



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

PROJETO DE FORMATURA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO PRÉVIO DE VIABILIDADE  
ECONÔMICA E ENERGÉTICA PARA  
IMPLANTAÇÃO DE USINA DE  
INCINERAÇÃO PARA RESÍDUOS SÓLIDOS  
URBANOS NO BRASIL**

AUTOR: MARCELO LOPES FREIRE

ORIENTADOR: VALDIR SCHALCH

São Carlos

2013



**Marcelo Lopes Freire**

**ESTUDO PRÉVIO DE VIABILIDADE  
ECONÔMICA E ENERGÉTICA PARA  
IMPLANTAÇÃO DE USINA DE  
INCINERAÇÃO PARA RESÍDUOS  
SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola de Engenharia de  
São Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica

ORIENTADOR: Valdir Schalch

São Carlos

2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

F866e Freire, Marcelo  
ESTUDO PRÉVIO DE VIABILIDADE ECONÔMICA E ENERGÉTICA  
PARA IMPLANTAÇÃO DE USINA DE INCINERAÇÃO PARA RESÍDUOS  
SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL / Marcelo Freire; orientador  
Valdir Schalch. São Carlos, .

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São  
Carlos da Universidade de São Paulo, .

1. Resíduos Sólidos Urbanos. 2. Incineração. 3.  
Recuperação de Energia. 4. Gerenciamento de Resíduos.  
I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Marcelo Lopes Freire

Título: “Estudo de viabilidade econômica e energética para implantação de usina de incineração para resíduos sólidos urbanos no Brasil”

*Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 17/06/2013,*

*com NOTA 7,8 (SETE, OITO), pela Comissão Julgadora:*

*Prof. Associado Valdir Schalch (orientador)  
SHS/EESC/USP*

*Prof. Assistente Carlos Goldenberg - SEL/EESC/USP*

*Mestre Marco Aurélio Soares de Castro - (Doutorando -  
SHS/EESC/USP)*

*Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado Homero Schiabel*

## **Agradecimentos**

Primeiramente agradeço a Deus, pela luz da sabedoria concedida.

A meus pais, Valter e Marilda, exemplos de força e determinação e que não mediram esforços para estudar seus filhos.

A meus irmãos, Juliana e Tiago, pelo convívio tão harmonioso todos esses anos e pelo incentivo nas tomadas de decisão.

A meus avós, meus tios e primos, por sempre estarem presentes e se preocuparem com meu futuro.

Ao professor Valdir Schalch, pelas brilhantes idéias, pela dedicação e pelo incentivo com o trabalho.

Aos meus amigos de Olímpia, pelos anos de amizade e compartilhamento de ideais.

A meus amigos de faculdade, pelos anos de convivência, pelos estudos na madrugada e pela força na jornada acadêmica.

## Índice de Figuras

Figura 1 - Divisão quanto à origem dos resíduos sólidos .....	17
Figura 2 - Divisão quanto à periculosidade dos resíduos sólidos.....	18
Figura 3 - Responsabilidade pelo gerenciamento dos resíduos.....	19
Figura 4 - Fluxo de gerenciamento do resíduo sólido .....	21
Figura 5 - Etapas de uma Usina de Incineração .....	31
Figura 6 - Processo de recuperação energética .....	35
Figura 7 - Disposição dos Resíduos Sólidos por estados nos EUA.....	37
Figura 8 - Participação dos países da Europa na Recuperação, Aterramento e Incineração de Resíduos.....	41
Figura 9 - Diagrama de blocos do ciclo do resíduo após a coleta seletiva .....	45
Figura 10 - Usina de Incineração (parte I).....	47
Figura 11 - Usina de Incineração (parte II).....	48
Figura 12 - Fases para implantação de uma usina de incineração.....	49
Figura 13 - Gráfico: Capacidade da Planta x Custo de Investimento .....	52
Figura 14 - Gráfico: Capacidade da Planta x Custo de Manutenção.....	53
Figura 15 - Energia produzida e valor arrecadado em função do poder calorífico .....	54
Figura 16 - Gráfico de custos líquidos para implantação de uma usina de incineração.....	54
Figura 17 - Potência de Saída para modelos de turbina Siemens .....	57
Figura 18 - Potência de saída para modelos de turbina Siemens.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 19 - Turbina SST-110 Siemens .....	58
Figura 20 - Turbina SST-111 Siemens .....	59

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Composição dos Resíduos Sólidos em 2011 .....	22
Tabela 2 - Destinação final dos RSU Coletados em 2011.....	22
Tabela 3 - Natureza do Serviço de Manejo de Resíduos Sólidos .....	23
Tabela 4 - Unidade de Destino dos Resíduos Domiciliares e/ou Públicos .....	23
Tabela 5 - Quantidade de Resíduos Coletados e/ou Recebidos por dia em cada Unidade de Destino.....	24
Tabela 6 - Capacidade de tratamento e produção de energia em Usinas de Incineração .....	32
Tabela 7 - Características da incineração em países desenvolvidos .....	33
Tabela 8 - Participação das energias renováveis dos Estados Unidos.....	38
Tabela 9 - Plantas de Incineração na Europa.....	40
Tabela 10 - Cálculo da população mínima para viabilidade de uma usina de incineração .....	55
Tabela 11 - Cálculo da Potência para o Pior e Melhor Caso .....	56
Tabela 12 - Especificação da turbina selecionada para mínimo custo de instalação ...	58
Tabela 13 - Especificação da turbina selecionada para projetos maiores .....	60

## **Lista de Siglas**

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ISWA – International Solid Waste Association

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

GDL – Gas Diffusion Layer

GNV – Gás Natural Veicular

RSU – Resíduo Sólido Urbano

PCI – Poder Calorífico Inferior

WTE – Waste-to-Energy

## Sumário

1. Introdução.....	11
2. Revisão Bibliográfica .....	13
2.1 Histórico .....	13
2.2 Definições.....	15
3. O Aproveitamento Energético .....	25
3.1 Aterros Sanitários.....	26
3.1.1 Gaseificação .....	26
3.1.2 Pirólise.....	27
3.2 Incineração.....	29
3.3 O processo de recuperação energética.....	33
3.4 A incineração em um contexto internacional .....	36
3.5 Caso São Bernardo.....	41
4. Métodos e Resultados .....	44
4.1 Processo proposto.....	44
4.2 Plano Governamental de Instalação de uma Usina de Incineração .....	49
4.3 Estudo de Viabilidade Energética e Econômica.....	51
4.4 Estudo aplicado ao Brasil .....	55
4.4.1 População Mínima para a implantação da usina .....	55
4.4.2 Gasto para implantação de uma usina de incineração considerando a população mínima .....	55
4.4.3 A escolha da Turbina Ideal na Usina.....	56
5. Conclusão.....	61
Bibliografia.....	62

## **Resumo**

No Brasil, o PNRS aponta que a aplicabilidade da incineração seja considerada nos modelos de gestão e gerenciamento de resíduos. Após o governo ter ratificado através do Plano Nacional de Resíduos Sólidos que, após o dia 2 de agosto de 2014, o Brasil não poderá ter mais lixões, cidades em todo o país estão buscando soluções ambientalmente corretas para a gestão de seus resíduos. Este trabalho tem por objetivo mostrar a incineração como alternativa para tratamento de resíduos sólidos urbanos em grandes cidades do país, explanar as etapas e processos de uma usina de incineração, esboçar as fases do plano governamental para implantação de novas usinas para resíduos urbanos e também apresentar um estudo prévio de viabilidade para a aplicação em cidades brasileiras.

**Palavras-Chave:** resíduos sólidos urbanos, incineração, recuperação de energia, gestão e gerenciamento de resíduos sólidos.

## **Abstract**

In Brazil, the solid waste national policy established that the applicability of incineration plants must be considered in solid waste management models. After the government ratified by the National Solid Waste Plan that, after 2014 August 02, Brazil cannot have more dumps, the cities across the country are seeking environmentally correct solutions for the management of their waste. This work aims to show incineration as a alternative of urban solid waste treatment in big cities, the steps and processes of a new incineration plant, sketch out the phases of government plan for deployment of new plants for municipal waste and also report a feasibility study to implement in Brazil.

**Key-words:** urban solid waste, incineration, energetic recovery, solid waste management

## 1. Introdução

A busca pelo desenvolvimento sustentável veio à tona no fim do século XX, quando se percebeu o desequilíbrio entre as atividades humanas e natureza em meio ao processo de urbanização. A situação agravou-se nos grandes centros urbanos, onde o consumo de produtos industriais era cada vez maior, o gerenciamento dos resíduos era deficiente e a disposição dos mesmos se dava de forma inadequada. Percebeu-se a necessidade de corrigir o grande desajuste: a quantidade de resíduos gerados era muito maior que a capacidade de absorção pela natureza.

Os países desenvolvidos investiram grande capital no desenvolvimento de novos recursos e tecnologias. Almejavam a minimização dos custos de transporte dos resíduos, o fim da degradação ambiental e a otimização das áreas disponibilizadas para gerenciar os rejeitos. Programas de reciclagem dos resíduos começaram a se espalhar pelo mundo todo, a educação ambiental começou a ser prospectada, porém seus resultados ainda não eram suficientes para equacionar toda a problemática.

Começaram a enxergar a grande possibilidade de aproveitamento do conteúdo energético desse resíduo a partir da tecnologia de incineração do resíduo sólido. A técnica repercutiu principalmente quando se percebeu que se obtinha uma redução volumétrica de quase 90% e redução mássica em torno de 25%, além da destruição de organismos patogênicos e eliminação de odores comuns em aterros (FISIA BABCOCK ENVIRONMENT, 2010).

Atualmente existem no Brasil algumas instalações de pequeno porte em funcionamento para tratamento de resíduos hospitalares, e outras de grande porte para o tratamento dos industriais. A incineração ainda é raramente considerada para tratamento dos RSU, porém metas estão sendo impostas a grandes cidades brasileiras para a correção do gerenciamento dos resíduos em curto prazo. São Bernardo do Campo é a primeira a apresentar um processo licitatório de uma nova Usina de Incineração de resíduos urbanos com capacidade para geração de até 22 megawatts/hora.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar um estudo de viabilidade para a instalação desde já de Usinas de Incineração em algumas cidades brasileiras. Para tanto, é importante desde já salientar que os resíduos que serão incinerados tratam-se dos rejeitos da coleta seletiva com poder calorífico mínimo de 2000 kcal/kg, que garantem um processo tecnicamente viável. Será apresentado também o processo

governamental para se licitar uma Usina no país, bem como sua viabilidade no que diz respeito à população mínima local e respectivos custos.

