelo diagrama da Figura 13 anterior. No entanto, em função do cloro presente nos resíduos, se não corretamente controlado, o superaquecimento causa a corrosão dos conjuntos tubulares da caldeira (Logan, E., 1999).

Além da geração exclusiva de energia elétrica em turbinas, o vapor de alta temperatura e pressão pode também ser aproveitado por conjuntos tipo turbo-gerador, de cogeração de energia. No caso, além da geração de energia elétrica, tem-se o aproveitamento da energia térmica proveniente do vapor (gases quentes) que os mesmos emitem.

O desenho esquemático da Figura 14 ilustra o arranjo geral de uma usina de processamento térmico de RSU, dotada de tecnologia WtE, com destaque para os principais elementos que a compõem.

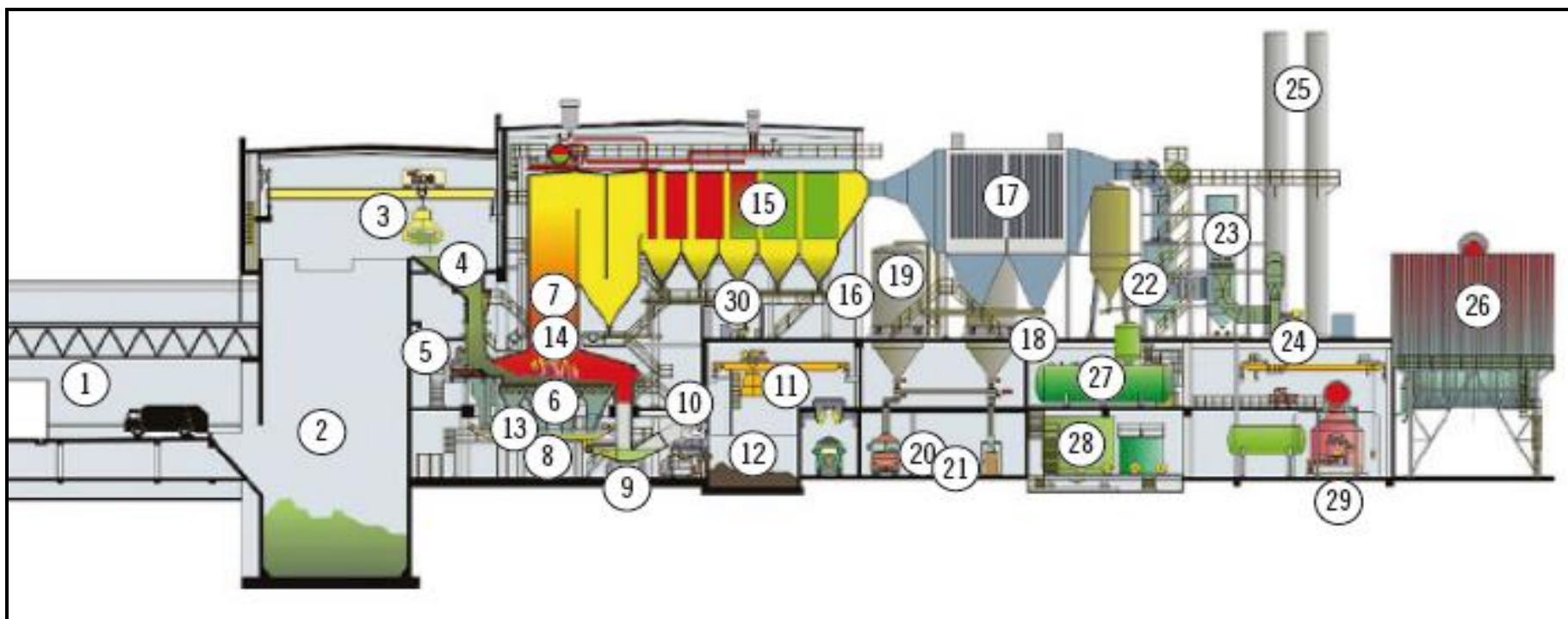


Figura 14 - Planta de usina de recuperação de RSU (Plastivida, 2012)

1. Acesso de viaturas e recepção RSU bruto	11. Talha – transferência de cinzas para estação de carga bota-fora	21. Sistema de ensacamento de cinzas e resíduos
2. Armazenamento de RSU bruto (<i>Bunker</i>)	12. Armazenamento de cinzas (<i>Bunker</i> auxiliar)	22. Lavador de gases
3. Ponte Rolante – transferência de RSU	13. Sistema de ar de combustão primário	23. Filtro de manga
4. Acesso à câmara de combustão	14. Ar de Combustão Secundário	24. Sistema de ventilação
5. Alimentação da grelha	15. Caldeira de Recuperação de Calor	25. Chaminé
6. Grelha de Incineração	16. Transportador de cinzas da caldeira	26. Aero condensador
7. Fornalha – câmara de combustão	17. Sistema de tratamento de gases da combustão	27. Reservatório de água
8. Transporte de cinzas	18. Transportador de resíduos do sistema de tratamento de gases	28. Planta de desmineralização da água
9. Remoção de cinzas	19. Armazenamento de cinzas e resíduos	29. Conjunto moto-gerador
10. Peneira vibratória	20. Estação de carga bota-fora de cinzas e resíduos	30. Sala de Controle

2.2.5. Questões Ambientais

As emissões atmosféricas provenientes da queima de RSU correspondem ao impacto ambiental mais importante da incineração. Essas são constituídas principalmente por gás carbônico (CO₂), óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), nitrogênio (N₂) e material particulado. Em menores concentrações, pode também ocorrer a emissão de gases ácidos clorídrico (HCl) e fluorídrico (HF). Associados à combustão incompleta, há ainda a produção de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos, dioxinas, e furanos; e associados ao material particulado, a emissão de metais pesados (Caixeta, 2005)

Devido ao menor poder calorífico inferior e menor eficiência do processo, as concentrações dos poluentes emitidos a partir de instalações de incineração de RSU são geralmente maiores que aquelas provenientes da queima de combustíveis fósseis. Estas variam de acordo com a tecnologia de incineração empregada e conforme a constituição da massa de resíduos em combustão (Henriques, 2004).

Metais pesados podem ser liberados com a combustão de RSU, principalmente Cádmio, Mercúrio e Chumbo, e em menor quantidade Arsênio, Berílio e Cromo. Micropoluentes orgânicos, tais como Hidrocarbonetos Policiclos Aromáticos (HPAs), formaldeídos e bifenil poli-clorados (PCBs), são também emitidos no processo de conversão térmica de RSU. Além de ambos os grupos de poluentes responderem de forma muito lenta à degradação no ambiente, constituem-se em compostos potencialmente cancerígenos ao ser humano (Henriques, 2004).

As dioxinas e furanos são substâncias organocloradas que podem estar presentes nos RSU, ou serem formadas sob temperaturas em torno de 300°C, durante a etapa de resfriamento dos gases, após a incineração. Classificados como Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) apresentam elevado potencial tóxico e danoso à saúde humana. O maior risco de contaminação por dioxinas ocorre em função de sua deposição e diluição na água; enquanto a contaminação via ingestão responde por 98% dos casos, e somente 2% é devida a inalação (Caixeta, 2005).

Embora desde 1989, as Diretivas 89/369/CEE e 89/429/CEE da Comunidade Econômica Europeia estabelecessem condições específicas para o licenciamento de unidades de incineração, desde 2000, a Diretiva 2000/76/CE passou a regulamentar a matéria, tornando estas condições ainda mais restritivas (Caixeta, 2005)

Por outro lado, no Brasil, usinas de incineração são sujeitas ao que estabelece a Resolução CONAMA n.º 316/2002, a qual disciplina os métodos de tratamento térmico de resíduos, e estabelece procedimentos operacionais, limites de emissão, critérios de desempenho, controle, tratamento e disposição final de efluentes. Complementarmente, importante mencionar outros instrumentos normativos e legais aplicados ao controle de processos térmicos no Brasil:

- Resolução CONAMA n.º 05/89, que estabelece os padrões nacionais de qualidade do ar, institui o Programa Nacional de Qualidade do Ar (PRONAR) e especifica as diretrizes para o monitoramento e inventário das fontes emissoras e poluentes atmosféricos;
- Resolução CONAMA n.º 03/90, que definiu os padrões primários e secundários para SO₂ (dióxido de enxofre), CO (monóxido de carbono), O₃ (ozônio), NO₂ (dióxido de nitrogênio), partículas inaláveis, partículas em suspensão e fumaça.
- Resolução CONAMA n.º 264/99, que dispõe sobre o licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividade de coprocessamento de resíduos na fabricação de cimento; e
- Resolução CONAMA n.º 283/01, que dispõe sobre o tratamento e a destinação final dos resíduos dos serviços de saúde.

A Tabela 5 resume os valores máximos preconizados por padrões ambientais de emissão vigentes no Brasil e na Europa; já a Tabela 6 indica valores preconizados pela legislação vigente nos EUA (Henriques, 2004).

Tabela 5 - Padrões ambientais de emissão vigentes no Brasil e em países europeus

Elemento Poluente em mg/Nm ³ , base seca, 11% de O ₂	ABNT NB-1265	FEEMA/RJ NT-574	CETESB E15.011	EC LRV-K	Áustria RV-K	Alemanha 17 BIMS
Particulado total	70	50	50	15	15	10
SO _x	280	100	300	50	50	50
NO _x	560	560	560	100	100	200
HCl	1,8 kg/h	50	1,8 kg/h	10	10	10
CO	100	50	125	50	50	50
Hg	0,28	0,2	0,28	0,05	0,05	0,05
Dioxinas e furanos ng/Nm ³	-	0,14	0,14	0,1	0,2	0,3

Tabela 6 - Padrões ambientais de emissão vigentes nos EUA

Poluente	Padrões de Emissão – base seca e 7% O ₂		
	Unidade	Instalações	
		Existentes	Novas
Dioxinas e Furanos Se dotado de controle de poluição do ar seco	ng I-TEQ/m ³ *	0,28	0,11
Dioxinas e Furanos Se não dotado de controle de poluição do ar seco	ng I-TEQ/m ³ *	0,2 ou 0,4 **	0,2
Mercúrio	µg/m ³	130	8
Material Particulado	mg/m ³	34	1,6
Metais Semivoláteis	µg/m ³	59	6,5
Metais Pouco Voláteis	µg/m ³	84	8,9
HCl e Cl ₂	ppmv	1,5	0,18
Hidrocarbonetos, geralmente propano	ppmv CO ₂	100	100
Eficiência geral remoção componentes orgânicos	%	99,999	

*2,3,7,8-lambari-clorar-Dibenzeno-dioxina (TCDD) tóxico equivalente (I-TEQ)

**para temperatura ≤ 204,4°C

Como mostra a Tabela 7, resolução específica da Secretaria de Estado de Ambiente de São Paulo (SMA 079/2009) estabelece condições para controle de emissão de poluentes em usinas de processamento térmico de RSU, tão restritivas quanto aquelas preconizadas pela União Europeia, por meio da Diretiva 2000/76 de 2000. Por outro lado, observa-se a maior flexibilização da Resolução CONAMA nº 316/02, e que dispõe sobre procedimentos e critérios para o licenciamento destes sistemas no Brasil.

Tabela 7 - Condições para controle de emissão de poluentes em usinas de processamento térmico de RSU

Parâmetro	Unidade	EU 2000/76	SMA/SP 079/09	CONAMA 316/2002
MP	mg/Nm ³	10	10	70
NO _x	mg/Nm ³	200	200	560
SO _x	mg/Nm ³	50	50	280
HCl	mg/Nm ³	10	10	80
CO	mg/Nm ³	50	50	125
Hg	mg/Nm ³	0,05	0,05	-
Cd + Ti	mg/Nm ³	0,05	0,05	-
HF	mg/Nm ³	1	1	5
Dioxinas e Furanos	mg/Nm ³	0,1	0,1	0,5

Devido às altas concentrações de substâncias associadas aos gases efluentes e devido à elevada concentração dos próprios gases, tem-se invariavelmente, a necessidade de dotar a instalação de incineração com um avançado sistema de controle da poluição atmosférica.