É apresentado todo o ciclo do rejeito até o momento de decidir por incinerá-lo ou descartá-lo. Para efeito de detalhamento, o trabalho apresenta todas as etapas do processo de incineração, bem como apresenta um estudo para dimensionamento da turbina adequada a ser utilizada na planta visando um processo eficiente.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1 Histórico

Foi na Idade Média, com o crescimento das cidades e o desenvolvimento do comércio, que se perceberam as grandes proporções dos problemas da destinação inadequada dos resíduos, pois, estes eram lançados em grandes quantidades nas ruas. Isso levou a alguns historiadores a defender a idéia de que esse acúmulo de resíduos foi o fator determinante para o surgimento da peste negra na Europa Ocidental que resultou na morte da metade da população em apenas quatro anos (LEMOS, 2011).

Com a chegada da Revolução Industrial e a urbanização das cidades, os problemas relacionados aos resíduos aumentaram e estes eram tratados como um problema de vizinhança (LEMOS, 2011). Houve um grande fluxo da população rural para as cidades, aumentando o contingente populacional urbano sem que houvesse uma infraestrutura urbana adequada e necessária, ocorrendo inúmeras epidemias. A partir desta época há um crescimento progressivo dos centros urbanos e uma produção cada vez maior de rejeitos, o que produziu níveis de poluição insuportáveis e a necessidade cada vez maior do uso de tecnologias para tornar a água própria ao consumo humano, e de locais disponíveis para a disposição dos resíduos sólidos (MARTINS, 2012).

A fábrica passou a ser o núcleo do novo organismo urbano. Todos os demais detalhes da vida ficaram subordinados a ela. Muitas vezes, até mesmo serviços tais como o suprimento de água e o mínimo indispensável em edifícios públicos, necessários à existência da cidade, se não tinham sido construídos por uma geração anterior, só apareciam mais tarde (eram coisas em que só depois se pensava) (MUNFORD, 1991).

Se a ausência de encanamentos e de higiene municipal resultava em um mau cheiro insuportável nesses novos bairros urbanos, e se a propagação de excrementos expostos, juntamente com a sua infiltração nos poços locais, significava uma propagação correspondente da febre tifóide, a falta de água era ainda preocupante, porque afastava por completo a possibilidade de limpeza doméstica ou de higiene pessoal. Nas grandes capitais, onde ainda perduravam algumas das antigas tradições municipais, não se tomavam providências adequadas relacionadas com o fornecimento de água às novas áreas. Em 1809, quando a população de Londres era de perto de um milhão de habitantes, a água era encontrada, na maior parte da cidade, apenas nos porões das moradias. Em certos bairros, a água só podia ser

utilizada três dias por semana. E, embora os canos de ferro já tivessem aparecido em 1746, não foram muito usados, até que uma lei especial, na Inglaterra, em 1817, determinou que todos os novos encanamentos fossem construídos de ferro, dentro de dez anos (MUNFORD, 1991).

Nas novas cidades industriais estavam ausentes as tradições mais elementares de serviços públicos municipais. Bairros inteiros às vezes ficavam sem água até mesmo das bicas locais. Vez por outra, os pobres tinham de sair de casa em casa, nos bairros de classe média, a pedir água, como poderiam pedir pão durante uma crise de alimentos. Com essa falta de água para beber e lavar, não admira que se acumulassem as imundícies. Os esgotos abertos, não obstante o mau cheiro que produziam, indicavam relativa prosperidade municipal (MUNFORD, 1991).

Após a Revolução Industrial, surge a sociedade de consumo, necessitando de um aumento da infraestrutura (veículos para transporte; locais para tratamento e destinação, com usina de reciclagem e compostagem, aterro sanitário, etc.), devido à crescente quantidade de lixo, mas também acelera a resistência à criação de locais reservados para a deposição final, devido ao incômodo, desvalorização do imóvel, entre outros (MARTINS, 2012).

Esse desenfreado contingente migratório, aliado ao acelerado consumo de produtos duráveis e/ou descartáveis em uma mesma região, trouxe uma grande problemática para os centros urbanos: o gerenciamento dos resíduos sólidos.

Segundo Martins (2012), a verdade é que o ser humano gera quantidades crescentes de resíduos cada vez mais complexos e cada vez mais existe menos locais adequados para sua destinação. Além disso, as tecnologias utilizadas são ou muito caras (incinerador computadorizado e com filtro) ou insatisfatórias ambientalmente, como é o caso dos aterros controlados e “lixões”, por vezes erroneamente chamados de aterros sanitários, sendo na verdade apenas locais para depósito e acúmulo de resíduos.

## 2.2 Definições

No dia 02 de agosto de 2010 foi sancionada a Lei 12.305, que trata da Política Nacional de Resíduos Sólidos e que foi regulamentada pelo decreto 7.404 de 23 de dezembro de 2010. Segundo esta lei, o termo resíduo sólidos refere-se:

“... 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 técnica ou economicamente inviável em face da melhor tecnologia disponível”.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) pela norma NBR 10.004/2004 (“Resíduos Sólidos – Classificação”) define resíduos sólidos da seguinte forma:

“... resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos de sistemas de tratamento de água (ETA), aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle da poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

O atual paradigma do crescimento constante das cidades e do consumo indiscriminado de supérfluos e descartáveis, por certo, não se coaduna com a conservação de um ambiente natural onde sejam possíveis as condições adequadas para a sobrevivência humana. Neste início de século a sociedade precisa, com a urgência necessária e através das agências de políticas mundiais endossadas pelos governos nacionais, implantar e fazer cumprir um novo paradigma para o trato dos seus resíduos, de forma universalizada.

Esta dinâmica da produção e do consumo acarreta aumentos constantes na geração de resíduos e, conseqüentemente, o aumento de aportes tecnológicos e financeiros.

Inclusive na qualificação de recursos humanos para atuar nesta área, para que os RSU tenham tratamento e destinação final os mais adequados possíveis. Para determinar a melhor tecnologia para tratamento, aproveitamento ou destinação final dos resíduos sólidos é necessário conhecer a sua classificação. Diversas propostas têm sido apresentadas para a classificação dos resíduos sólidos, e cada uma delas influi de forma significativa na destinação final do resíduo.

Segundo o artigo 13 da Lei nº 12.305, os resíduos sólidos podem ser classificados quanto à origem e quanto à periculosidade (BRASIL, 2010).

“ I - quanto à origem:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas "a" e "b";
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas "b", "e", "g", "h" e "j";
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea "c";
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluindo os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

II - quanto à periculosidade:

a) resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;

b) resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea "a": classe IIA (Não Inertes) e classe IIB (Inertes)".

O diagrama de blocos representado na figura 1 evidencia a divisão quanto à origem proposta pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, e no que diz respeito aos resíduos sólidos urbanos ela os classifica em dois tipos: Resíduos de Limpeza Urbana e Resíduos Domiciliares. O IBGE, em sua Pesquisa Nacional de Saneamento Básico realizada em 2008, caracteriza os domiciliares como sendo resíduos sólidos de natureza convencional, gerados nas residências e em estabelecimentos comerciais e/ou de prestação de serviços e congêneres, com frequência regular e previamente estabelecida para cada parcela da zona urbana. Os resíduos de limpeza urbana, quais sejam, são aqueles originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas, bem como de outros serviços de limpeza urbana (BRASIL, 2010).

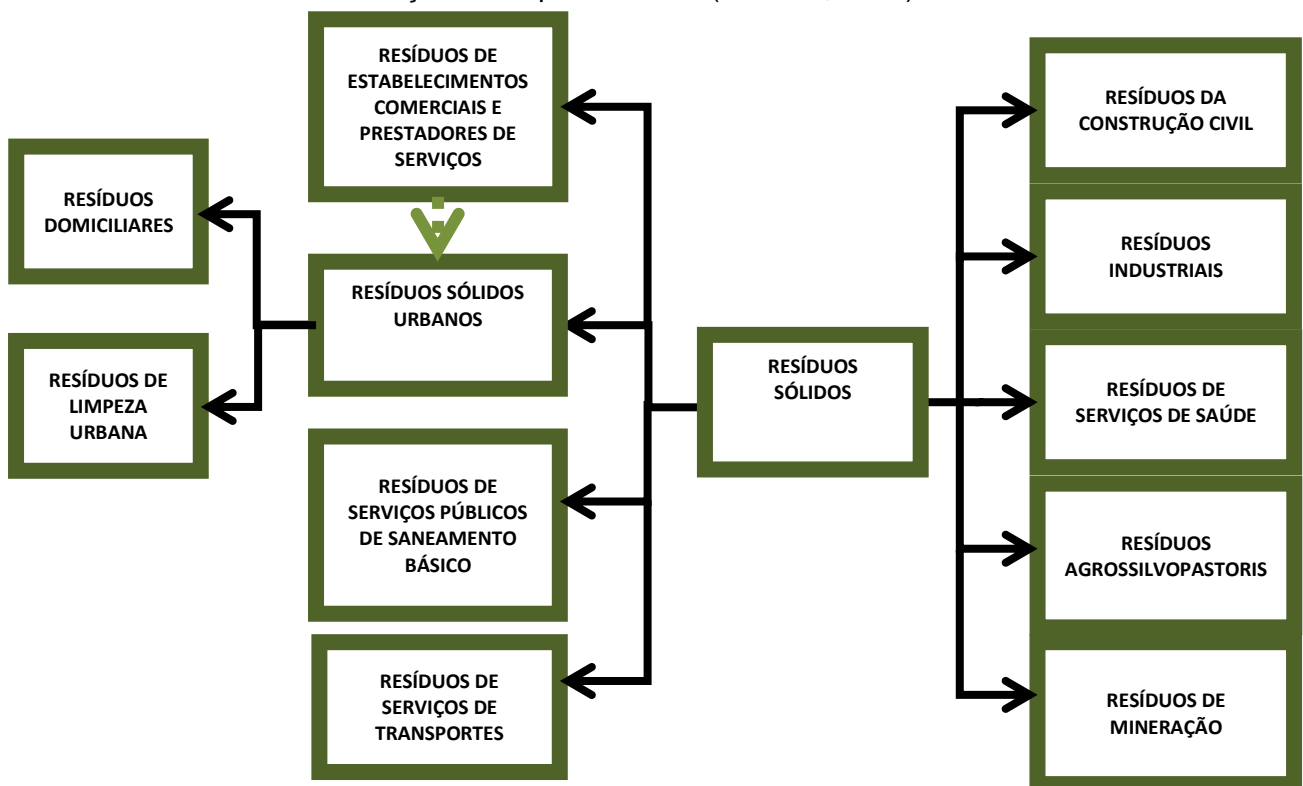


Figura 1 - Divisão quanto à origem dos resíduos sólidos (Fonte: Adaptado da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei N°12.305 de 02 de Agosto de 2010, (SCHALCH, 2012))

A divisão quanto à periculosidade proposta pela mesma Política divide os resíduos em dois grupos, os perigosos e não perigosos. Para efeito de maior detalhamento da divisão quanto à periculosidade, o compendio de normas da ABNT de números 10.004 – Classificação de Resíduos, 10.005 – Lixiviação de Resíduos, 10.006 – Solubilização de Resíduos e 10.007 – Amostragem de Resíduos trata toda a base teórica de resíduos, a norma 10.004 da ABNT em especial classifica os resíduos sólidos e os organiza em classes, da forma apresentada na figura 2.