Geralmente, objetivando a remoção e neutralização de substâncias perigosas, são empregados sistemas de tratamento baseados em processos físico-químicos, contemplando a lavagem ácida, alcalina e de aerossóis. Complementarmente, filtros de manga são empregados para o abatimento de material particulado fino, e precipitadores eletrostáticos, para remoção de poeiras. A redução da emissão de dioxinas e mercúrio pode ser obtida com emprego de filtros adsorventes de carvão ativado (Plastivida, 2012)

De forma preventiva, a formação e emissão de dioxinas e furanos podem ser evitadas por meio do controle da concentração de cloro dos resíduos a serem incinerados; da manutenção de elevada temperatura no processo de incineração, da ordem de 2.000°C; da quantidade e forma de distribuição do ar aplicado; da utilização de adequado combustível auxiliar ao processo da combustão; do curto tempo de resfriamento dos gases da combustão; e por fim, do tratamento em lavadores a seco e filtro de mangas (Caixeta, 2005)

Além da emissão de gases poluentes, usinas de incineração de RSU apresentam potencial diversificado de impacto ambiental durante as etapas de implantação, em função da magnitude e complexidade de execução das obras, e de operação, em função da geração de lixiviados, cinzas da combustão (*bottom ash ou slag*), metais ferrosos e não ferrosos, cinzas da caldeira (*fly ash*), e resíduos do sistema de tratamento de gases de combustão. A quantidade de poluentes contidos em cada uma das rotas de resíduos varia conforme o tipo de tecnologia de incineração empregada, condições operacionais e padrões de controle (IEA, 1997).

A formação de lixiviados ocorre principalmente no compartimento de armazenamento de RSU bruto (*Bunker*), devido à umidade natural e ao processo de hidrólise que ali ocorre durante a degradação anaeróbia da matéria orgânica. Os lixiviados são continuamente removidos por bombeamento, e encaminhados ao tratamento (Plastivida, 2012). Efluentes líquidos são também gerados a partir de técnicas de tratamento de gases e deverão também ser tratados previamente ao descarte final (Henriques, 2004).

As cinzas de fundo da caldeira, compostas principalmente por metais ferrosos e não ferrosos, materiais inertes e não combustíveis, tais como pedras e vidros, pode ainda conter 3% de material orgânico. Enquanto os metais podem ser removidos das cinzas por separador magnético, as cinzas remanescentes e inertes poderão ser reutilizadas para uso da indústria de construção civil. É usual também que esta massa remanescente de cinzas seja continuamente recirculada e, no compartimento de armazenamento, misturada à massa bruta de RSU.

Já as cinzas residuárias do sistema de exaustão e de tratamento de gases da caldeira, por apresentarem elevada concentração de poluentes, não podem ser reaproveitadas, e sendo classificadas pela ABNT, por meio da NBR 10.004, como resíduo Classe 1, dependem de disposição final em aterro industrial. (Plastivida, 2012)

3. ESTUDO DE CASO

3.1. Metodologia

3.1.1. Tipo de Pesquisa

A elaboração de um estudo de caso, prática esta que investiga e analisa um conjunto de dados dentro de um contexto real, foi a metodologia base utilizada nessa parte do trabalho. A sua elaboração fundamentou-se tanto na realização de uma investigação bibliográfica, a fim de coletar dados iniciais necessários, como em pesquisa quantitativa e na prática de cálculos teóricos.

De maneira geral, é apresentada uma tentativa de conhecer com maior profundidade o processo de incineração de resíduos sólidos urbanos e analisar este tratamento térmico por meio de resultados que podem ser quantificados. Busca-se por fim, apresentar as características e condicionantes dessa técnica pouco investigada no Brasil por meio da quantificação do fenômeno e da formulação de hipóteses, que serão apresentadas na descrição do caso.

3.1.2. Seleção da Localidade

Conforme apresentado, o estudo de caso deve ter uma contextualização real do processo que se deseja estudar, sendo, dessa forma, necessária a obtenção de dados de entrada de determinada localidade geradora de resíduos.

Os critérios de seleção da região provedora de informações basearam-se na facilidade de obtenção de dados por meio de pesquisa literária; na possibilidade futura de empregabilidade do estudo e na demonstração de interesse pelo tema por parte dos órgãos e agentes locais. Além desses, houve preferência por localidades brasileiras, de forma que a pesquisa pudesse ser mais facilmente aplicada no contexto nacional.

Vistos os critérios, a localidade escolhida para fornecimento dos dados de entrada foi Bauru, um município de porte médio do interior paulista, com aproximadamente 362.000 habitantes e Produto Interno Bruto de 7.972.310 mil reais

(IBGE, 2013). A região é responsável pela geração diária de aproximadamente 290 toneladas de RSU, que são dispostas em aterro sanitário. (PRB, 2013).

O município selecionado apresentou-se adequado ao primeiro critério de seleção apresentado, uma vez que os dados necessários para a elaboração dos cálculos teóricos foram facilmente localizados em trabalhos científicos recentes. Existe também interesse por parte dos órgãos e agentes locais no tema, ficando este evidenciado por meio da proposta de implementação de um sistema de incineração de resíduos com geração de energia no município de Bauru (PRB, 2013)

Temos assim que, Bauru mostrou-se extremamente apropriada e conveniente para o fornecimento dos dados de entrada do projeto. Portanto, os resultados e análises apresentados nos capítulos subsequentes desse trabalho são potenciais fontes de conhecimento para a região, podendo ser futuramente empregados em novos projetos e satisfazendo, por fim, o critério de seleção referente a empregabilidade do estudo.

3.1.3. Coleta e tratamento de dados

Tanto a coleta de informações, quanto a metodologia empregada para a elaboração dos cálculos teóricos, foi feita a partir de documentação indireta. A leitura de bibliografia sobre incineração, processos térmicos e geração de resíduos sólidos foi, portanto, a principal fonte para a obtenção dos dados de entrada necessários para o caso em estudo e a elaboração dos referidos cálculos.

Os números relacionados à geração de resíduos foram retirados tanto do Plano de Resíduos de Bauru, disponível no site da prefeitura de Bauru (PRB, 2013), como do trabalho científico de autoria de Poletto *et al.* (2007). A segunda fonte de pesquisa colaborou também para a obtenção de informações primárias a respeito da composição e características do resíduo em estudo.

O tratamento de dados foi feito por meio da elaboração de cálculos teóricos. Para este, foi utilizado o livro de termodinâmica dos autores Smith, *et al.* (1959) como base. As equações aplicadas, bem como os métodos de cálculo, gráficos e presunções realizadas, tem embasamento, portanto, nesse material.

No estudo em questão é realizada uma avaliação do potencial de geração energética da incineração dos resíduos sólidos urbanos de Bauru, considerando a

segregação parcial dos materiais que compõem esse resíduo. A interpretação desses resultados se deu por meio da influência de tal segregação nos fluxos de massa e energia do sistema.

3.1.4. Limitações do Método

As principais limitações do método empregado são decorrentes das premissas utilizadas para a simplificação dos cálculos teóricos, bem como das estimativas aplicadas para determinados fatores. A exemplo deste último caso temos a eficiência energética que normalmente ocorre nos processos de incineração, que foi estimada com base em referências bibliográficas.

Tais entraves podem acarretar na variação dos resultados obtidos pelo método em questão quando comparados aos números de um processo real, uma vez que o método teórico não reflete o processo prático de maneira perfeita. Entretanto, tais limitações são comuns e esperadas quando há aplicação de metodologias deste tipo, não prejudicando, portanto, a qualidade das análises e conclusões finais deste estudo.

3.1.5. Descrição do Caso

A fim de alcançar os objetivos propostos nesse trabalho, optou-se pela realização de um estudo de caso da incineração dos resíduos sólidos urbanos gerados no município de Bauru, conforme foi apresentado anteriormente. O estudo realiza, então, uma avaliação do potencial de geração de energia no processo de incineração do resíduo.

Como já visto, a incineração consiste no processo de combustão de determinado combustível, que ocorre na presença de um comburente e de uma fonte de ignição. Para esta pesquisa, temos que o resíduo sólido urbano de Bauru é o combustível e o ar é o comburente do processo. Os produtos gerados são os gases de combustão, cinzas e calor, sendo este último o objeto de estudo desse trabalho.

Com a finalidade de facilitar o entendimento das diversas fases de cálculo e seus resultados, esses serão descritos a seguir por meio de etapas juntamente às estimativas utilizadas neste estudo de caso. Estas foram divididas com base nos

dados de entrada: combustível e comburente; e de saída do processo de incineração: gases de combustão, cinzas e energia, apresentados esquematicamente na Figura 15.

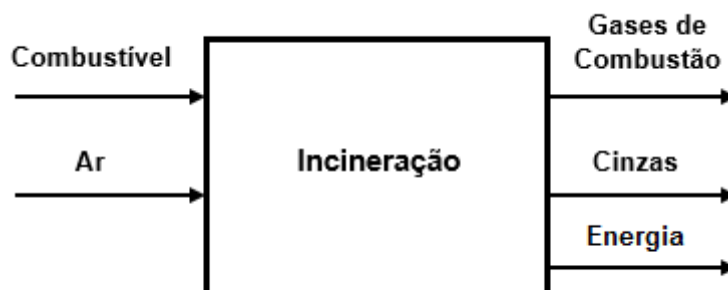


Figura 15 – Diagrama esquemático do processo de incineração

3.1.5.1. Combustível

O combustível em estudo são os resíduos sólidos urbanos e como já descrito anteriormente, foi escolhido o município de Bauru para a obtenção dos dados de entrada necessários. A composição típica dos resíduos sólidos urbanos de Bauru, bem como a umidade desses componentes, foi obtida por meio de revisão da literatura. (Poletto *et al.*, 2007) Alguns materiais, a exemplo vidro e metais, não serão contemplados nesse estudo, uma vez que são inertes e não colaboram para a estimativa do poder calorífico. Dessa forma, foram calculadas novas porcentagens dos materiais, de forma a considerar a separação de vidro, metais e outros compostos antes de se promover a incineração.

Outra característica do combustível que foi levantada para a realização dos cálculos é a análise elementar dos materiais envolvidos, que consiste na determinação da porcentagem de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), enxofre (S), e cinzas contidas nos componentes do RSU. Tal análise é importante tanto para avaliações energéticas como para cálculos de emissão de gases durante a incineração, que serão apresentados adiante.

Não foram consideradas etapas prévias de secagem do combustível, de forma que para os cálculos de potencial de geração energética foram aplicadas a análise elementar e a gravimetria do combustível em base úmida. A fim de facilitar as

estimativas dos gases de combustão formados no processo de incineração, foi ainda calculada a composição média do RSU de Bauru, por meio de média ponderada.

A aplicação dos cálculos foi feita com base na queima de 1kg de material. Somente ao final das estimativas, para a análise final, foi considerada a combustão de 290 toneladas de resíduos por dia, valor gerado no município de Bauru que é encaminhada para aterro sanitário.

3.1.5.2. Comburente

O comburente escolhido para o projeto foi o ar. Considerou-se que o mesmo é composto por oxigênio (21 mol%) e nitrogênio (79 mol%). (Poletto *et al.*, 2007) Para esse trabalho, admitiu-se que a quantidade de comburente aplicada para a incineração do RSU de Bauru teria 30% de ar em excesso, de forma a garantir que o processo de combustão seja completo.

A fim de estimar a quantidade mínima de ar necessária, é preciso a aplicação de cálculo estequiométrico. Por meio deste é possível relacionar quantidades de reagentes e produtos que participam das reações químicas de combustão e estimar a quantidade teórica de oxigênio. Para realizar os cálculos estequiométricos é necessário conhecer a composição gravimétrica e elementar do combustível a ser incinerado, analisar quais reações químicas são passíveis de ocorrer e determinar a quantidade de cada reagente.

Sendo o material composto de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e cinzas, foi considerado para o presente trabalho que os gases formados após a combustão completa dos resíduos sólidos urbanos de Bauru são dióxido de carbono, monóxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e vapor d'água. Ainda, devido a utilização de ar como comburente, deve-se também considerar a presença de gás oxigênio e gás nitrogênio como dados de saída.

Para a realização dos cálculos estequiométricos foi necessária a obtenção dos seguintes dados:

- Massa molar dos reagentes;
- Massa dos reagentes;

- Número de mols dos reagentes, por meio da divisão da massa dos reagentes pela massa molar respectiva.

3.1.5.3. Gases de Combustão

Realizado o processo de incineração dos resíduos sólidos urbanos de Bauru na presença de ar, serão gerados gases de combustão. Conforme apresentado no item anterior, foi considerado que os gases resultantes da combustão completa do material são dióxido de carbono, monóxido de nitrogênio, dióxido de enxofre, vapor d'água, gás oxigênio e gás nitrogênio. A quantidade de cada um desses gases gerados reflete diretamente no resultado do cálculo do poder calorífico do combustível, sendo esta etapa, portanto, de grande importância para a estimativa do potencial energético do RSU.

Para estimar a quantidade de cada gás de combustão, é também empregado o cálculo estequiométrico. Como visto, por meio deste é possível relacionar quantidades de reagentes e produtos que participam das reações químicas de combustão e, para o presente caso, estimar a quantidade de produto gerado.