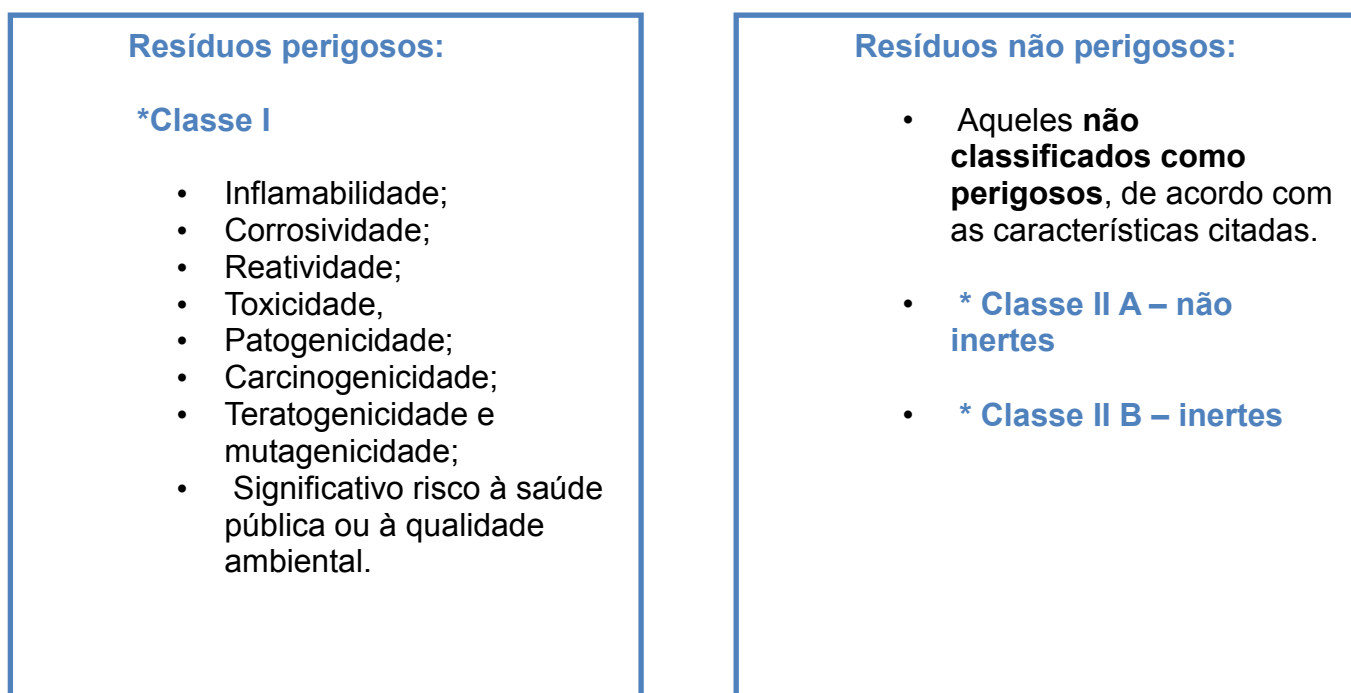


Figura 2 - Divisão quanto à periculosidade dos resíduos sólidos (Fonte: Adaptado da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei N°12.305 de 02 de Agosto de 2010)

Durante muito tempo as responsabilidades de cada setor da sociedade quanto aos resíduos sólidos – especialmente o tratamento e destinação – permaneceram sem uma definição clara.

Atualmente existem medidas, leis e planos mais sólidos que tratam dos direitos e deveres do cidadão. O artigo 13 da Lei 12.305/2010 estipula que a responsabilidade pela disposição do conjunto de resíduos produzidos fica a cargo do município somente quando são gerados em serviços públicos de saneamento básico ou quando são os próprios resíduos sólidos urbanos, sendo eles domiciliar ou público. No caso de

outra atividade que seja feita para benefício ou utilidade do próprio gerador fica a encargo dele a disposição final. O diagrama 3 ilustra a responsabilidade do município e do gerador quando aos resíduos produzidos.

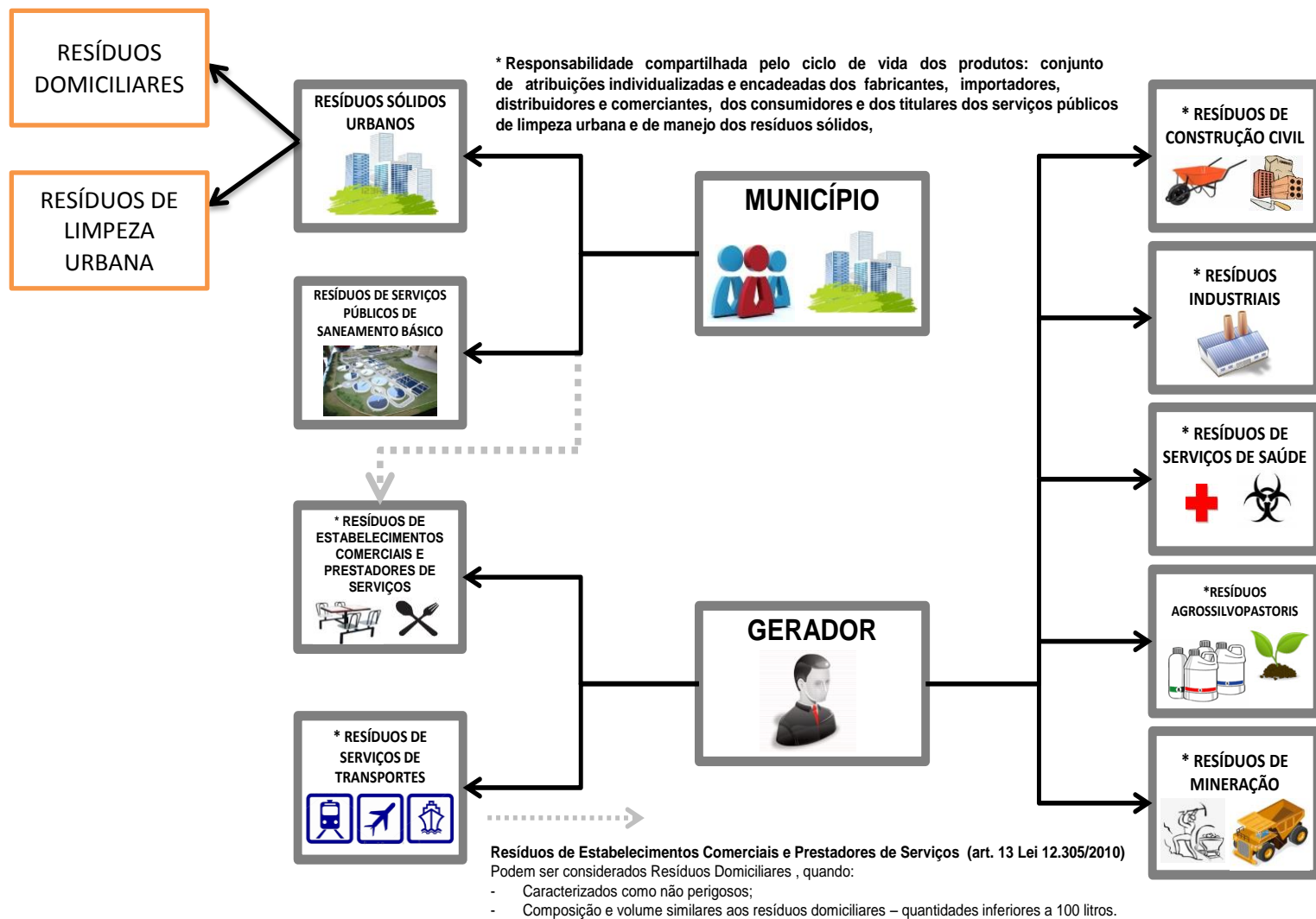


Figura 3 - Responsabilidade pelo gerenciamento dos resíduos (Fonte: Adaptado da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei N°12.305 de 02 de Agosto de 2010, (SCHALCH, 2012))

Atualmente um plano bastante organizado de gestão e gerenciamento do resíduo sólido é algo essencial a ser desenvolvido pelo responsável. Combinados, trata-se de poderosas ferramentas de implantação de políticas ambientais que visem minimizar os problemas de manejo dos resíduos. Por meio de uma visão sistêmica de planejamento, a gestão e o gerenciamento permitem aperfeiçoar processos a fim de

contemplar os objetivos ambientais pré-estabelecidos. No que se refere ao artigo 3º da Lei Federal nº 12.305/10 (PNRS), define-se por:

**GESTÃO:** conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável

**GERENCIAMENTO:** conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos, exigidos na forma desta lei (PNRS).

Uma estratégia integrada de resíduos sólidos mostra exatamente como se deve proceder de acordo com a hierarquia do tratamento do resíduo. Como pode ser observada no diagrama da figura 4, a prevenção da geração do resíduo recebe o mais alto grau de prioridade, seguida pela redução da quantidade. Quando os resíduos não podem ser evitados ou gerados em menor escala, deve ser contemplada a reutilização dos mesmos. Caso não seja possível esse reuso, sempre que possível devem ser reciclados. Contudo, os volumes de resíduos não recicláveis ainda contêm energia que pode ser obtida por meio do tratamento térmico. Por fim, caso nenhuma das etapas já mostradas se enquadrar, o material deve ser disposto em um local ambientalmente correto.



Figura 4 - Fluxo de gerenciamento do resíduo sólido (Fonte: Adaptado da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei N°12.305 de 02 de Agosto de 2012)

### 2.3 Dados e pesquisas

Segundo uma pesquisa realizada em 2011 pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), a geração de RSU no Brasil registrou crescimento de 1,8%, de 2010 para 2011, índice percentual que é superior à taxa de crescimento populacional urbano do país, que foi de 0,9% no mesmo período. O aumento observado segue a tendência constatada nos anos anteriores, porém em ritmo menor (ABRELPE, 2011).

Um dado ainda mais alarmante é a comparação entre a quantidade total gerada e a quantidade total coletada. De acordo com essa mesma pesquisa, 6,4 milhões de toneladas de RSU deixou de ser coletadas no ano de 2011 e, por consequência, tiveram destino impróprio. A geração foi na proporção de 61.939.368 t/ano, enquanto

que a coleta deste mesmo foi de 55.534.440 t/ano (ABRELPE, 2011).

A composição gravimétrica é uma premissa básica para se iniciar qualquer plano de ação para disposição adequada dos resíduos gerados. Segundo a ABRELPE, a composição gravimétrica dos RSU coletados no Brasil permite visualizar de um modo geral a participação de diferentes materiais na fração total dos RSU. Os dados, obtidos do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2012), são mostrados na tabela 1.

<b>Composição</b>	<b>Porcentagem</b>
<b>Recicláveis</b>	31,9%
<b>Matéria Orgânica</b>	51,4%
<b>Outros</b>	16,7%

Tabela 1 - Composição dos Resíduos Sólidos em 2011 (Fonte: ABRELPE, 2011)

De acordo com a tabela, pode-se notar que apenas 31,9% dos resíduos urbanos coletados podem ser aproveitados para a reciclagem, os outros 68,1% devem ter sua destinação feita pelo governo local através de um gerenciamento assertivo e uma adequação as normas ambientais. Com dados da pesquisa da ABRELPE 2011, observa-se por meio da tabela 2 uma pequena evolução na destinação final ambientalmente adequada de RSU de 2010 para 2011. Porém, em termos quantitativos, a destinação inadequada cresceu 1,4%, o que representa 23,3 milhões de toneladas de RSU em lixões e aterros controlados. (ABRELPE, 2011)

	<b>DESTINAÇÃO FINAL DOS RSU COLETADOS</b>	
	<b>2010</b>	<b>2011</b>
<b>Inadequada</b>	42,44%	41,94%
<b>Adequada</b>	57,56%	58,06%

Tabela 2 - Destinação final dos RSU Coletados em 2011 (Fonte: ABRELPE, 2011)

A tabela 3 revela dados da disposição final de resíduos sólidos segundo a Pesquisa Básica de Resíduos Sólidos realizada pelo IBGE em 2008. No que se refere à coleta domiciliar de lixo, podemos observar que quase 100% dos municípios pesquisados oferece este tipo de serviço. Porém, de acordo com a tabela 4, infere-se que do total de municípios com tratamento do resíduo sólido coletados em domicílios e/ou públicos, aproximadamente 50% utiliza dos lixões como unidade de destino, e que apenas 0,6% tem uma unidade de aproveitamento energético por incineração.

Municípios									
Com serviço de manejo de resíduos sólidos									
Total	Total	Natureza do serviço							
		Coleta domiciliar regular de lixo	Varrição de ruas e logradouros públicos	Coleta regular de resíduos sólidos das vias e logradouros públicos	Coleta seletiva de resíduos sólidos recicláveis	Triagem de Resíduos sólidos recicláveis	Coleta de resíduos de construção e demolição	Coleta de resíduos sólidos especiais (de saúde e industriais)	Capina de vias e logradouros públicos
5564	5562	5540	5403	5446	994	990	3985	4464	5404

Tabela 3 - Natureza do Serviço de Manejo de Resíduos Sólidos (Fonte: IBGE, 2010)

Municípios									
Com serviço de manejo de resíduos sólidos									
Total	Total	Unidade de destino dos resíduos domiciliares e/ou públicos							
		Vazadouro a céu aberto (lixão)	Vazadouro em áreas alagadas ou alagáveis	Aterro Controlado	Aterro sanitário	Unidade de compostagem de resíduos orgânicos	Unidade de triagem de resíduos recicláveis	Unidade de Tratamento por Incineração	Outra
5564	5562	2810	14	1254	1540	211	643	34	134

Tabela 4 - Unidade de Destino dos Resíduos Domiciliares e/ou Públicos Fonte: (IBGE, 2010)

É importante salientar que as 34 unidades de tratamento por incineração apresentadas na tabela 4 tratam apenas os resíduos “públicos” (sejam eles de empresas públicas ou hospitais públicos), visto que no Brasil ainda não há unidade de tratamento por incineração para o resíduo domiciliar. No que se refere à quantidade diária coletada e/ou recebida (tabela 5), pode-se notar que 17% dos resíduos tem como destinação os vazadouros a céu aberto, enquanto que 2,5% é utilizado par uma recuperação energética. (IBGE, 2010)

Quantidade diária de resíduos sólidos, domiciliares e/ou públicos, coletados e/ou recebidos (t/dia)								
Total	Unidade de destino dos resíduos domiciliares							
	Vazadouro a céu aberto (lixão)	Vazadouro em áreas alagadas ou alagáveis	Aterro Controlado	Aterro sanitário	Unidade de compostagem de resíduos orgânicos	Unidade de triagem de resíduos recicláveis	Unidade de Tratamento por Incineração	Outra
<b>259547</b>	45710	46	40695	167636	1635	3122	67	636

Tabela 5 - Quantidade de Resíduos Coletados e/ou Recebidos por dia em cada Unidade de Destino (Fonte: IBGE, 2010).

### 3. O Aproveitamento Energético

Para Passinato (2008), o lixo produzido pelas atividades do homem é hoje uma das mais graves ameaças à sua própria qualidade de vida. Isso tem determinado a tendência mundial pela minimização da geração, entendendo-se como tal a produção/venda de produtos dos quais restem o mínimo possível de resíduos, o reuso de embalagens e a reciclagem. Como a gestão e o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos é uma responsabilidade direta das municipalidades, a reprogramação conceitual de processos produtivos e de produtos em geral, com atenção especial para suas embalagens, é algo que foge completamente ao controle dos municípios. Já a reciclagem pode e deve ser incentivada por estes entes federados, conscientizando a população e estruturando programas de coleta seletiva e mantendo núcleos de triagem de recicláveis. No entanto, mesmo que se obtenha o maior sucesso nestes programas, a maior parcela dos resíduos gerados, mais de 65%, necessitará de uma destinação final adequada, e neste sentido é necessário considerar uma rota que contemple o aproveitamento da energia contida no lixo.

Segundo a Agência Nacional de Engenharia Elétrica (ANEEL), a expansão acentuada do consumo de energia, embora possa refletir o aquecimento econômico e a melhoria da qualidade de vida, tem aspectos negativos. Um deles é a possibilidade do esgotamento dos recursos utilizados para a produção de energia, e outro é o impacto ao meio ambiente causado por essa atividade.

A atividade de geração de energia elétrica ingressou no séc. XXI em busca de desdobramentos sustentáveis. Ainda não vigora uma solução capaz de suprir as necessidades e demandas de uma geração futura. Ainda melhor definido pela ANEEL, o desafio é reduzir o impacto ambiental e, ao mesmo tempo, ser capaz de acompanhar o crescimento (ANEEL, 2008).

Das diretrizes aplicáveis aos resíduos sólidos, o artigo 9º da Lei 12.305 dispõe que poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental (BRASIL, 2010).

Mas, além dessas alternativas, há outros caminhos possíveis de serem seguidos com vistas ao aproveitamento energético de RSU. Nesta seção, discutem-se os aspectos mais relevantes das principais rotas tecnológicas alternativas hoje disponíveis para a

geração de energia elétrica a partir de RSU: gaseificação, pirólise, digestão anaeróbia e incineração.

### **3.1 Aterros Sanitários**

#### **3.1.1 Gaseificação**

Como o próprio termo indica, gaseificação é um processo de conversão de combustíveis sólidos em gasosos, através de reações termoquímicas, envolvendo vapor quente e ar, ou oxigênio, em quantidades inferiores à estequiométrica (mínimo teórico para a combustão). Há vários tipos de gaseificadores, com grandes diferenças de temperatura e/ou pressão. Os mais comuns são os reatores de leito fixo e de leito fluidizado. O gás resultante é uma mistura de monóxido de carbono, hidrogênio, metano, dióxido de carbono e nitrogênio, cujas proporções variam de acordo com as condições do processo, particularmente se é ar ou oxigênio que está sendo usado na oxidação (ANEEL, 2002).

A gaseificação de biomassa não é um processo recente, entretanto, atualmente o maior interesse deve-se principalmente à limpeza e versatilidade do combustível gerado quando comparado aos combustíveis sólidos. A limpeza se refere à remoção de componentes químicos nefastos ao meio ambiente e à saúde humana, entre os quais o enxofre. A versatilidade se refere à possibilidade de usos alternativos, como em motores de combustão interna e turbinas a gás. Outra vantagem da gaseificação é que, sob condições adequadas, pode produzir gás sintético, que pode ser usado na síntese de qualquer hidrocarboneto (ANEEL, 2002).

A formação do gás metano, principal componente do biogás, é 21 vezes mais potente que o dióxido de carbono em termos de efeito estufa. Assim, sua simples queima representa um benefício ambiental perante sua emissão. Em adição, o aproveitamento energético também evita a emissão decorrente da queima de combustível fóssil que poderia ser utilizado para ofertar a mesma quantidade de energia que o biogás (EPE, 2008).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética, EPE (2008), a geração do gás ocorre através de quatro fases características da vida útil de um aterro:

- Fase aeróbia: é produzido o  $\text{CO}_2$ , porém é alto o conteúdo de  $\text{N}_2$ , que sofre declínio nas passagens para as 2ª e 3ª fases.
- Esgotamento de  $\text{O}_2$ : resulta em um ambiente anaeróbio com grandes quantidades de  $\text{CO}_2$  e um pouco de  $\text{H}_2$  produzido.

- Fase anaeróbia: começa a produção de CH<sub>4</sub>, com redução na quantidade de CO<sub>2</sub> produzido.
- Fase final: produção quase estável de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>.

O objetivo de um projeto de aproveitamento energético de GDL é convertê-lo em alguma forma de energia útil, como eletricidade, vapor, combustível para caldeiras ou fogões, combustível veicular ou, ainda, para abastecer gasodutos com gás de qualidade.

Existem várias tecnologias que podem ser usadas para maximizar o valor do GDL através das diversas formas de utilização. As mais importantes são:

- Uso direto do gás de médio poder calorífico;
- Produção de energia/cogeração;
- Venda de gás – similar ao gás natural – através de gasodutos ou como GNV.

O uso mais simples e normalmente de maior custo-efetividade do GDL é como um combustível de médio poder calorífico para caldeiras ou para uso em processos industriais - operações de secagem, operações em fornos, produção de cimento e asfalto. Nestes casos, o gás é transportado por gasoduto diretamente para um consumidor próximo para ser usado em equipamentos de combustão, em substituição, ou como suplemento, do combustível tradicionalmente utilizado na operação. Observa-se que é necessária a remoção de condensado e um tratamento de filtragem, impondo-se eventual modificação no equipamento de combustão existente.

O biogás coletado e filtrado pode também ser utilizado para a geração de eletricidade, em geral alimentando grupos motor-gerador de combustão interna de pequena potência, adequados à queima de gás pobre. Mesmo alimentados com combustível de baixo poder calorífico, o rendimento desses geradores pode superar 35% (EPE, 2008).