Para a estimativa das quantidades dos gases oxigênio e nitrogênio foi considerada a quantidade de ar em excesso aplicada no sistema de incineração. O oxigênio que sai do sistema corresponde ao oxigênio que não foi usado no processo de combustão, sendo esse portanto o oxigênio em excesso. Já o gás nitrogênio apresentado como gás de combustão, corresponde ao nitrogênio do ar utilizado como comburente do processo.

3.1.5.4. Cinzas

Não foram encontradas maiores informações a respeito da composição das cinzas dos resíduos sólidos urbanos de Bauru. Como na metodologia usada para estimar o poder calorífico a 25°C dos componentes e do RSU como um todo, as cinzas não entram nos cálculos, pois as matérias primas e produtos obtidos consideram-se a 25°C, a falta dessa informação não prejudicou os cálculos.

Cabe observar que a criação de novas hipóteses, a fim de caracterizar as cinzas e seguir com os cálculos de balanço de massa e energia, para a estimativa da

temperatura que podem atingir os gases de combustão não foi feita, pois depende também da determinação do calor específico de cada tipo de cinza em função da temperatura, o que por si é um novo projeto que deve ser considerado em futuros trabalhos.

3.1.5.5. Potencial de Geração de Energia

O método escolhido para estimar o potencial de geração energética da incineração dos resíduos sólidos urbanos de Bauru consiste no cálculo da variação de entalpia das reações de combustão. Para tais cálculos, foram consideradas as condições de pressão de 1 atmosfera e temperatura de 25°C, uma vez que sob esse sistema é possível igualar a variação de entalpia ao saldo de energia total do processo de incineração. (Smith *et al.*, 1959)

Os cálculos realizados podem ser divididos nas seguintes etapas:

- a) Obtenção das entalpias molares de formação dos reagentes e produtos das equações químicas de combustão, por meio de revisão bibliográfica; (Smith *et al.*, 1959)
- b) Realização do cálculo da variação de entalpia molar das reações de combustão, por meio da diferença das entalpias molares de formação dos produtos e dos reagentes dessas reações;
- c) Obtenção das entalpias de combustão por massa de cada reagente, por meio da divisão da entalpia molar de combustão pela massa molecular do reagente de cada reação química;
- d) Obtenção da energia gerada por cada produto que compõe o resíduo em estudo, por meio da multiplicação da entalpia de combustão por massa de reagente, valor achado na etapa anterior, pela quantidade do reagente presente em 1kg de RSU;
- e) Obtenção do poder calorífico total do resíduo por meio da soma dos valores encontrados na etapa anterior;

- f) Obtenção do calor de vaporização de 1mol de água a 25°C, por meio da diferença de entalpia da água nos estados gasoso e líquido e divisão desse resultado pela massa molecular da água;
- g) Obtenção do calor de vaporização da água no processo de incineração dos resíduos, por meio da multiplicação da energia, valor achado na etapa anterior, pela quantidade de água contida no resíduo;
- h) Obtenção do poder calorífico efetivo do resíduo, por meio da diferença entre o poder calorífico total e o calor de vaporização da água contida no mesmo;
- i) Variação das quantidades dos materiais que compõem o resíduo, conforme as hipóteses apresentadas abaixo e posterior análise.
- Hipótese 1 - Segregação de Material Orgânico
 - Hipótese 2 - Segregação de Papel e Papelão
 - Hipótese 3 - Segregação de Têxteis e Couro
 - Hipótese 4 - Segregação de Madeira
 - Hipótese 5 - Segregação de Plástico
- j) Obtenção da energia resultante da incineração de 290 toneladas de resíduos sólidos urbanos gerados em Bauru, por meio da hipótese de 28% de eficiência global da planta incineradora, valor considerado em outros trabalhos sobre o assunto. (Poletto *et al.*, 2007)

3.2. Resultados

3.2.1. Combustível

De acordo com Poletto (2007), a Tabela 8 apresenta a composição típica dos resíduos sólidos urbanos encaminhados para o aterro sanitário em Bauru, bem como a umidade desses componentes. Na coluna “Massa Úmida após Segregação” estão as novas porcentagens dos materiais, considerando a separação de vidro, metais e outros compostos não definidos.

Tabela 8 - Composição típica dos resíduos do aterro sanitário de Bauru

Componentes	Massa Úmida (%)	Umidade (%)	Massa Úmida após Segregação (%)
Material Orgânico	55,00%	70,00%	60,44%
Papel, Papelão	21,00%	6,00%	23,08%
Têxteis e Couro	5,00%	10,00%	5,49%
Madeira	1,10%	20,00%	1,21%
Plástico	8,90%	2,00%	9,78%
Vidro	2,60%	2,00%	
Metais	5,40%	2,00%	
Outros	1,00%	5,00%	

(Adaptado de Poletto *et al.*, 2007)

A Tabela 8 mostra o resultado da análise elementar do RSU em base seca, que é a forma como se determina esta análise. A mesma é apresentada também no trabalho de Poletto (2007) e é utilizada em diversos estudos de tratamento térmico de resíduos.

Tabela 9 - Análise elementar do RSU Combustível em base seca, adaptada.

RSU	C	H	O	N	S	Cinza
Material Orgânico	48,00%	6,40%	37,60%	2,60%	0,40%	5,00%
Papel, Papelão	44,00%	5,90%	44,60%	0,30%	0,20%	5,00%
Plástico	60,00%	7,20%	22,80%			10,00%
Têxteis e Couro	55,00%	6,60%	31,20%	4,60%	0,15%	2,45%
Madeira	49,50%	6,00%	42,70%	0,20%	0,10%	1,50%

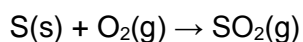
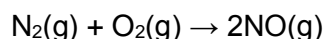
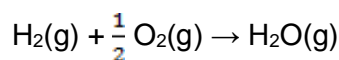
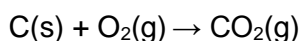
De forma a reunir as informações das Tabelas 7 e 8, foi elaborada uma terceira tabela com a análise elementar combustível e a gravimetria em base úmida, apresentada abaixo. Ainda, para facilitar as estimativas dos gases de combustão formados no processo de incineração, foi calculada na última linha da Tabela 9 a composição média do RSU de Bauru, por meio de média ponderada.

Tabela 9 - Análise elementar do RSU combustível em base úmida

RSU	Massa Úmida (%)	C	H	O	N	S	Cinza	H ₂ O
Material Orgânico	60,44%	14,40%	1,92%	11,28%	0,78%	0,12%	1,50%	70,00%
Papel, Papelão	23,08%	41,36%	5,55%	41,92%	0,28%	0,19%	4,70%	6,00%
Plástico	9,78%	58,80%	7,06%	22,34%	0,00%	0,00%	9,80%	2,00%
Têxteis e Couro	5,49%	49,50%	5,94%	28,08%	4,14%	0,14%	2,21%	10,00%
Madeira	1,21%	39,60%	4,80%	34,16%	0,16%	0,08%	1,20%	20,00%
Média Ponderada	100,00%	27,20%	3,51%	20,63%	0,77%	0,12%	3,09%	44,68%

3.2.2. Comburente

As reações químicas decorrentes da combustão do resíduo sólido urbano de Bauru consideradas nesse trabalho são as seguintes:

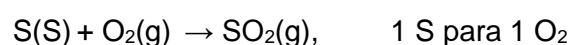
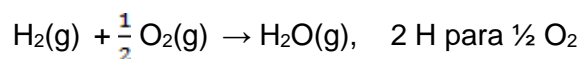
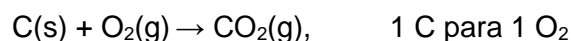


Para a realização dos cálculos estequiométricos foi elaborada a Tabela 10, que apresenta a massa molar (kg/kmol), a massa por massa de combustível (kg/kg RSU) e o número de mols por massa de combustível (kmol/kg RSU) de cada elemento que constitui o resíduo sólido em estudo.

Tabela 10 - Quantidades dos reagentes

Unidade	C	H ₂	O ₂	N ₂	S	H ₂ O
Kg/Kmol	12	2	32	28	32	18
Kg/Kg RSU	0,27197	0,07030	0,41267	0,01532	0,00124	0,44679
Kmol/Kg RSU	0,02266	0,03515	0,01290	0,00055	0,00004	0,02482

Dessa forma, temos que o consumo de oxigênio será dado pelas equações:



Como para cada átomo de oxigênio presente no RSU, participa da combustão, economiza-se $\frac{1}{2}$ de O₂ do ar, temos que:

$$\text{O}_{2\text{teórico}} = (1\text{C}) + \left(\frac{1}{4} \text{H}\right) - \left(\frac{1}{2} \text{O}\right) + \left(\frac{1}{2} \text{N}\right) + (1\text{S}) = 0,028 \text{ kmol/kg de RSU}$$

$$\text{Ar}_{\text{teórico}} = \frac{\text{O}_{2\text{teórico}}}{0,21} = 0,13 \text{ kmol/kg de RSU}$$

Para a 30% de ar em excesso usado no processo de incineração dos resíduos sólidos urbanos de Bauru, temos então o seguinte resultado:

$$\text{Ar}_{\text{real}} = \text{Ar}_{\text{teórico}} \times (100\% + 30\%) \quad \text{Ar}_{\text{real}} = 0,13 \times 1,30 = 0,17 \text{ kmol/kg}$$

3.2.3. Gases de Combustão

Os gases de combustão gerados no processo de incineração dos resíduos sólidos urbanos foram obtidos com base nas reações químicas do processo. Para os cálculos estequiométricos, realizados a fim de obter a quantidade dos mesmos, foram utilizados os dados da Tabela 9 e as equações das reações químicas apresentadas no item anterior. Dessa forma, temos:

$C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g)$	1 C gera 1 CO_2	$CO_2 = (1C) = 0,02266 \text{ kmol/kg}$
$2H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(g)$	2 H geram 1 H_2O	$H_2O = (2H) = 0,05997 \text{ kmol/kg}$
$N_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2NO(g)$	1 N gera 1 NO	$NO = (1N) = 0,00055 \text{ kmol/kg}$
$S(s) + O_2(g) \rightarrow SO_2(g)$	1 S gera 1 SO_2	$SO_2 = (1S) = 0,00004 \text{ kmol/kg}$

A estimativa das quantidades dos gases oxigênio e nitrogênio considera a quantidade de ar em excesso aplicada no sistema de incineração, de forma que:

- O gás oxigênio que sai do sistema corresponde ao oxigênio teórico, calculado na etapa anterior, vezes a porcentagem de ar em excesso (30%);
- O gás nitrogênio que sai do sistema corresponde ao ar real que entra no sistema, calculado na etapa anterior, vezes a porcentagem de nitrogênio presente no ar (79 mol %)

As quantidades de gás oxigênio e gás nitrogênio que deixam o sistema são expressas abaixo, considerando 30% de comburente em excesso:

$$O_{2\text{excesso}} = 0,028 \times 0,3 \qquad O_{2\text{excesso}} = 0,008 \text{ kmol/kg de RSU}$$

$$N_2 = 0,13 \times 0,79 \qquad N_2 = 0,11 \text{ kmol/kg de RSU}$$

3.2.4. Potencial de Geração de Energia

Seguindo as etapas estabelecidas na metodologia de cálculo, os resultados são apresentados a seguir.

- a) As entalpias de formação dos reagentes (carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre), e dos produtos das equações químicas de combustão do resíduo de Bauru (dióxido de carbono, da água, do monóxido de nitrogênio e do dióxido de enxofre) são apresentadas na Tabela 11. (Smith *et al.*, 1959)

Tabela 11 - Entalpias dos reagentes e produtos das reações químicas de combustão

ΔH (cal/mol)	
C (s)	0
H ₂ (g)	0
N ₂ (g)	0
S (s)	0
CO ₂ (g)	-94052
H ₂ O (g)	-57798
NO(g)	21600
SO ₂ (g)	-70960

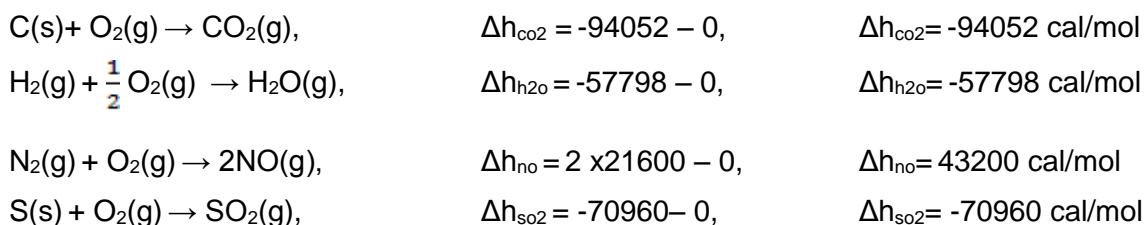
b) A variação de entalpia das reações de combustão (entalpia de combustão) é calculada, por meio da equação apresentada abaixo:

$$\Delta h = h_p - h_r,$$

Onde:

- Δh é a entalpia de combustão
- h_p é a entalpia de formação dos produtos da reação;
- h_r é a entalpia de formação dos reagentes.