### **3.1.2 Pirólise**

A pirólise ou carbonização é o mais simples e mais antigo processo de conversão de um combustível (normalmente lenha) em outro de melhor qualidade e conteúdo energético (carvão essencialmente). O processo consiste em aquecer o material original (normalmente entre 300C e 500 o C), na "quase-ausência" de ar, até que o material volátil seja retirado. O principal produto final (carvão) tem uma densidade energética duas vezes maior do que aquela do material de origem e queima em

temperaturas muito mais elevadas. Além de gás combustível, a pirólise produz alcatrão e ácido piro-lenhoso.

A relação entre a quantidade de lenha (material de origem) e a de carvão (principal combustível gerado) varia muito de acordo com as características do processo e o teor de umidade do material de origem. Em geral, são necessárias de quatro a dez toneladas de lenha para a produção de uma tonelada de carvão. Se o material volátil não for coletado, o custo relativo do carvão produzido fica em torno de dois terços daquele do material de origem (considerando o conteúdo energético). Nos processos mais sofisticados, costuma-se controlar a temperatura e coletar o material volátil, visando melhorar a qualidade do combustível gerado e o aproveitamento dos resíduos. Neste caso, a proporção de carvão pode chegar a 30% do material de origem. Embora necessite de tratamento prévio (redução da acidez)

### **3.1.3 Digestão Anaeróbia**

Digestão anaeróbia pode ser definida como a conversão de material orgânico em dióxido de carbono, metano e lodo através de bactérias, em um ambiente pobre em oxigênio. Este processo é uma das formas mais antigas de digestão e ocorre naturalmente na ausência de oxigênio, como em plantações de arroz, águas paradas, estações de tratamento de esgoto e aterros sanitários. O gás obtido durante a digestão anaeróbica, chamado de biogás, inclui além do metano e do dióxido de carbono, alguns gases inertes e compostos sulfurosos (EPE, 2008).

A digestão anaeróbia é consequência de uma série de interações metabólicas com a atuação de diversos grupos de microorganismos. A produção de metano ocorre em um espectro amplo de temperaturas, mas aumenta significativamente em duas faixas, ditas mesofílica - entre 25-40°C, e termofílica - entre 50-65°C (EPE, 2008).

Fases:

- pré-tratamento;
- digestão do resíduo;
- recuperação de gás e
- tratamento de resíduos.

A quantidade de biogás produzida depende, entre outros fatores, da tecnologia empregada na digestão. Da mesma forma que na recuperação de gás do aterro, o

biogás pode ser consumido diretamente, situação em que apresenta poder calorífico entre 4.500 e 6.000 kcal/m<sup>3</sup>, ou tratado para separação e aproveitamento do metano, cujo poder calorífico é semelhante ao do gás natural (EPE, 2008).

Em termos elétricos, considerando eficiência de 35% na conversão de energia térmica para energia elétrica, podem ser obtidos entre 120 e 290 kWh por tonelada de RSU, dependendo do conteúdo energético do lixo (proporção de metano no gás produzido pela DA) (EPE, 2008).

### **3.2 Incineração**

A incineração é provavelmente a segunda mais antiga forma de disposição do lixo. A primeira seria simplesmente abandonar em qualquer lugar as coisas “inservíveis”. A técnica da incineração teve início quando o homem percebeu que podia aquecer-se queimando coisas “não úteis” na sua caverna e assim podê-la habitar por mais tempo, antes que o acúmulo de resíduos tornasse sua estada ali impossível. O conceito começou a ser discutido na década de 50, e teve seu histórico dividido em quatro fases (MENEZES, GERLACH E MENEZES, 2000).

#### **1ª Fase 1950 – 1965**

Anteriormente a 1950 as instalações existentes eram demasiadamente incipientes, caracterizando-se como um primeiro estágio de evolução de 1950 a 1965. Nesta fase, a função única era ainda reduzir o volume do lixo. Os gases eram descarregados diretamente para a atmosfera sem qualquer tratamento. A concentração de poeira atingia níveis de 1000mg/Nm<sup>3</sup> (os sistemas modernos alcançam até 3mg/Nm<sup>3</sup>).

#### **2ª Fase 1965 – 1975**

Nesta época aparecem os primeiros sistemas de proteção do meio ambiente, que reduziram as emissões a 100mg/Nm<sup>3</sup>. Aparecem também os incineradores com câmara dupla, cujo objetivo era melhorar a eficiência da queima. Surgem os primeiros interessados na recuperação do calor para a produção de energia e as instalações de grande capacidade.

#### **3ª Fase 1975 – 1990**

Esta fase é caracterizada no mundo desenvolvido pelo aumento do rendimento energético e desenvolvimento das normas de proteção ambiental. O público começa a estar mais atento aos problemas da poluição. Aparecem os sistemas complexos de

lavagem de gases para reduzir as emissões de gases ácidos, com a neutralização de HCl, SO<sub>x</sub>, HF e metais pesados. As caldeiras são muito melhores e há uma melhoria nos processos de combustão dos resíduos orgânicos. O automatismo passa a ser centralizado. Multiplicam-se os centros de tratamento com cogeração de energia.

#### **4ª Fase 1990 – atual**

Ampliam-se as pressões dos movimentos verdes. O tratamento de gases é sofisticado ainda mais, perseguindo a meta da emissão zero. Avançam os sistemas para a remoção de outros poluentes como o NO<sub>x</sub>, dioxinas e furanos. Aparecem as tecnologias avançadas de tratamento para a produção de resíduos finais inertes, que podem ser reciclados ou dispostos sem nenhum problema para o meio ambiente, tal como o uso do plasma térmico

A forte campanha contrária às Usinas de Incineração de resíduos durante década de 80 resultou na adoção de legislações ambientais com limites extremamente rigorosos para as emissões gasosas nos EUA, nos países da União Européia e no Japão. Como consequência, observou-se o encerramento das atividades de centenas de Plantas de Incineração que não apresentavam conformidade com os novos limites de emissões, ao mesmo tempo em que pesados investimentos foram realizados, objetivando a adequação dos sistemas de tratamento dos gases e vapores da incineração. Somente nos EUA, levantamentos mostram que mais de US\$ 1 Bilhão foram investidos na adequação dessas usinas (PASSINATO, 2008).

Vários processos estão sendo desenvolvidos para sofisticar o pré-tratamento do lixo (anterior à incineração) para aumentar a sua homogeneização, baixar a umidade e melhorar o poder calorífico, de modo a transformá-lo num combustível de qualidade para a máxima produção de energia. Sofisticam-se também os processos de combustão com o aumento dos sistemas de turbinas, secagem, ignição e controle da combustão. Em vários países podemos encontrar centrais termoelétricas alimentadas a carvão e lixo em fornos contíguos e com os ciclos de vapor integrados na produção de energia elétrica (MENEZES, GERLACH e MENEZES, 2000). A figura 5 exemplifica o trajeto sugerido aos resíduos.

## Compare o método tradicional e a queima de resíduos

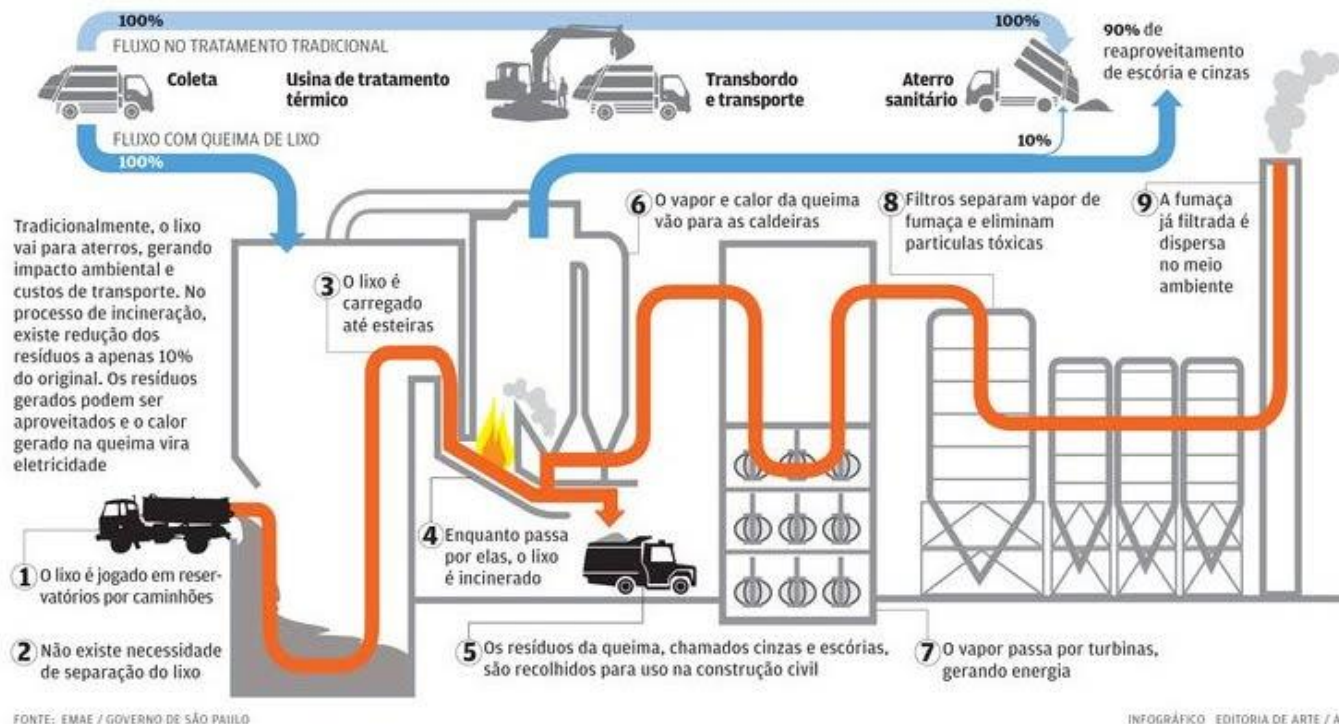


Figura 5 – Comparação entre o método tradicional (aterros) e a incineração (Fonte: EMAE, 2012).

Desta forma procura-se equacionar ambos os problemas: de energia e do tratamento ambientalmente correto dos resíduos. A tecnologia atualmente disponível de projeto de incineradores pode prever uma produção de até 0,95kWh/t processada, sendo que a grande maioria dos sistemas instalados gera de 0,4 a 0,95 kWh/t. Naturalmente, esta produção dependerá fortemente do poder calorífico dos RSU processados (MENEZES, GERLACH e MENEZES, 2000).

A tabela 6 mostra alguns valores da energia produzida em relação a capacidade de tratamento (t/dia).

Localização	Capacidade de tratamento t/dia	Produção de energia bruta MW
Tsurumi, Japan	600	12
Tomida, Nagoya, Japan	450	6
Dickerson, Maryland, USA	1.800	63
Alexandria, Virginia, USA	975	22
Isvag, Antuérpia, Bélgica	440	14
Savannah, USA	690	12
Izmit, Turquia	96	4
UIOM Emmenspitz, Suíça	720	10
Wells, Áustria	190	7

Tabela 6 - Capacidade de tratamento e produção de energia em Usinas de Incineração (Fonte: MENEZES, GERLACH e MENEZES, 2000))

Atualmente os países da Europa e Japão adotam o processo da incineração dos resíduos como uma prática comum. Nesses locais, as legislações são atualizadas periodicamente e a fiscalização é rigorosa. Os fabricantes de peças e equipamentos evoluem conforme as novas tecnologias, sempre oferecendo novas alternativas limpas e um aumento da eficiência do tratamento do resíduo. Segundo BARROS *et al* (2003), a incineração é um processo de redução de peso (em até 70%) e de volume (em até 90%) do lixo através de combustão controlada, de 800 a 1000 °C, visando a disposição final dos rejeitos. O processo é realizado em fornos especiais, nos quais se pode garantir oxigênio para combustão, turbulência, tempos de permanência e temperaturas adequadas.

Segundo Riscado (2010), esses países desenvolvidos já citados, onde se encontram instaladas e em operação mais de 80% das Usinas de Geração de Energia a partir do Lixo Urbano, entende-se ser esta uma das boas opções para substituição da energia de combustíveis fósseis por fontes alternativas renováveis, com indiscutível economia ambiental e financeira em relação aos cada dia mais distantes aterros sanitário.

Tabela: Incineração nos países desenvolvidos					
País	População (milhões)	Geração de lixo (milh.t/a)	No. de incineradores	% incinerado	Recuperação de energia
Suíça	7	2,9	29	80	80%
Japão	123	44,5	1893	72	Principais
Dinamarca	5	2,6	32	65	100%
Suécia	9	2,7	21	59	100%
França	56	18,5	100	41	68% da capac.
Holanda	15	7,1	9	39	50% das usinas
Alemanha	61	40,5	51	30	
Itália	58	15,6	51	17	30% da capac.
USA	248	180	168	19	75 % das usinas
Espanha	38	11,8	21	15	24 % das usinas
Reino Unido	57	35	7	5	25 % da capac.
Lima, 1994; BNDES, 1997.					

Tabela 7 - Características da incineração em países desenvolvidos (Fonte: Lima, 1994, BNDES, 1997).

### 3.3 O processo de recuperação energética

O processo de recuperação energética a partir da incineração se inicia com a liberação da energia presente nos resíduos, utilizado como combustível do processo, através de uma reação de combustão que ocorre dentro do leito dos fornos de incineração. A energia, presente nos resíduos e liberada juntamente com a energia liberada na queima dos combustíveis auxiliares e da energia presente no ar pré-aquecido injetado no forno, é conduzida para fora da câmara de combustão através dos gases da combustão. Ela é então transferida através de um boiler para a mistura água/vapor que está no seu interior, gerando uma determinada quantidade de vapor d'água a uma determinada pressão. Tanto a temperatura como a pressão produzida

irão variar de acordo com o design do boiler. A razão entre a energia transferida ao ciclo de vapor no boiler e a energia inicialmente introduzida na câmara de combustão é definida como a “Eficiência do Boiler”. Os fornos de câmara de combustão fluidizada podem atingir uma eficiência do boiler de até 90%. Já os fornos de grade têm uma eficiência do boiler de cerca de 80% (FEA, 2002).

Como citado acima, os gases da combustão são resfriados em um boiler antes de entrarem no sistema de controle de poluição do ar. O boiler é necessário para que ocorra a recuperação energética. O tipo de boiler para ser utilizado na recuperação energética irá depender do uso a ser dado à energia da mistura água/vapor quente que esta sendo produzida, que pode ser o aquecimento de casas, processos industriais, ou para a geração de eletricidade.

Um estudo do World Bank (1999) revela que há basicamente 3 tipos de boiler utilizados na recuperação energética, cada um destes é indicado e mais comum para uma forma de realizar o aproveitamento energético. O mais simples dos três é o Hot Water Boiler. Este tipo de Boiler é utilizado exclusivamente para produzir água quente (entre 110°C e 160°C aproximadamente) para o aquecimento distrital, que inclui o aquecimento de residências e prédios públicos. Este tipo de boiler atinge uma eficiência de até 80%, possui design bastante simples e baixo custo de operação.

O Low-Pressure Steam Boiler, assim como o primeiro descrito, possui design muito simples e é de fácil instalação e operação, possuindo baixo custo de operação. O vapor produzido por este tipo de boiler (entre 120°C e 250°C, máximo 20 bar de pressão) é utilizado mais comumente em processos nas indústrias. O Low-Pressure Steam Boiler apresenta uma eficiência máxima próxima de 80% (WORLD BANK, 1999).

O terceiro tipo, o High-Pressure Steam Boiler, e é utilizado nos casos onde se pretende produzir energia elétrica, com a possibilidade da produção combinada de calor para calefação ou para a utilização em processos industriais. Este tipo de boiler requer um cuidado maior devido à natureza altamente corrosiva dos gases da combustão. Ele necessita de mais espaço para instalação e tem um custo maior de instalação e operação do que os outros. Diferentemente dos demais, este boiler utiliza o conhecido ciclo de Rankine de vapor, onde ocorre a reutilização da água inicial, fazendo com que a eficiência do boiler chegue até a 85%. Este boiler tem um limite produção de vapor em 400°C e 40 bar de pressão. A figura 6 resume os dados apresentados acima sobre os três tipos de boilers utilizados na recuperação energética (WORLD BANK, 1999).

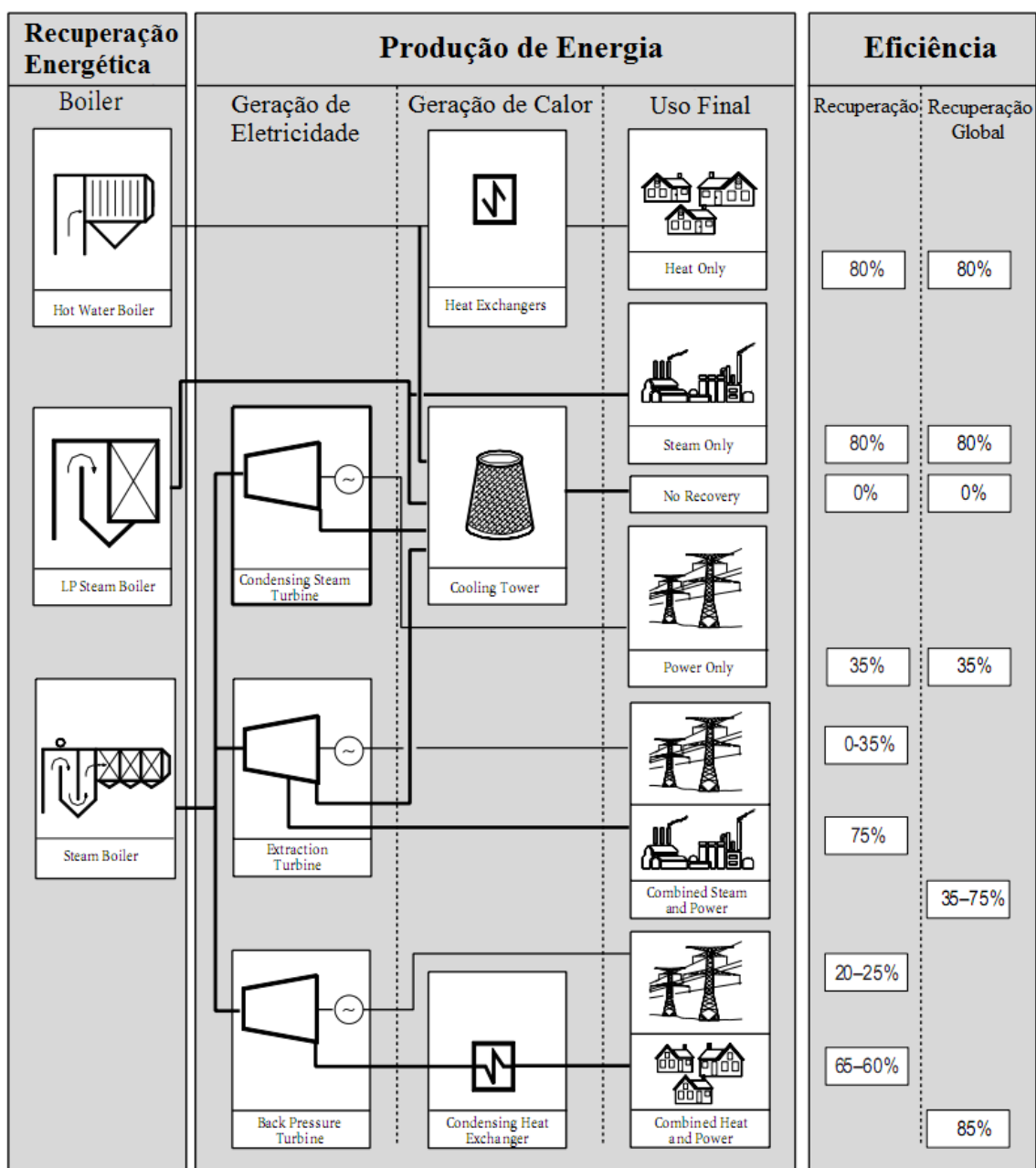


Figura 6 - Processo de recuperação energética (Fonte: WORLD BANK, 1999)

Independente do boiler utilizado, mas principalmente no uso do *High-Pressure Steam Boiler*, a temperatura e pressão de operação devem ser limitadas quando comparados com uma planta de produção de energia elétrica que utilize um combustível fóssil, pois os resíduos, diferentemente dos combustíveis convencionais, possuem altas concentrações de cloro, que quando combinado com o enxofre, produzirão gases de combustão altamente corrosivos e erosivos para o sistema. Logo, a pressão e a temperatura dos vapores produzidos pelo *High-Pressure Steam Boiler* devem ser limitadas a 400°C e a 40 bar de pressão (WORLD BANK, 1999).

Os vapores utilizados para o aquecimento de residências ou em processos industriais, para serem utilizados pelo consumidor final, são apenas transmitidos por tubulações ao seu consumidor, podendo este ser um complexo industrial, ou um bairro residencial de uma zona urbana. Nestes casos, somente é viável o aproveitamento energético do vapor quando estes consumidores estão fisicamente próximos à planta geradora, pois esta forma de energia não pode ser transportada por grandes distâncias sem que haja grande dissipação de energia pelo caminho, o que reduziria drasticamente a eficiência energética de todo processo.