Realizando os cálculos, temos:



c) A massa molecular dos reagentes está apresentada, abaixo, e, em sequência, são realizados os cálculos das entalpias por massa de reagente. (Smith *et al.*, 1959)

C (s) = 12 (kg/kmol); H₂(g) = 2 (kg/kmol); N₂(g) = 28 (kg/kmol); S (s) = 32 (kg/kmol)

Seguindo com os cálculos, temos:

$$\Delta h_{\text{co}_2'} = -94052 \div 12$$

$$\Delta h_{\text{co}_2'} = -7837,67 \text{ kcal/kg}$$

$$\Delta h_{\text{h}_2\text{o}'} = -57798 \div 2$$

$$\Delta h_{\text{h}_2\text{o}'} = -28899,00 \text{ kcal/kg}$$

$$\Delta h_{\text{no}'} = 43200 \div 28$$

$$\Delta h_{\text{no}'} = 1542,86 \text{ kcal/kg}$$

$$\Delta h_{\text{so}_2'} = -70960 \div 32$$

$$\Delta h_{\text{so}_2'} = -2217,50 \text{ kcal/kg}$$

d) A massa de cada reagente das reações químicas de combustão foi obtida previamente com a análise elementar dos resíduos sólidos urbanos de Bauru. As mesmas estão apresentadas na Tabela 9. Os cálculos são apresentados a seguir.

$$\Delta h_{\text{co}_2''} = -7837,67 \text{ kcal/kg} \times 0,27197 \text{ kg/kg RSU}$$

$$\Delta h_{\text{co}_2''} = -2.131,62 \text{ kcal/kg RSU}$$

$$\Delta h_{\text{h}_2\text{o}''} = -28899,00 \text{ kcal/kg} \times 0,03515 \text{ kg/kg RSU}$$

$$\Delta h_{\text{h}_2\text{o}''} = -1.015,73 \text{ kcal/kg RSU}$$

$$\Delta h_{\text{no}''} = 1542,86 \text{ kcal/kg} \times 0,00766 \text{ kg/kg RSU}$$

$$\Delta h_{\text{no}''} = 11,82 \text{ kcal/kg RSU}$$

$$\Delta h_{\text{so}_2''} = -2217,50 \text{ kcal/kg} \times 0,00124 \text{ kg/kg RSU}$$

$$\Delta h_{\text{so}_2''} = -2,76 \text{ kcal/kg RSU}$$

e) O resultado do poder calorífico total do resíduo é 3.138,30 kcal por massa de combustível incinerado. O resultado foi obtido, por meio da equação:

$$|\Delta h_{\text{total}}| = \Delta h_{\text{co}_2''} + \Delta h_{\text{h}_2\text{o}''} + \Delta h_{\text{no}''} + \Delta h_{\text{so}_2''}$$

$$|\Delta h_{\text{total}}| = 3.138,30 \text{ kcal/kg RSU}$$

f) A entalpia de formação da água nos estados gasoso e líquido, bem como sua massa molecular, está apresentada na Tabela 12. (Smith *et al.*, 1959) A energia necessária para vaporizar 1mol de água a 25°C, foi calculada em sequência.

Tabela 12 - Entalpia e massa molecular da água

	Entalpia (kcal/kmol)	Massa Molecular (kg/kmol)
H ₂ O (g)	-57798	18
H ₂ O (l)	-68317	

$$\text{Energia} = \frac{[\text{Entalpia da água (g)} - \text{Entalpia da água (l)}]}{\text{Massa molecular da água}}$$

Massa molecular da água

$$\text{Energia} = \frac{[(-57798 - (-68317))]}{18}$$

18

$$\text{Energia} = 584,39 \text{ kcal/kg}$$

- g) A quantidade de água contida no resíduo foi obtida previamente com a análise elementar dos resíduos sólidos urbanos de Bauru. A mesma está apresentada na Tabela 9. O calor de vaporização da água no processo de incineração dos resíduos está calculado a seguir.

$$\Delta h_{\text{água}} = 584,39 \text{ kcal/kg} \times 0,02482 \text{ kg/kg RSU}$$

$$|\Delta h_{\text{água}}| = 261,10 \text{ kcal/kg RSU}$$

- h) O Poder Calorífico Efetivo do resíduo é estimado por meio da seguinte equação:

$$PC_e = |\Delta h_{\text{final}}| = |\Delta h_{\text{total}}| - |\Delta h_{\text{água}}|$$

$$PC_e = 3.138,30 - 584,392,76$$

$$PC_e = 2.877,20 \text{ kcal/kg RSU} = 12,03 \text{ MJ/kg RSU}$$

i) A variação das quantidades dos materiais que compõem o resíduo e a consequente variação do poder calorífico gerado é apresentada na Tabela 13 e na Figura 16. Nas mesmas são expostas as 5 hipóteses que serão analisadas neste trabalho.

Tabela 13 - Poder calorífico efetivo por segregação de material (MJ/kg)

	0 %	20%	40%	60%	80%	100%
Material Orgânico	12,03	12,95	14,18	15,86	18,34	22,32
Papel e Papelão	12,03	11,64	11,21	10,73	10,20	9,60
Têxteis e Couro	12,03	11,91	11,78	11,66	11,53	11,39
Madeira	12,03	12,01	12,00	11,98	11,97	11,95
Plástico	12,03	11,71	11,39	11,05	10,69	10,32

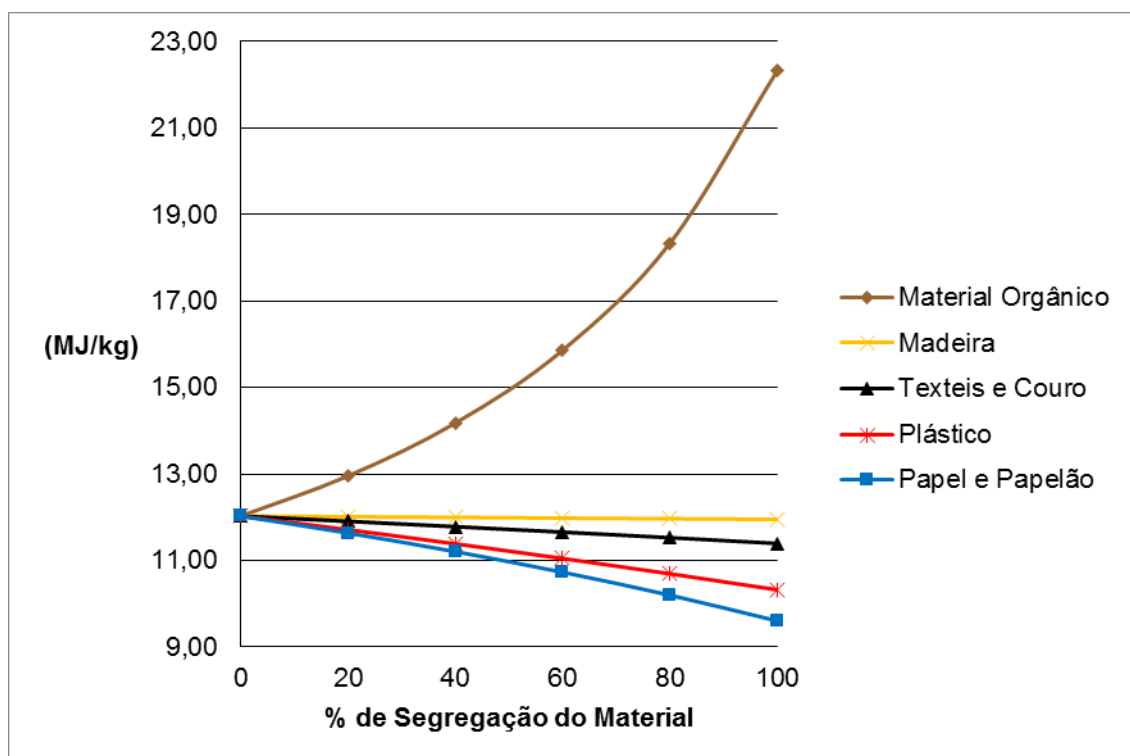


Figura 16 - Potencial teórico de geração de energia considerando a segregação do material

j) O potencial teórico de geração de energia, tomando como base a incineração do resíduo sólido urbano do município de Bauru, é de 805,61 kcal por massa de combustível incinerado (3,37 MJ/kg RSU). Considerando a combustão de

264 toneladas por dia, valor que considera a segregação de 9% das 290 toneladas de resíduos gerados em Bauru (Tabela 8), e usando o fator de conversão de kcal para kWh de 0,001163 (Atlas ANEEL, 2014), temos que o potencial teórico de energia gerada para o município seria de aproximadamente 247.256 kWh/dia. O resultado foi obtido por meio dos cálculos abaixo. (Poletto *et al.*, 2007)

$$PC_{\text{final}} = 2.877,20 \times 0,28 \text{ kcal/kg RSU}$$

$$PC_{\text{final}} = 805,61 \text{ kcal/kg RSU}$$

$$\text{Energia}_{\text{teórica}} = 805,61 \text{ kcal/kg RSU} \times 264.000 \text{ kg RSU/dia} \times 0,01163 = 247.255,8 \text{ kWh/dia}$$

4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Fazendo uma breve análise dos RSU gerados em Bauru que foram usados para a aplicação do estudo de caso, percebe-se que 55% destes resíduos são constituídos por material orgânico, 21% por papel e papelão, 8,9% por plástico, 5% por têxteis e couro e os demais 10,1% por madeira, vidro, metais e outros. Vale salientar que o material orgânico possui alto teor de umidade e contribui para mais de 60% da massa dos RSU coletados.

Conforme levantado na revisão bibliográfica, umas das preocupações do processo de incineração é a disposição das cinzas. Portanto, é também válido ressaltar que o plástico apresenta alto teor deste componente quando comparado aos demais materiais, o que pode gerar dificuldades no tratamento térmico destes combustíveis.

Referente ao balanço de massa da incineração dos resíduos gerados no município de Bauru, 264 t/dia (11.000 kg/h), tem-se uma grande entrada de ar, água e oxigênio, que correspondem a 80%, 7% e 7% da massa dos componentes iniciais do sistema. Dos produtos do processo de incineração, como esperado, as maiores quantidades são água (17%) e gás carbônico (16%). É válido ressaltar que esses valores não consideram a quantidade de cinzas do resíduo. O balanço de massa é resumido abaixo na Tabela 14.

Tabela 14 - Balanço de massa do processo de incineração

Entrada			Saída		
C	2.990,55	kg/h	CO₂	10.965,36	kg/h
H₂	772,96	kg/h	H₂O	11.869,46	kg/h
O₂	4.537,63	kg/h	O₂ (excesso)	2.948,10	kg/h
N₂	168,44	kg/h	NO	180,47	kg/h
S	13,67	kg/h	SO₂	27,33	kg/h
H₂O	4.912,84	kg/h			
Ar	N₂	42.051,36	N₂	42.051,36	kg/h
	O₂	12.775,10			

A geração de gases poluentes é uma consequência inevitável do processo em estudo. Portanto, considerando um processo real, é necessário que sejam empregadas tecnologias para o tratamento desses produtos como lavadores químicos, precipitadores eletrostáticos ou outras metodologias comumente empregadas para o processo.

Ao final das etapas de cálculo, foi estimado em 12 MJ/kg o poder calorífico inferior do resíduo sólido urbano de Bauru. Comparando esse resultado com demais valores médios obtidos em trabalhos relacionados à área, 6.0 MJ/kg (Bilitewski *et al.*, 1997) e 10 MJ/kg (Poletto *et al.*, 2007), temos que o mesmo encontra-se dentro do esperado. Uma vez que foram desconsideradas as influências das cinzas no processo e o estudo foi aplicado a um sistema ideal, tem-se que a análise final para o resultado é positiva.

Avaliando a contribuição de cada material para o resultado exposto acima, temos que a matéria orgânica é o componente que tem a maior influência no poder calorífico do resíduo. Com o aumento da segregação de matéria orgânica, o poder calorífico do combustível aumenta de maneira significativa. Esta variação deve-se tanto a grande umidade deste material, que naturalmente prejudica o processo de obtenção de energia, como também ao fato de que este se apresenta em quantidade bastante superior aos demais resíduos.