Para a produção de energia elétrica, a utilização do vapor exige algumas etapas a mais do que quando se utiliza somente para a calefação ou em processos industriais. Após produzido no *High-Pressure Steam Boiler*, que é o boiler indicado para produzir vapor para estes fins, o vapor passa por uma das três diferentes turbinas geradoras de energia elétrica. Cada uma é utilizada para uma finalidade. Uma delas é utilizada para a produção dedicada de energia elétrica. A segunda é utilizada para a geração de energia elétrica combinada ao uso do vapor para processos industriais. Já a terceira é utilizada para a geração de energia elétrica combinada ao uso do vapor para o aquecimento de residências. Cada turbina geradora irá apresentar sua eficiência de acordo com o seu uso, conforme indicado na figura anterior (WORLD BANK, 1999).

### **3.4 A incineração em um contexto internacional**

#### **Estados Unidos**

Os Estados Unidos começaram a investir em plantas de incineração em 1975, quando foi construída em Saugus, Massachussets, a primeira usina *Waste-to-Energy*. Diversos estudos começaram a ser feitos, e outras plantas foram construídas logo nos próximos anos. Porém, no período de 1996 a 2004 o governo estadunidense passou por uma grande pressão de ambientalistas, que exigiam novas políticas ambientais e fiscais.

Nos últimos anos os interesses na incineração e em outras tecnologias *Waste-to-Energy* foram renovados nos EUA e no Canadá. Por exemplo, em 2004 nos EUA a incineração foi qualificada como atividade geradora de energia renovável, recebendo novamente incentivos fiscais. (PSOMOPOULOS, 2009) Projetos para aumentar a capacidade existente das plantas estão em andamento, e os governos municipais estão avaliando novamente a opção de construção de plantas de incineração ao invés de continuar a deposição dos RSU em aterros.

De acordo com Michaels (2007), os EUA possuem 86 plantas de incineração *Waste-to-Energy* com uma capacidade instalada para incinerar de 35,4 milhões de toneladas

de RSU ao ano. Outro estudo, de Simmons (2006), mostrou que a geração de resíduos sólidos nos EUA cresceu a uma taxa de 2,5% ao ano no período de 2002 a 2004.

Fazendo agora uma análise regional dos EUA e analisando suas regiões, pode-se observar algumas diferenças no gerenciamento dos RSU entre elas, como mostra a figura 7. Observa-se que os estados costeiros, de forma geral, apresentam uma taxa de reciclagem maior do que a praticada nos estados do interior do país. Constata-se também que a maior parte das plantas WTE se encontra na costa leste, correspondendo a 66% da capacidade total de plantas WTE dos EUA (SIMMONS *et al*, 2006).

Ainda inferindo dados da figura 7, observa-se que a região com a maior taxa de incineração de resíduos em plantas WTE é a região de New England, apresentando uma taxa de 39%, ou seja, a mesma apresentada por países com as maiores taxas de utilização da incineração no mundo, como é o caso da Alemanha. A proporção de resíduos incinerados na região de New England, quando comparada com a proporção nacional americana, de 7,4%, evidenciando ainda mais as diferenças regionais nas práticas de gerenciamento de resíduos nos EUA (SIMMONS *et al*, 2006).

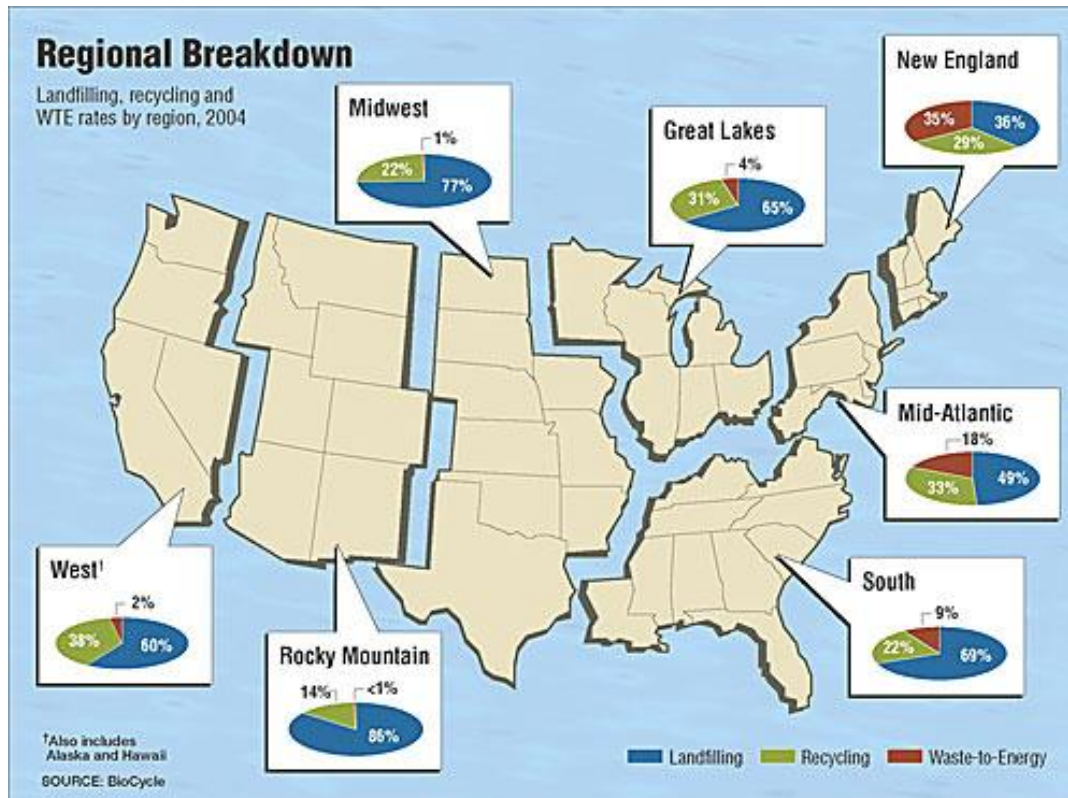


Figura 7 - Disposição dos Resíduos Sólidos por estados nos EUA (FONTE: SIMMONS, 2006).

A tabela 8 retrata a participação das energias renováveis no país com seu respectivo potencial energético gerado. De acordo com a mesma, a waste-to-energy representa 28% das energias renováveis aproveitadas no país, gerando  $13,50 \times 10^9$  kWh anualmente. (SIMMONS *et. al*, 2006)

Fonte de Energia	kWh x 10 <sup>9</sup> gerado	% das energias renováveis
Geotermica	13,52	28,0
<i>Waste-to-energy</i>	13,50	28,0
Gás de Aterro	6,65	13,8
Madeira/Biomassa	8,37	17,4
Solar (Térmica)	0,87	1,8
Solar (Fotovoltáica)	0,01	0,0
Vento	5,3	11,0
Total	48,22	100,0

Tabela 8 - Participação das energias renováveis dos Estados Unidos (Fonte: EIA (2002) *apud* PSOMOPOLUS (2009))

## União Européia

De acordo com a Agência Ambiental Européia, no seu relatório de 2009, a capacidade de incineração na Europa cresceu significativamente, juntamente com o crescimento das restrições impostas aos limites de emissão desta tecnologia, porém pode se observar que esta taxa de crescimento foi irregular dentre as diferentes regiões da Europa. Na Alemanha e na região “Flemish” da Bélgica, a capacidade instalada de incineração processa atualmente cerca de 35% do total dos resíduos produzidos pela população local. Em outras regiões, porém, diversos fatores atrasaram a mudança para o uso dos incineradores no gerenciamento dos RSU. A oposição da população, amplamente baseada nas preocupações em relação aos impactos sobre o meio ambiente e à saúde humana das emissões, e – no caso da Finlândia – dificuldades na integração do sistema de energia elétrica já existente e o sistema de aquecimento com as plantas de incineração de resíduos. Por razões como estas, a capacidade de incineração de alguns países, como a Itália, está próximo aos 15% dos resíduos urbanos gerados, chegando a ser inferior aos 10% em países como a Hungria (EEA, 2009).

De acordo com a EEA (2009), em 1995 cerca de 62% dos RSU gerados na Europa foram aterrados. Já em 2007, esta média caiu para 42%, mostrando uma forte queda

da utilização desta que ainda é a principal forma de disposição na Europa e no mundo. Na contramão da tendência dos aterros, a utilização de incineração no tratamento dos RSU da mesma época, entre o ano de 1995 e de 2007, mostram uma tendência clara de crescimento da utilização desta forma de destinação, saindo de pouco mais de 10%, para aproximadamente 20% em 2007. A média global de RSU incinerados pelos países membros da UE-27(EU-27) no ano de 2007 ainda se mostra baixo principalmente pelo fato de treze países, de um total de vinte e sete, possuírem uma taxa de incineração entre 0 e 10%.

Como mostrado na tabela 9, a França e a Alemanha se destacam pelo grande número de plantas instaladas (129 e 67, respectivamente) em operação, além da alta capacidade de tratamento de resíduos (13,5 e 18,8 milhões t/ano respectivamente). O Reino Unido e alguns outros países, como a Itália e a Suécia, também possuem um grande potencial instalado para processamento dos RSUs, com capacidade para mais de 4 milhões de toneladas por ano. Ainda segundo a tabela, é revelada que a capacidade média de processamento das plantas de incineração na Europa ainda é muito reduzida, apenas 160 mil toneladas de resíduos por ano, porém alguns países possuem uma capacidade média de processamento de resíduos anual bem acima desta média. Os países as maiores capacidade instalada por planta são: Holanda, Hungria, Portugal e Alemanha (SANTOS, 2011).

A variação na forma de gerenciar os resíduos sólidos acaba por levar a um fato bastante curioso, os países que mais incineram na Europa são os país que mais recupera seus materiais. O fato pode ser comprovado por meio da figura 8, e Santos (2011) melhor resume esse conceito, dividindo esses países em três grupos.

Grupo 1 compreende os países que possuem altos níveis tanto de recuperação de materiais, como de incineração, e por conseqüência possuem baixos níveis de aterramento de resíduos. Os países que compõem este grupo, de forma geral, instituíram diversos instrumentos políticos/legais anteriormente às diretivas da UE, mostrando que a pro-atividade se mostrou determinante para o sucesso da gestão dos RSUs nestes países. Neste grupo estão incluídos países como a Alemanha, Dinamarca, Áustria, França, Bélgica e Holanda.