Seguindo com a análise dos resultados expostos na Figura 16, é possível considerar o papel e o plástico como os componentes de maior influência positiva para a geração de energia uma vez que a segregação dos mesmos causa grande diminuição do poder calorífico do combustível. A separação dos demais componentes não gerou grande variação no processo, resultado que também pode ser atribuído ao fato de que os mesmos encontram-se em pequenas quantidades.

Por fim, tem-se que o potencial teórico de geração de energia, tomando como base a incineração de 264 toneladas por dia de resíduos do município de Bauru, seria de 247.255,88 KWh/dia. Considerando que a demanda de energia elétrica de unidades domésticas brasileiras pode chegar a aproximadamente 190kwh ao mês (EPE, 2012), a energia gerada por meio da incineração do RSU seria suficiente para atender aproximadamente 39.000 residências em um mês. Ainda, caso fosse considerada a venda dessa energia, poderiam ser arrecadados cerca de R\$ 78.000,00

por dia, uma vez que, segundo dados da ANEEL (2014), o valor da tarifa da concessionária de luz de Bauru é de R\$ 0,31686/kWh².

² O valor não contempla tributos e outros fatores econômicos.

5. CONCLUSÕES

5.1. Contribuições

O gerenciamento da limpeza urbana no Brasil apresenta evolução bastante lenta tanto para a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, de 2010, quanto para o estabelecimento de uma gestão de resíduos sólidos eficaz e sustentável. A necessidade de desenvolvimento de novas estratégias, de forma a otimizar o aproveitamento dos recursos existentes nos materiais descartados mostra-se, portanto, como passo imprescindível para a evolução do quadro atual.

Uma maior aplicação de recursos para a coleta seletiva aliada a implementação de novas técnicas para o tratamento final adequado aos resíduos no Brasil deve ser defendido como principal investimento a ser feito pelo governo nos próximos anos. O processo de incineração é colocado como uma opção a fim de solucionar a problemática levantada. Esta tecnologia vem recebendo modernizações, principalmente nos sistemas de controle e tratamento de gases poluentes, promovendo, portanto, ambiente para a maior aceitabilidade de unidades baseadas no tratamento térmico de resíduos.

Os principais resultados obtidos neste projeto mostraram que o aproveitamento energético dos RSU de Bauru é possível e seria suficiente para atender aproximadamente 39.000 residências em um mês ou arrecadar cerca de R\$ 78.000,00 por dia de operação do incinerador. Referente a qualidade do material utilizado como combustível, o mesmo foi considerado adequado para receber tal tratamento, mas, caso fosse realizada uma etapa prévia de secagem ou retirada do material orgânico, o poder calorífico do mesmo seria ainda maior. Por outro lado, a retirada do plástico e do papel deste resíduo influenciaria negativamente para a aplicação desta técnica, uma vez que a energia gerada seria menor.

Dessa forma, temos que além das questões que envolvem a limpeza urbana, a incineração poderia contribuir para a geração energética, o que torna a aplicação dessa tecnologia, assim como de outras técnicas que envolvem reaproveitamento energético, economicamente mais atraentes.

5.2. Limitações da Pesquisa

As principais limitações da pesquisa devem-se à obrigação de revisão literária para obtenção dos dados iniciais necessários para os cálculos teóricos. Como a empregabilidade do processo de incineração de resíduos sólidos urbanos no Brasil é praticamente nula, foi preciso ainda recorrer a dados de entrada de outros países a fim de dar continuidade ao projeto, o que não é ideal. Dessa forma, a falta de informações nacionais a respeito do assunto aliada a inexistência de uma etapa experimental, caracteriza-se como uma limitação do trabalho.

Com o intuito de melhorar a análise, os valores obtidos poderiam ser comparados aos dados de um processo de incineração real de resíduos brasileiros. Como foi apontado na metodologia, existem limitações quanto a empregabilidade dos cálculos teóricos, uma vez que são assumidas premissas que divergem da prática, o que deriva em variações nos resultados. Entretanto, não foi possível levantar tais dados.

Por fim, é necessário observar em conjunto aos resultados obtidos os principais impactos causados ao meio ambiente por essa técnica, como a geração de cinzas e de gases poluentes, e as medidas mitigadoras. Ainda, cabe ressaltar que a coleta seletiva não deve deixar de ser realizada, conforme prega a Política Nacional de Resíduos Sólidos, 2010, o que poderia diminuir a viabilidade dessa técnica.

5.3. Trabalhos Futuros

Como foi levantado o interesse do município de Bauru pela tecnologia em estudo, recomenda-se que para trabalhos futuros seja realizada uma análise dos custos de operação e implantação do sistema a fim de verificar a viabilidade de implantação de uma unidade incineradora em Bauru. Ainda, em conjunto a esse trabalho, deve ser considerada a atividade de reciclagem, de forma a atender à Política Nacional de Resíduos Sólidos, de 2010.

Ainda, o presente estudo poderia ser aprimorado por meio da caracterização das cinzas para a estimativa de energia gerada na combustão do resíduo e, como já citado anteriormente, da elaboração de etapas experimentais prévias.

REFERÊNCIAS

ABNT, 2004. Associação Brasileira De Normas Técnicas - ABNT. Classificação de resíduos sólidos. NBR 10.004.

ABRELPE, 2013. “Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil”. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. São Paulo, SP, Brasil.

ANEEL, 2014. “Tarifas Residenciais Vigentes”. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=493>> Acesso em: 23 dez. 2014. 18:34:00.

Atlas ANEEL, 2014. “Atlas de Fatores de Conversão”. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_fatoresdeconversao_indice.pdf>, Acesso em: 23 dez. 2014. 17:28:00.

Basto Oliveira, L.; Miranda Reis, M.; Santos Pereira, A., 2000. *Resíduos Sólidos Urbanos: Lixo ou Combustível?* XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Bilitewski, B.; Härdtle, G.; Marek, K., 1997: Waste Management. Springer, Berlin, ISBN: 3-540-59210-5.

Bontoux, L.; 1999: The Incineration of Waste in Europe: Issues and Perspectives. European Commission Joint Research Centre.

Caixeta, D. M., 2005. Geração de Energia Elétrica a Partir da Incineração de Lixo Urbano: O Caso de Campo Grande/Ms. Tese de Especialização. Universidade de Brasília. Centro de Desenvolvimento Sustentável. Brasília, DF, Brasil.

EPE, 2008. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. “Avaliação Preliminar do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande”. Nota Técnica DEN 06/08. Rio de Janeiro, Brasil.

EPE, 2012. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. “Projeção da demanda de energia Elétrica para os próximos 10 anos (2013-2022)”. Série Estudos Da Demanda Nota Técnica Dea 22/12. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Henriques, R. M., 2004. Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Tecnológica. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Henriques, Rachel Martins; Basto Oliveira, L.; Oliveira da Costa, A., 2004. Geração de Energia com Resíduos Sólidos Urbanos Análise Custo Benefício.

IBGE, 2013. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística Sinopse preliminar do censo demográfico de São Paulo.

Industcards, 2013. "Power Plants Aroud the World". Disponível em: <<http://www.industcards.com>>, Acesso em: 10 ago. 2013. 19:34:00.

IPM, 2002. Histórico da Incineração no Brasil. Divisão de Sistemas e Métodos. São Paulo.

Logan, E., 1999. Thermodynamics Processes and Applications. Marcel Dekker, Inc.

Mavropoulos, A., 2010. "Thermal treatment in transition countries. Is there any future and how?" Seminário Internacional de Tecnologias e Gestão de Resíduos Sólidos, 1, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 26-28 Maio.

Menezes, R.; Menezes, M.; Gerlach Real, J., 2000. "Estágio Atual da Incineração no Brasil. Grupo Kompac Energia e Meio Ambiente". Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública, VII, ABLP - Associação Brasileira de Limpeza Pública. São Paulo, SP, Brasil.

MSPC, 2008. Ciclo de Rankine. Disponível em: <http://www.mspc.eng.br/termo/termod0540.shtml>, Acesso em: 18 set. 2013. 16:02:00.

Plastivida; ABRELPE, 2012. "Recuperação Energética, Resíduos Sólidos Urbanos". Caderno Informativo. Plastivida – Instituto Sócio-ambiental dos plásticos. ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais.

Poletto, J. A.; Silva, C. L., 2007. Influência da Separação de Resíduos Sólidos Urbanos para Fins de Reciclagem no Processo de Incineração com Geração de Energia. Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, 8º. Cusco, Peru.

PRB, 2013. *Plano de Resíduos de Bauru*. Disponível em: <http://www.bauru.sp.gov.br/secretarias/sec_meioambiente/plano_residuos.aspx>, Acesso em: 11 dez. 2014.18:37:00.

Riscado, A.; Badejo, L. 2010. "Teoria e Prática em Construções Sustentáveis no Brasil" SEA - Secretaria de Estado do Ambiente do Rio de Janeiro. Projeto CCPS. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Sener Ingeniería y Sistemas, S.A. 2011. Tecnologia de Alta Eficiência Aplicada ao Aproveitamento Energético de Resíduos.

Smith, J. M.; Van Ness, H. C., 1959. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. Segunda Edição. McGraw-Hill Book Company Inc.

Themelis, N. J., 2004. "An overview of the global waste-to-energy industry in Waste Management World". Disponível em: http://www.seas.columbia.edu/earth/papers/global_waste_to_energy.html, Acesso em: 23 dez. 2014. 19:06:00.

USINAVERDE, 2014. Disponível em: <<http://www.usinaverde.com.br>>, Acesso em: 20 dez. 13:50:00.

Van Caneghem, J.; Brems, A.; Lievens, P.; Block, C.; et al., 2012. Fluidized bed waste incinerators: Design, operational and environmental issues. Progress in Energy and Combustion Science. Heverlee, Bélgica.

WP, 2014. Ciclo de Rankine. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Rankine_cycle>, Acesso em: 20 dez. 2014. 15:07

WtERT, 2013. Combustion Processes. The Waste-to-Energy Research and Technology Council. Disponível em: <<http://www.wtert.eu/default.asp?Menu=12&ShowDok=20>>, Acesso em: 10 ago. 2013. 15:33:00

Yin, C.; Rosendahl, L.; Kaer, S., 2008. "Grate-firing of biomass for heat and power production". Progress in Energy and Combustion Science. Institute of Energy Technology, Aalborg University, DK-9220 Aalborg East, Dinamarca.

Anexo I - Plantas de Waste to Energy no Mundo

Alemanha										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Böblingen	Baden-Württemberg	Zweckverband Restmüllheizkraftwerk Böblingen	12	MW	1999	Resíduos	Steinmuller	140000	tpy	Filtros (baghouse), lavador de hidróxido de cálcio, e redução catalítica seletiva.
TREA Breisgau	Baden-Württemberg	EEW Energy from Waste GmbH	15	MW	2005	Resíduos	Von roll	150000	tpy	Precipitadores eletrostáticos, filtros (baghouse), lavador via úmida, e redução catalítica seletiva.
IGS Gersthofen	Baden-Württemberg	MVV Energiedienstleistungen	4,4	MW	2009	Resíduos	Wulff	-	-	-
Bielefeld	Nordrhein-Westfalen	MVA Bielefeld-Herford GmbH	20,4	MW	1981	Resíduos, lodo de esgoto	-	330000	tpy	-
MVA Flingern	Nordrhein-Westfalen	Mullverbrennungsanlage Dusseldorf	3,2	MW	1975	Resíduos	-	-	-	-
Heringen	Nordrhein-Westfalen	EEW Energy from Waste GmbH	30	MW	2009	Resíduos	-	300000	tpy	-
AVG Köln	Nordrhein-Westfalen	AVG Köln GmbH	56	MW	1998	Resíduos	-	420000	tpy	-
MHKW Karnap	Nordrhein-Westfalen	RWE Power	43	MW	1987	Resíduos	Deutsche Babcock	700000	tpy	-

Alemanha										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
RZH Herten	Nordrhein-Westfalen	AGR Unternehmensgruppe	29,8	MW	1982	Resíduos, resíduo industrial	Lurgi	-	-	-
EBS Knapsack	Nordrhein-Westfalen	EEW Energy from Waste GmbH	33,5	MW	2009	Resíduos	AE&E Inova, Sefako	240000	tpy	-
Wuppertal	Nordrhein-Westfalen	AWG Abfallwirtschaftsgesellschaft mbH Wuppertal	40	MW	1974	Resíduos, resíduos industriais	Lurgi	-	-	Sistema de grelhas do tipo roller, sistema Alstom com filtros (baghouse) e sistemas de carvão ativado.
EAB-EBS Bernburg	Sachsen & Sachsen-Anhalt	Energie Anlage Bernburg GmbH	35,7	MW	2010	Resíduos	Energoinstal	-	-	-
Lauta	Sachsen & Sachsen-Anhalt	TA Lauta	20	MW	2004	Resíduos	Alstom	-	-	-
MHKW Rothernsee	Sachsen & Sachsen-Anhalt	EEW Energy from Waste GmbH	70	MW	2006	Resíduos	Alstom	650000	tpy	-
Zorbau	Sachsen & Sachsen-Anhalt	SITA Deutschland	25	MW	2005	Resíduos	Von Roll, Podolsk	300000	tpy	-
Salzbergen	Sachsen & Sachsen-Anhalt	SRS EcoTherm GmbH	7,4	MW	2004	Resíduos	Alstom	360000	tpy	-
Augsburg	Bayern	AVA Abfallverwertung Augsburg GmbH	8,27	MW	1994	Resíduos	-	200000	tpy	Precipitador eletrostático, lavador de gás de 2 estágios, redução catalítica seletiva, e sistema de injeção de carvão ativado/filtro (baghouse) sistema

Alemanha										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Bamberg	Bayern	Mullheizkraftwerk Bamberg	7,2	MW	1982	Resíduos, resíduo de esgoto	Deutsche	-	-	-
Coburg	Bayern	Zweckverband für Abfallwirtschaft in Nordwest-Oberfranken	10,6	MW	1988	Resíduos	Martin	115000	tpy	-
Landshut	Bayern	MVA Landshut GmbH	3,43	MW	1989	Resíduos	Von Roll	-	-	-
Geiselbullach	Bayern	Mullheizkraftwerk Geiselbullach	6,5	MW	1985	Resíduos	Von Roll	-	-	-
Schweinfurt	Bayern	GKS - Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH	29	MW	1990	Resíduos	-	-	-	-
Weißenhorn	Bayern	Abfall-Wirtschaftsbetrieb des Landkreises Neu-Ulm	10	MW	1991	Resíduos	-	100000	tpy	-
EVI-Europark	Hamburg, Niedersachsen & Schleswig-Holstein	EVI Abfallverwertung BV & Co	60	MW	1998	Resíduos	Skoda	360000	tpy	-
AHKW Neunkirchen	Hamburg, Niedersachsen & Schleswig-Holstein	EEW Energy from Waste GmbH	12	MW	1998	Resíduos	Ansaldo	8,5	tph	Precipitadores eletrostáticos, filtros (baghouse), lavador via úmida, e catalisadores.

Alemanha										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Helmstedt	Hamburg, Niedersachsen & Schleswig-Holstein	EEW Energy from Waste GmbH	30	MW	1999	Resíduos	-	280000	tpy	-
MVA Hannover	Hamburg, Niedersachsen & Schleswig-Holstein	EEW Energy from Waste GmbH	27	MW	1997	Resíduos	-	-	-	-
Rugenburger Damm	Hamburg, Niedersachsen & Schleswig-Holstein	Mullverwertung Rugenberger Damm	29	MW	1973	Resíduos	-	-	-	-
Stapelfeld Rebuild	Hamburg, Niedersachsen & Schleswig-Holstein	eeW Energy from Waste GmbH	20	MW	1997	Resíduos	Alstom	350000	tpy	-
MVA Stelling Moor Damm	Hamburg, Niedersachsen & Schleswig-Holstein	Stadtreinigung Hamburg	22	MW	1973	Resíduos	Martin, Walther	-	-	-
Weener	Hamburg, Niedersachsen & Schleswig-Holstein	Weener Energie GmbH & Co KG	9,2	MW	2008	Resíduos	Baumgarte	140000	tpy	-
MHKW Bremen	Alemanha	swb AG	33	MW	2009	Resíduos	Baumbarte, ThyssenKrupp Xervon Energy	-	-	-
Großräschen	Babcock-Borsig	E.ON Energy from Waste AG	28	MW	2008	Resíduos	Inova	-	-	-
Industriepark Höchst	Alemanha	Thermal Conversion Compound	70	MW	2012	Resíduos	Ebara, Tlmace	670000	tpy	-

Alemanha										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
MHKW Offenbach	Alemanha	Energieversorgung Offenbach AG	11,8	MW	1970	Resíduos	Lurgi			-
Karlsruhe	Metropolitan Vickers	Thermoselect Südwest GmbH (EnBW)	12,7	MW	2002	Resíduos, gás de síntese	-	-	-	-
MHKW Pirmasens	Alemanha	EEW Energy from Waste GmbH	16	MW	1999	Resíduos	Von roll	180000	tpy	Precipitadores eletrostáticos, filtros (baghouse), lavador via seca e catalisadores.
Premnitz	Babcock-Borsig	EEW Energy from Waste GmbH	14	MW	2009	Resíduos	KAB Takuma	250000	tpy	-
Raba-Zast	Alemanha	ZAST - Zweckverband Abfallwirtschaft Sudwestthuringen	14	MW	2007	Resíduos	Martin	-	-	-
Schwedt	Babcock-Borsig	Kraftwerk Schwedt GmbH & Co KG	31	MW	2010	Resíduos, Resíduos de fábrica de papel	-	220000	tpy	-
Rudersdorf	Alemanha	Vattenfall Europe Waste-to-Energy GmbH	35,5	MW	2008	Resíduos	Fisia	260000	tpy	-
EBS-HKW Rostock	Metropolitan Vickers	Vattenfall Europe Waste-to-Energy GmbH	20	MW	2010	Resíduos	Takuma	230000	tpy	-
Stavenhagen	Metropolitan Vickers	Nehlsen Heizkraftwerke GmbH & Co KG	45	MW	2007	Resíduos	Baumgarte, Thyssen-Krupp-Xervon	95000	tpy	-
AVA Velsen	Alemanha	EEW Energy from Waste GmbH	21,5	MW	1997	Resíduos	Von roll	210000	tpy	Precipitadores eletrostáticos, filtros (baghouse), lavador via úmida, e sistemas de catalisadores.

Áustria										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
KVR	Austria	Kärntner Restmüllverwertungs GmbH	7	MW	1997	Resíduos	Martin	80000	tpy	-
Nikalsdorf	Austria	ENAGES Energie- und Abfallverwertungs Ges mbH	7,5	MW	2004	Resíduos	Austrian Energy	-	-	-
Pfaffenu	Austria	Wiener Kommunal-Umweltschutzprojektgesellschaft mbH	14	MW	2008	Resíduos	Von Roll	250000	tpy	-
Spittelau	Austria	Wienstrom	8	MW	1987	Resíduos	Biro	1200	tpd	-
Zistersdorf	Austria	ASA Abfall Service Zistersdorf GmbH	14	MW	2009	Resíduos	Hitachi-Zosen	135000	tpy	-
Zwentendorf/Dürnrohr	Austria	Abfallverwertung Niederösterreich Ges mbH	120	MW	2004	Resíduos	-	-	-	-

Bélgica										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Biosteam	West Flanders	Electrawinds NV	17,9	MW	2009	Resíduos	Standardkessel Baumgarte	135000	tpy	-
IVM	East Flanders	-	8,45	MW	2004	Resíduos	Volund	100000	tpy	-
Oostende	West Flanders	-	5,6	MW	1983	Resíduos	Seghers, Denaeyer	5,5	tph	Lavador de gases do tipo spray-dry e redução catalítica seletiva.
Pont-du-Loup	Hainaut	-	5,7	MW	138000	Resíduos	Laurent Bouillet Ingénierie	-	-	-

China										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Gaoantun	Beijing	Golden State Environment Corp	25	MW	2008	Resíduos	Takuma	1600	tpd	-
Hebei Lingda	Fujian	Hebei Lingda Environment-Friendly Energy Co Ltd	24	MW	2006	Resíduos	-	900	tpd	Leito fluidizado do tipo circulating
Hongmiaoling	Fujian	Chongqing Sanfeng Covanta Environmental Industry Co Ltd	24	MW	2007	Resíduos	-	1200	tpd	-
Likeng	Guangdong	Shenzhen Energy Group Co Ltd	22	MW	2006	Resíduos	Seghers	1040	tpd	-
Nanshan	Guangdong	Shenzhen Energy Environmental Engineering Co Ltd	12	MW	2004	Resíduos	Seghers	1600	tpd	Atomizadores rotativos à base de cal e sistemas de injeção de carvão ativado para o controle de emissões.
Shenzhen Baoan	Guangdong	Shenzhen Energy Group Co Ltd	60	MW	2005	Resíduos	Seghers, China Western Power	3000	tpd	-
Tongxing	Chongqing	Chongqing Sanfeng Covanta Environmental Industry Co	24	MW	2005	Resíduos	Martin, Chongqing Iron & Steel	1200	tpd	-

Dinamarca										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
AVV	North Jutland	AVV I/S	4,6	MW	1999	Resíduos	Asea Brown Boveri Stal	-	-	-
Esbjerg	Dinamarca	L90	18	MW	2003	Resíduos	Volund	-	-	-
Frederikshavn	North Jutland	Dong Energy A/S	2,5	MW	1994	Resíduos urbanos, madeira	-	-	-	-
Haderslev	Dinamarca	Dong Energy A/S	5,8	MW	1993	Resíduos	Kruger	-	-	-
Nordforbrænding	Dinamarca	I/S Nordforbrænding	8,9	MW	2000	Resíduos	-	-	-	-
REFA	Dinamarca	I/S REFA	6,7	MW	1996	Resíduos	Volund	-	-	-
Vejen	Dinamarca	Dong Energy A/S	2,5	MW	1990	Resíduos e palha	Volund	-	-	-

EUA										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Bristol	Connecticut & Massachusetts	Covanta Energy	16	MW	1988	Resíduos	Ogden Martin	-	-	Combustores do tipo waterwall, absorvedores do tipo spray dryer de cal, filtros (baghouse), redução não catalítica seletiva.
Haverhill	Connecticut & Massachusetts	Covanta Energy	48	MW	1989	Resíduos	Ogden Martin, Zurn	-	-	Sistema de lavadores de gás semi-seco de cal, filtros (baghouse) e sistemas de controle de mercúrio.
ReEnergy Sterling	Connecticut & Massachusetts	ReEnergy Holdings LLC	31,3	MW	1991	Pneus	Zurn	10 x 10 ⁶	pneus/ano	Precipitador eletrostático, lavador via úmida, condensador (arrefecimento de ar).

EUA										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Southeast Connecticut	Connecticut & Massachusetts	Covanta Energy	18	MW	1992	Resíduos	Deutsche Babcock	690	tpd	Sistema de grelhas Duesseldorf do tipo roller, lavadores via seca, filtros (baghouse), e sistemas de injeção de carvão ativado.
Wheelabrator Bridgeport	Connecticut & Massachusetts	Wheelabrator Technologies Inc	67	MW	1988	Resíduos, gás natural	Von Roll	2250	tpd	Sistema de grelhas do tipo reciprocating e sistemas de coletores de metais ferrosos e não ferrosos, lavadores via seca, filtros (baghouse), redução não catalítica seletiva.
Wheelabrator North Andover	Connecticut & Massachusetts	Wheelabrator Technologies Inc	40	MW	1985	Resíduos	Riley Stoker	1500	tpd	-
Wheelabrator Millbury	Connecticut & Massachusetts	Wheelabrator Technologies Inc	46	MW	1988	Resíduos	Von Roll	1500	tpd	-
Wheelabrator Lisbon	Connecticut & Massachusetts	Wheelabrator Technologies Inc	15	MW	1992	Resíduos		500	tpd	-
Wheelabrator Saugus	Connecticut & Massachusetts	Wheelabrator Technologies Inc	38	MW	1975	Resíduos	Von Roll	1500	tpd	-
Hennepin	Minnesota & Wisconsin	Covanta Energy	38	MW	1989	Resíduos	Distral	365000	tpy	-
Red Wing	Minnesota & Wisconsin	Xcel Energy	23	MW	1949	Resíduos	-	200000	tpy	Lavador via seca de cal e filtro (baghouse)
Delaware Valley	Pennsylvania	Covanta Energy	90	MW	1991	Resíduos	-	-	-	Lavador via seca e filtro (baghouse).
Wheelabrator Falls	Pennsylvania	Wheelabrator Technologies Inc	53	MW	1994	Resíduos	Von Roll	1500	tpd	-

EUA										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Lancaster	Pennsylvania	Covanta Energy	35,7	MW	1991	Resíduos	Ogden Martin	-	-	Sistema de grelhas do tipo reverse-reciprocating, lavadores de gases de combustão semi-secos de cal, filtros (baghouse), e sistemas de controle de NOX e mercúrio
Lake County	Florida	Covanta Energy	14,5	MW	1991	Resíduos	Zurn	530	tpd	Sistema waterwall, sistema de grelhas do tipo reverse-reciprocating, lavadores semi-secos de cal, filtros (baghouse), e sistema de controle de mercúrio.
North County RRF	Florida	Palm Beach Resource Recovery Corp	62	MW	1989	Resíduos	-	2000	tpd	-
Wheelabrator Ridge	Florida	Wheelabrator Technologies	50	MW	1994	Madeira, pneus, gás de aterro	Zurn	285000	tpy	Sistema de grelhas do tipo traveling, lavador via seca de cal e filtro (baghouse).
Wheelabrator South Broward	Florida	Wheelabrator Technologies	66	MW	1991	Resíduos, gás natural	Von Roll	2250	tpd	-
Babylon	Nova Iorque	Covanta Energy	17	MW	1989	Resíduos	Martin, Zurn	750	tpd	Lavadores via seca, filtros (baghouse), e sistema de controle de mercúrio.
Camden	Nova Jersey	Camden County Energy Recovery Corp	34	MW	1989	Resíduos	Foster Wheeler	1050	tpd	-
Essex	Nova Jersey	Covanta Energy	70	MW	1990	Resíduos	Foster Wheeler	-	-	Sistema de grelhas Duesseldorf do tipo roller, precipitadores eletrostáticos, sistema de lavadores do tipo spray dry.

EUA										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Huntington	Nova Iorque	Covanta Energy	25	MW	1991	Resíduos	Distral	-	-	Tecnologia waterwall, sistema de grelhas do tipo reverse reciprocating, lavadores via seca, filtros de tecido, sistema de controle de mercúrio.
Hempstead	Nova Iorque	Covanta Energy	72	MW	1989	Resíduos	Riley Stoker	-	-	Sistema de grelhas do tipo roller, lavadores via seca, filtros de tecido, e redução não catalítica seletiva.
Gloucester County	Nova Jersey	Wheelabrator Technologies	14	MW	1989	Resíduos	Von Roll	575	tpd	Filtros (baghouse), lavadores via seca, e redução não catalítica seletiva.
Niagara	Nova York	Covanta Energy	50	MW	1980	Resíduos	Foster Wheeler	800000	tpy	-
Onondaga	Nova York	Covanta Energy	39,5	MW	1995	Resíduos	Ogden Martin	-	-	Sistema de grelhas do tipo reverse-reciprocating, lavadores semi-secos de cal, filtros (baghouse), redução não catalítica seletiva, sistema de controle de mercúrio
Union County	Nova Jersey	Covanta Energy	44	MW	-	Resíduos	Distral, Ogden Martin	-	-	Sistema de grelhas do tipo reverse-reciprocating, lavadores semi-secos de cal, filtros (baghouse), e sistema de controle de NOX e mercúrio.
Wheelabrator Westchester	Nova York	Wheelabrator Technologies Inc	60	MW	1984	Resíduos	Von Roll	2250	tpd	-
Wheelabrator Hudson Falls	Nova York	Wheelabrator Technologies Inc	15	MW	1992	Resíduos	-	500	tpd	-
Warren County	Nova Jersey	Covanta Energy	18	MW	1988	Resíduos	Distral	-	-	Lavadores semi-secos de cal, filtros (baghouse)

EUA										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Alexandria	Estados Unidos	Covanta Energy	23	MW	1988	Resíduos urbanos	Martin, Keeler Dorr Oliver	-	-	-
Fairfax	Estados Unidos	Covanta Energy	124	MW	1990	Resíduos urbanos	Ogden Martin, Zurn	-	-	Grelha do tipo reciprocating, sistema waterwall, auxiliares de queima. Sistemas de redução não catalítica seletiva, lavadores semi-secos de cal, filtros e injeção de carvão ativado.
Ford Heights	Estados Unidos	KTI Inc	24	MW	1996	Combustíveis derivados de pneus	Zurn	-	-	-
Huntsville	Estados Unidos	Covanta Energy	-	-	1990	Resíduos urbanos, lodo de esgoto, gás de aterro, gás natural	-	-	-	Sistema waterwall com grelhas do tipo reverse-reciprocating (Martin), lavadores de cal semi-secos, sistema de controle de poluição atmosférica, filtros (baghouse), e outros controles.
Marion County	Estados Unidos	Covanta Energy	13,1	MW	1987	Resíduos urbanos, material médico	Ogden Martin	-	-	Sistema waterwall com grelhas do tipo reverse-reciprocating, lavadores de cal semi-secos e sistema de controle de poluição atmosférica (filtro (baghouse)s) para controle de gases ácidos e partículas.
Kent County	Estados Unidos	Covanta Energy	18	MW	1990	Resíduos urbanos	Martin, Keeler Dorr Oliver	-	-	Sistema waterwall com grelhas do tipo reverse-reciprocating (Martin), lavadores semi-secos de cal, filtros, sistemas de redução não catalítica seletiva, e injeção de carvão ativado para controle de mercúrio.
Indianapolis	Estados Unidos	Covanta Energy	-	-	1990	Resíduos urbanos	Martin	2175	tpd	Grelha do tipo reciprocating, lavadores semi-secos de cal, sistema de controle de poluição atmosférica (filtro (baghouse)s) e sistemas de controle de NOX e mercúrio

EUA										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Stanislaus County	Estados Unidos	Covanta Energy	24	MW	1998	Resíduos urbanos	Odge Martin, Zurn	-	-	Grelha do tipo reverse-reciprocating, lavadores semi-secos de cal, sistema de controle de poluição atmosférica, filtros (baghouse), sistemas de controle de NOX e mercúrio.
Wheelabrator Claremont	Estados Unidos	Wheelabrator Technologies Inc	5	MW	1987	Resíduos urbanos, gás liquefeito de petróleo	KDO, Von Roll	200	tpd	-
Wheelabrator Concord	Estados Unidos	Wheelabrator Technologies Inc	14	MW	1989	Resíduos urbanos, gás liquefeito de petróleo	B&W, Von Roll	-	-	-
Wheelabrator Spokane	Estados Unidos	Wheelabrator Technologies Inc	26	MW	1991	Resíduos urbanos	B&W, Von Roll	1500	tpd	-
Wheelabrator Portsmouth	Estados Unidos	Wheelabrator Technologies Inc	60	MW	1987	Resíduos urbanos	Combustion Engeneering	2000	tpd	-

Europa - outros										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Spalovna Bratislava	Eslováquia	Odvoz a Likvidacia Odpadu (OLO)	6,3	MW	2002	Resíduos	CKD Praha	-	-	-
CTRA	Andorra	Centre Tractament Residus d'Adorra S.A	18,6	MW	2006	Resíduos	Leroux	60000	tpy	-
Kalka	Iceland	Kalka hf	0,47	MW	2004	Resíduos		-	-	-

Europa - outros										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Leudelange	Luxemburgo	EEW Energy from Waste GmbH	15,3	MW	2010	Resíduos	Von Roll	150000	tpy	-
Korkeakoski	Finlandia	Kotkan Energia Ou	8,6	MW	2008	Resíduos	Seghers	300	tpd	Filtro (baghouse) Alstom, sistema lavador e redução não catalítica seletiva.
Klaipeda	Lituania	Fortum Heat Lietuva UAB	20	MW	2013	Resíduos	Fisia Babcock	-	-	-
Rákospalota	Hungria	FKF Rt	24	MW	1981	Resíduos	Lentjes	-	-	-
Mustasaari	Finlandia	Westenergy Ou Ab	15	MW	2013	Resíduos	Hitachi Zosen Inova	20000	kg/hr	-
Meath	Irlanda	Indaber Ireland	16	MW	2011	Resíduos	B&W Volund	-	-	Filtro (baghouse) e lavador via úmida.
Riihimäki	Finlandia	Ekokem Ou AB	10	MW	2007	Resíduos	Fisia	-	-	-
Spalovna Košice	Eslováquia	Kosit as	17,4	MW	1989	Resíduos	CKD Praha	-	-	-
Sako Brno	República Tcheca	Sako Brno as	21,5	MW	2010	Resíduos		248000	tpy	-
ZEVO	República Tcheca	Prazske Sluzby as	17,4	MW	2010	Resíduos	CKD Praha	-	-	-
Termizo	República Tcheca	Termizo as	2,5	MW	1999	Resíduos	Von Roll	96000	tpy	-

França										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Bissy	Chambery	SCDC Chambery	2,7	MW	1996	Resíduos	Sogea, Fire Power	-	-	-

França										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Calce	Pyrénées-Orientales	CYDEL	21,6	MW	2003	Resíduos, lodo de esgoto e resíduos hospitalares	-	209000	tpy	-
Douchy-les-Mines	Nord	Tiru	6	MW	2004	Resíduos	Martin, Leroux & Lotz	88000	tpy	-
Gien	France	Tiru	5,5	MW	1997	Resíduos, lodo de esgoto e resíduos hospitalares	Holter, Ebara	80000	tpy	Leito fluidizado ROWITEC, absorvedor de pulverização, e filtro de tecido.
Isséane	Paris	SYCTOM	50	MW	2007	Resíduos	Von Roll	460000	tpy	-
Ivry Paris XIII	Paris	Tiru	63	MW	1969	Resíduos	Martin	690	tpy	Tecnologia de grelhas
Noidan-le-Ferroux	Haute-Saone	Tiru	3,1	MW	2007	Resíduos	Leroux & Lotz	41000	tpy	-
Pontex-les-Forge	Landes	Tiru	2,4	MW	1997	Resíduos	Cyclergie, Leroux & Lotz	40000	tpy	-
Sausheim	Haut-Rhin	SIVOM Mulhouse	13	MW	1999	Resíduos, lodo de esgoto	Lurgi, Alstom	-	-	Leito fluidizado ROWITEC, ciclones, precipitadores eletrostáticos, e sistemas de limpeza via úmida dos gases de combustão.
Smitom	Bas-Rhin	SMITOM de Haguenau-Saverne	3	MW	2002	Resíduos	Itisa	80000	tpy	-
St-Ouen	Sine-St-Denis	Tiru	10	MW	1990	Resíduos	Cyclergie, Leroux & Lotz	630000	tpy	-
Sonirval Nevers	Nievre	Veolia Proprete	3,3	MW	2002	Resíduos	Volund	-	-	Leito fluidizado ROWITEC, ciclones, precipitadores eletrostáticos e sistemas de limpeza via úmida dos gases de combustão.
Strasbourg	Bas-Rhin	Tiru	22	MW	1995	Resíduos	Von Roll	350000	tpy	-
Valeciennes (Saint-Saulve)	Nord	Tiru	15	MW	1977	Resíduos	Martin	132000	tpy	-
Villefrance-sur-Saone	Rhone	Tiru	6,15	MW	2002	Resíduos	Martin	-	-	-

Holanda										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
AVI Amsterdam HR Centrale	Holanda	Afval Energie Bedrijf	74	MW	2007	Resíduos	Martin	530000	tpy	-
AVR Rozenburg	Holanda	AVR Holding	54,7	MW	1972	Resíduos	Durr	-	-	-
Delfzijl	Holanda	E.ON Energy from Waste	11	MW	2010	Resíduos	AE&E Inova	275000	tpy	-
SITA ReEnergy Roosendaal	Holanda	SITA Nederland	32	MW	2011	Resíduos	Hitachi-Zosen Inova	290000	tpy	-
REC Harlingen	Holanda	Afvalsturing Friesland NV (Omrin)	17	MW	2011	Resíduos, gás natural	AE&E Lentjes	230000	tpy	-
Hengelo	Holanda	Twence bv	26	MW	1997	Resíduos	Stork	-	-	-
EM Wijster	Holanda	Essent Milieu	48	MW	1996	Resíduos	Lurgi	-	-	Sistema de grelhas do tipo reciprocating com refrigeração a água, precipitador eletrostático, tecnologia spray dryer, filtro (baghouse), lavador de dois estágios e catalisador de oxidação de dois estágios.

Itália										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Arezzo	Tuscany	-	2,9	MW	2004	Resíduos	-	175000	tpy	-
Bergamo	Lombardy	-	10,7	MW	1988	Resíduos	Energy Products	-	-	-
Brescia	Lombardy	-	75	MW	1988	Resíduos, biomassa	Martin, Ansaldo	801000	tpy	-
Forli-Cesena	Emilia-Romagna	Hera Ambiente SpA	10,5	MW	2008	Resíduos	Jackob Stiefel	-	-	-

Itália										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Ferrara	Emilia-Romagna	Hera Ambiente SpA	13	MW	2008	Resíduos	Jackob Stiefel	-	-	-
Corteolona	Lombardy	Ecodeco	9	MW	2003	Resíduos	-	-	-	-
Frullo Granarolo	Emilia-Romagna	Frullo Energia Ambiente Srl	22	MW	2004	Resíduos, biomassa	-	-	-	Lavador de bicarbonato com injeção de carvão ativado, filtro (baghouse), e redução catalítica seletiva.
Rimini Coriano	Emilia-Romagna	Hera Ambiente SpA	10,3	MW	2007	Resíduos	De Bartolomeis	-	-	-
Piestrasanta	Tuscany	Veolia Servizi Ambientali SpA	6,3	MW	2002	Resíduos	-	-	-	Leito fluidizado do tipo circulating
Parma WTE	(Emilia-Romagna)	Iren Emilia	12,5	MW	2013	Resíduos	Ruths	130000	tpy	-
Tecnoborgo (Piacenza)	Emilia-Romagna	Tecnoborgo SpA	11,63	MW	2002	Resíduos	Martin	120000	tpy	-
Silea Lecco	Lombardy	Silea SpA	14	MW	2006	Resíduos	Sices	65000	tpy	-
Trezzo sull'Adda	Lombardy	Actelios SpA	18	MW	2002	Resíduos	Von Roll	-	-	-
Vercelli	Piedmont	Veolia Servizi Ambientali SpA	3,5	MW	1997	Resíduos	-	-	-	-

Japão										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Adachi	Tokyo	Clean Association of Tokyo 23	16,2	MW	-	Resíduos	-	-	-	Sistema Ebara HPCC21, com grelhas horizontais em degraus e forno de fusão de cinzas de plasma.
Ariake	Tokyo	Clean Association of Tokyo 23	5,6	MW	-	Resíduos	-	-	-	-

Japão										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Chiba	Japão	JFE Holdings	1,5	MW	1999	Resíduos	-	-	-	-
Mutsu	Aomori	Mitsubishi Materials Corp	2,4	MW	2003	Resíduos e gás de síntese	-	-	-	-
Chitose	Tokyo	Clean Association of Tokyo 23	12	MW	-	Resíduos	Kawasaki	-	-	-
Nobeoka City	Fukuoka	Nobeoka City	2,15	MW	2009	Resíduos	Eckrohrkessel	-	-	-
Shin-Moji	Fukuoka	Kitakyusu City Environment Bureau	23,5	MW	2007	Resíduos	Nippon Steel & Sumikin Engineering Co Ltd	600 - 720	tpd	Gaseificação de leito fluidizado e sistemas diretos de fusão
Tobu	Fukuoka	Fukuoka Clean Energy Corp	29,2	MW	2005	Resíduos	Kawasaki	900	tpd	-
Tokyo Waterfront Recycle	Tokyo	Tokyo Waterfront Recycle Power Co Ltd	23	MW	2006	Resíduos	Ebara	550	tpd	Gaseificação de leito fluidizado TwinRec e linhas de fusão da cinzas
Maishima	Osaka	Osaka City Environmental Protection Bureau	32	MW	2001	Resíduos	Von Roll	900	tpd	-

Noruega										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Alesund	More og Romsdal	Tafjord Kraftvärme AS	4,1	MW	2009	Resíduos	Volund	-	-	-
Bergen	Hordaland	BiR Bergen	11,9	MW	1999	Resíduos	Van Roll	-	-	-
Brobekk	Oslo	Oslo Energigjenvinningsetaten	Heat	MW	1967	Resíduos	-	100000	tpy	-
Klemetsrud Phase I	Oslo	Oslo Energigjenvinningsetaten	10,65	MW	1986	Resíduos	-	150000	tpy	-

Noruega										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Frevar	Ostfold	Frevar - Fredrikstad Vann, Avløp og Renovasjonsforetak	1	MW	1984	Resíduos	Enertec	-	-	-
Returkraft	Vest-Agder	Returkraft AS	14,3	MW	2010	Resíduos	Fisia-Babcock	130000	tpy	-
Trehørningen	Hedmark	Eidsiva	5	MW	2011	Resíduos	Volund	9	tph	-

Outros lugares										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Baky WTE	Azerbaijão	CNIM Azerbaijan Ltd	37	MW	2012	Resíduos	Martin	500000	tpy	-
CACEM UTVD	French West Indies	Martiniquaise de Valorisation	7,2	MW	2002	Resíduos	Vinci	112000	tpy	-
MSZ - 3	Russia	EVN-Ekotechprom MSZ 3	10,9	MW	2007	Resíduos	Standardkessel, Podoloski	360000	tpy	-
La Colette	Jersey	Jersey Transport and Technical Services	10,2	MW	2011	Resíduos	-	-	-	-
Kajang	Malásia	Recycle Energy Sdn Bhd	8,9	MW	2009	Resíduos	Shin	1100	tpd	-
Qatar DSWMC	Catar	Keppel Seghers	40	MW	2011	Resíduos	Keppel Seghers	15000	tpd	-
Kyiv Energia	Ucrania	Kyivenergo	heat	MW	2001	Resíduos	CKD Dukla	-	-	-
Shadnagar	India	Selco International Ltd	6,6	MW	2003	Resíduos	Walchandnagar	-	-	-

Outros lugares										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Tuas South	Singapura	National Environment Agency	46	MW	1986	Resíduos	-	-	-	-
Tuas	Singapura	Keppel Seghers	30	MW	2009	Resíduos	Keppel Seghers, Shanghai	800	tpd	-
St-Barthelemy	French West Indies	Ouanalao Environnement AS	-	-	2001	Resíduos	Bouillet	36	tpd	-

Portugal e Espanha										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
La Coruna	Espanha	Soc Galega do Medio Ambientehas	49	MW	1999	Resíduos	Kvaerner	-	-	Leito fluidizado do tipo bubbling
Lipor	Portugal	Lipor	25	MW	1999	Resíduos	Lurgi	-	-	-
Madeira	Portugal	ETRSU Madeira	8,1	MW	2003	Resíduos	-	-	-	Lavador semi-seco e redução não catalítica seletiva.
Valorsul	Portugal	Valorsul S.A	50	MW	1999	Resíduos	-	-	-	Filtro (baghouse), lavador semi-seco e redução não catalítica seletiva.
Tirmadrid	Espanha	Urbaeneregia S.A	29	MW	1996	Resíduos	Vulcan Sadeco, Lurgi	1200	tpd	-
Mataro	Espanha	Tractament i Revaloritzacio de Residus del Maresme SA (TRM)	11,6	MW	1994	Resíduos	-	160000	tpy	-

Reino Unido										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Allington Quarry	Kent	Kent Enviropower Ltd	51	MW	2007	Resíduos	Lurgi	50000	tpy	-
Bolton	Lancashire	Greater Manchester Waste Ltd	10	MW	2000	Resíduos	Volund	120000	tpy	-
Chineham	Hampshire	Veolia ES Hampshire Ltd	8	MW	2003	Resíduos		90000	tpy	-
Grimsby	Lincolnshire	NewLincs Development Ltd	3,45	MW	2004	Resíduos	Bouillet	56000	tpy	-
Dudley	Staffordshire	Dudley Waste Services Ltd	7,4	MW	1998	Resíduos		90000	tpy	-
Lerwick	Shetland Islands	Shetland Heat Energy and Power Ltd	-	-	1999	Resíduos	-	22000	tpy	-
Marchwood	Hampshire	Veolia ES Hampshire Ltd	14	MW	2004	Resíduos	-	165000	tpy	-
Portsmouth	Hampshire	Veolia ES Hampshire Ltd	14	MW	2005	Resíduos	-	165000	tpy	-
SELCHP	Middlesex	Onyx Selchp	31	MW	1994	Resíduos	Steinmuller	420000	tpy	-
Riverside	Kent	Cory Environmental Ltd	80	MW	2011	Resíduos	Von Roll Inova	500000	tpy	-
Richmod Hill	Isle od Man	SITA Waste (IOM) Ltd	6,7	MW	2004	Resíduos	-	-	-	-
Teeside WTE	Durham	SITA UK	19,2	MW	1998	Resíduos	Volund	250000	tpy	-
Thetford	Norfolk	Fibrothetford Ltd	38,5	MW	1998	Restos de frango	Detroit Stoker	400000	tpy	-
Tyseley	Warwickshire	Veolia Environmental Services	28	MW	1996	Resíduos	Steinmuller	350000	tpy	-
Westfield	Fife	Energy Power Resources Ltd	11,8	MW	2000	Restos de frango	Austrian Energy	110000	tpy	-

Suécia										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Dåva-1	Västerbotten	Umeå Energi	12	MW	2000	Resíduos	Von Roll, Gotaverken	175000	tpy	-
Filbornaverket	Skane	Öresundskraft AB	20	MW	2013	Resíduos	Volund	160000	tpy	-
Sävenäs	Västra Götland	Renova AB	32	MW	1994	Resíduos	Von Roll	460000	tpy	Precipitador eletrostatico, sistema de condensação para limpeza de gases de combustão e filtro de tecido.
Kumla-2	Sodermanlands	SAKAB AB	7,8	MW	2003	Resíduos	Seeghers	-	-	Sistema de grelhas
Kiruma	Norbotten	Tekniska Verken i Kiruna AB	9,4	MW	2000	Resíduos, turfa e madeira	Volund	70000	tpy	-
Sjölunda	Skåne	Sydvastra Skanes Avfallsaktiebolag	26	MW	2003	Resíduos	Martin	400000	tpy	-
Skövde	Västra Götland	Skövde Värme AB	1,8	MW	2005	Resíduos	Volund	-	-	-
Uppsala Block 5	Uppland	Vattenfall Värme Uppsala AB	-	-	2005	Resíduos	Von Roll	-	-	-
Torsvik	Jönköping	Jönköping Energi AB	13	MW	2006	Resíduos	Fisia Babcock	160000	tpy	Sistema de controle de poluição atmosférica Alstom. filtro (baghouse), sistema com injeção de carvão ativado, lavador via úmida, e condensador de gases de combustão.

Suíça										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
KVA Basel	Basel	Industrielle Werke Basel	17,2	MW	1999	Resíduos	Enertech	-	-	-
KVA Buchs	Aargau	KVA Buchs AG	11	MW	1995	Resíduos	MartinWehrle-Werk AG	-	-	-
Chaux-de-Fonds New	Neuchâtel	Vadec S.A	2,5	MW	1994	Resíduos	Enertech	-	-	-
KVA Forsthaus West	Bern	Energie Wasser Bern	91	MW	2012	Resíduos, gás natural, madeira	Martin, Bertsch	-	-	-
Colombier	Neuchâtel	Vadec S.A	6	MW	1996	Resíduos	SEU Schenkel	-	-	-
Kirchberg	St-Gallen	Zweckverband Abfallverwertung Bazenheid	2,3	MW	1984	Resíduos		-	-	-
Saidef	Fribourg	Saidef	10	MW	1999	Resíduos	Enertech	-	-	-
KVA St Gallen	St-Gallen	Kehrichtheizkraftwerk St Gallen	5,75	MW	1987	Resíduos	Enertech	-	-	-

Taiwan										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Chiayi	Chiayi	Onyx Ta-Ho Environmental Services Co	2,3	MW	2001	Resíduos	Volund	-	-	-
Lutsao	Kaohsiung	Onyx Ta-Ho Environmental Services Co	21,5	MW	2001	Resíduos	Alstom, China Steel Corp	-	-	-

Taiwan										
Nome	Localização	Operador	Configuração		Operação	Combustível	Fornecedor do sistema Boiler/Incinerador	Capacidade Nominal		Tecnologias
Neihu	Taipei	Taipei City Department of Environmental Protection	6	MW	1992	Resíduos	Takuma	900	tpd	-
Taichung	Taichung	Onyx Ta-Ho Environmental Services Co	13	MW	1997	Resíduos	-	-	-	-
Peitou	Taipei	Taipei City Department of Environmental Protection	48	MW	1999	Resíduos	Von Roll	-	-	-
Pali	Taipei	Onyx Ta-Ho Environmental Services Co	36	MW	2001	Resíduos	Volund	57	tph	-
Taoyuan South	Taoyuan	Hsin Yung Enterprise Corp	40	MW	2001	Resíduos	Lurgi	1.350	tpd	Leito do tipo roller-grate
Yongkang	Tainan	Onyx Ta-Ho Environmental Services Co	24,75	MW	2008	Resíduos	Steinmuller	280000	tpy	-

(Adaptado de Idustcards, 2013)

Legenda:	tph	toneladas por hora
	tpd	toneladas por dia
	tpy	toneladas por ano