Países	Número de plantas WTE (A)	Resíduos tratados (milhões t/ano) (B)	Capacidade média anual por planta (B/A)
França	129	13,5	105 mil t/ano
Espanha	10	2,2	220 mil t/ano
Portugal	3	1,0	333 mil t/ano
Reino Unido	20	4,4	220 mil t/ano
Bélgica	16	2,7	169 mil t/ano
Holanda	11	6	545 mil t/ano
Luxemburgo	1	0,1	100 mil t/ano
Suíça	28	3,6	129 mil t/ano
Itália	49	4,5	92 mil t/ano
Áustria	9	1,6	178 mil t/ano
Alemanha	67	18,8	281 mil t/ano
República Tcheca	3	0,4	133 mil t/ano
Polónia	1	0,04	40 mil t/ano
Hungria	1	0,4	400 mil t/ano
Dinamarca	29	3,6	124 mil t/ano
Noruega	20	1	50 mil t/ano
Suécia	30	4,6	153 mil t/ano
Finlândia	2	0,2	100 mil t/ano
Eslováquia	2	0,2	100 mil t/ano
<b>TOTAL</b>	<b>431</b>	<b>68,8</b>	<b>160 mil t/ano</b>

Tabela 9 - Plantas de Incineração na Europa (Fonte: Santos, 2011)

O Grupo 2 compreende os países com altas taxas de recuperação de materiais e níveis medianos de incineração de RSU, com uma dependência mediana em relação aos aterros. De forma geral podemos dizer que nestes países a incorporação de políticas relacionadas aos resíduos apenas foram incorporadas após a criação das diretivas da UE, porém são países que fizeram esta incorporação de forma rápida e eficiente. Neste grupo estão incluídos países como Itália, Espanha, os países do Reino Unido e Finlândia.

O terceiro grupo, ou grupo 3, engloba os países no qual os níveis da recuperação de materiais e de incineração ainda são muito baixos, criando uma dependência muito forte pela disposição nos aterros. Neste grupo está a maior parte dos países que ainda estão no processo de incorporação das políticas e regulamentações das diretivas da União Europeia. Neste grupo estão incluídos países como Portugal, Grécia e países do leste Europeu como Bulgária, República Tcheca, Eslováquia, Polónia e Lituânia.

**NA EUROPA, QUANTO MAIS O PAÍS INCINERA, MAIS RECUPERA MATERIAIS (2010)**

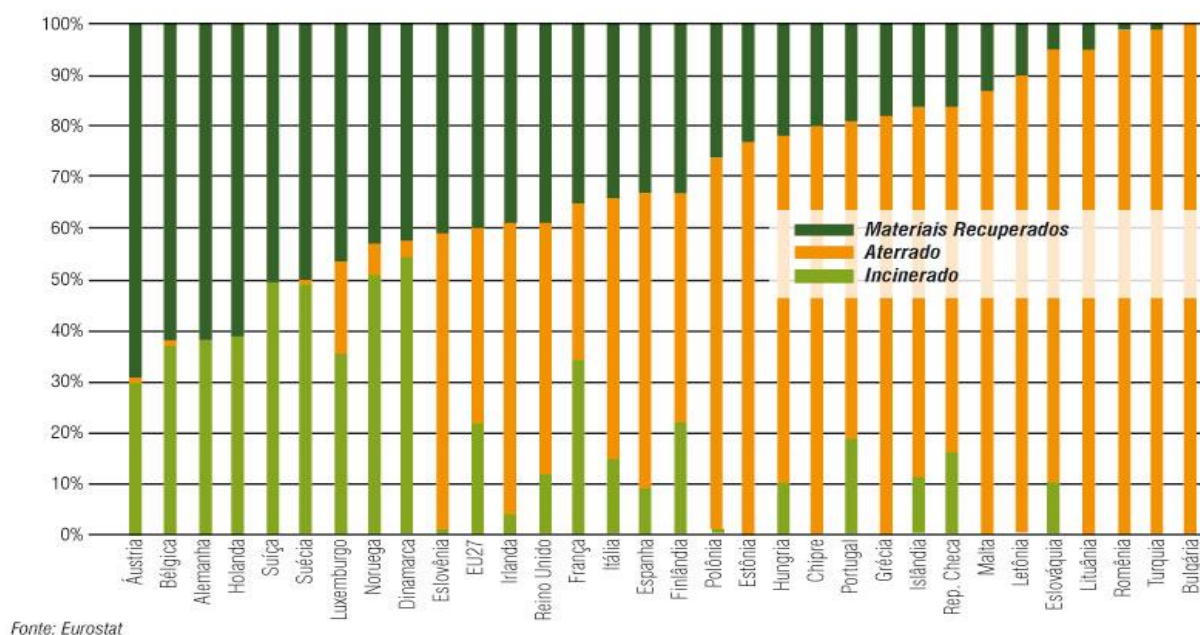


Figura 8 - Participação dos países da Europa na Recuperação, Aterramento e Incineração de Resíduos (Fonte: Santos (2011))

### 3.5 Caso São Bernardo

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (lei 12.305/2010) proíbe o armazenamento dos materiais em aterro sanitário sem tratamento prévio a partir de 2014, e a Política Estadual (lei 12.300/2006) requer o estabelecimento de metas e prazos para redução do volume de resíduos para disposição final. Enquanto a população cresce e a geração de lixo aumenta, o decreto 54.645, que regulamenta a Política Estadual de Resíduos Sólidos determina uma redução de 6% do volume para disposição final de rejeitos a cada cinco anos para a Região Metropolitana de São Paulo (BRASIL, 2010).

Visando equacionar o problema do gerenciamento dos resíduos sólidos no município, a prefeitura de São Bernardo lançou em 2011 um Edital para manejo e gestão dos resíduos sólidos do município, que prevê a implantação de uma Usina de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos. Segundo a Revista Infraestrutura Urbana, o município da Região Metropolitana de São Paulo tem 53,7% de seu território situado em área de proteção aos mananciais e elevado adensamento populacional, de forma que enfrenta dificuldades para implantação de aterro devido à ausência de área disponível e adequada, situação semelhante à de muitos municípios paulistas.

Com a licitação orçada em R\$ 4,3 bilhões e prazo de duração de 30 anos, a SBC Valorização de Resíduos terá como atribuição - além da construção de uma usina de

incineração -, o desenvolvimento de uma rede de coleta e destinação de resíduos. Além da construção do espaço verde, a limpeza da área será necessária para que o local possa abrigar a usina de lixo. Com capacidade para geração de até 22 megawatts/hora - o suficiente para atender a metade da demanda atual da cidade -, a usina terá um custo de construção de R\$ 600 milhões. A previsão é de que as obras sejam iniciadas em 2013, e a incineração passe a acontecer a partir de 2015. Entretanto, ainda não está definida a tecnologia que será utilizada na geração de energia (ENOSHITA, 2013).

Atualmente, o município gasta R\$ 14 milhões por mês para descartar as 700 toneladas de lixo produzidas diariamente na cidade. Atualmente os resíduos são enviados para o aterro Lara, em Mauá. Com o novo contrato, o custo será de R\$ 10 milhões/mês. Por outro lado, o consórcio poderá explorar a renda gerada pela venda de materiais recicláveis e da energia elétrica da usina. A unidade será instalada em uma área de 35 mil m<sup>2</sup>, onde era o antigo lixão do Alvarenga, desativado há dez anos. O plano de recuperação do solo, tratamento do chorume e captura dos gases ali produzidos também fazem parte da licitação e deve levar dois anos para ficar pronto, de acordo com previsão da prefeitura. Só então a usina poderá ser instalada. A expectativa é que as obras sejam iniciadas em janeiro de 2014 e, na metade do ano, se iniciem os testes de queima (ENOSHITA, 2013).

O empreendimento deve contar com áreas de recepção de resíduos, armazenamento, fornos combustíveis, filtros, caldeiras, equipamentos de geração de energia, equipamentos de controle de poluição do ar, sistema de tratamento de águas residuais, chaminés, dispositivos e sistemas de controle das operações dos fornos e de registro e monitoramento das condições de operação (PITA, 2011).

A adequação ambiental deve-se unir a viabilidade econômica. "Para que a produção de energia a partir de resíduos sólidos seja factível, é preciso extrair uma quantidade considerável de energia do processo", lembra o secretário de São Bernardo. Ele explica que, por esse motivo, a opção do município difere daquela adotada em países como a Alemanha onde é feita a queima total dos resíduos. Sem uma seleção prévia do material a ser queimado, o poder calorífico diminui e impediria uma alta eficiência energética do sistema (PITA, 2011).

Assim, o resíduo sólido de São Bernardo do Campo deve ser antes separado, e o material passível de reciclagem identificado previamente, sendo que a meta da gestão é elevar a coleta seletiva de 1% para 10% do total até 2017. Para isso, estão previstos

seis centrais de triagem do lixo, que deverão enviar para reciclagem 70 t de material por dia, em um projeto conjunto com cooperativa de catadores (PITA, 2011).

As centrais de triagem devem contar com sistemas de seleção mecânica como equipamento para abertura das embalagens plásticas, crivo rotativo, separador magnético, separador eletrostático e separador ótico. A fase de triagem, no edital de licitação, também prevê um processo manual de separação. Esta solução é apontada pelo diretor da Cetesb como uma opção importante ambientalmente porque justifica as controvérsias sobre o uso da combustão de lixo ser ecologicamente e socialmente responsável (PITA, 2011).

## 4. Métodos e Resultados

### 4.1 Processo proposto

O presente trabalho tem como objetivo a definição da melhor forma de disposição dos resíduos, visando seu aproveitamento energético. No artigo 8º da Lei nº 12.305 já mencionada anteriormente, a Política Nacional de Resíduos Sólidos ressalta como instrumento viável a cooperação técnica e financeira entre os setores públicos e privados para o desenvolvimento de pesquisas de novos produtos, métodos, processos e tecnologias de gestão, reciclagem, reutilização, tratamentos de resíduos e disposição final ambientalmente adequada de rejeitos.

Segundo o artigo 9 da referida lei, poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.

Sendo assim, este estudo propõe a recuperação energética dos resíduos urbanos rejeitados na coleta seletiva, ou seja, somente após a tentativa de redução, reutilização e reciclagem é que os rejeitos poderão ser destinados à incineração. A figura 9 contempla a ciclo do material após a coleta seletiva, e pode ser observado que a prioridade é para a matéria-prima para processos visando sua reciclagem. Por sua vez, os rejeitos desses materiais selecionados são coletados, transportados até uma unidade de tratamento energético, onde se inicia o processo de incineração.

Os modernos sistemas de tratamentos desses rejeitos garantem uma produção de energia ambientalmente adequada e eficiente. É importante salientar que se deve atender o critério de eficiência no tratamento térmico, não devendo ser utilizado resíduo com baixo valor energético agregado. Embora a classificação segundo o PCI (poder calorífico inferior) não deva ser tomada como definitiva para estabelecer a destinação do RSU, considera-se que:

- para  $PCI < 1.675$  kcal/kg, a incineração não é tecnicamente viável (além de dificuldades técnicas, exige ainda a adição de combustível auxiliar);
- para  $1.675$  kcal/kg  $< PCI < 2.000$  kcal/kg, a viabilidade técnica da incineração ainda depende de algum tipo de pré-tratamento que eleve o poder calorífico;
- para  $PCI > 2.000$  kcal/kg, a queima bruta (“massburning”) é tecnicamente viável.

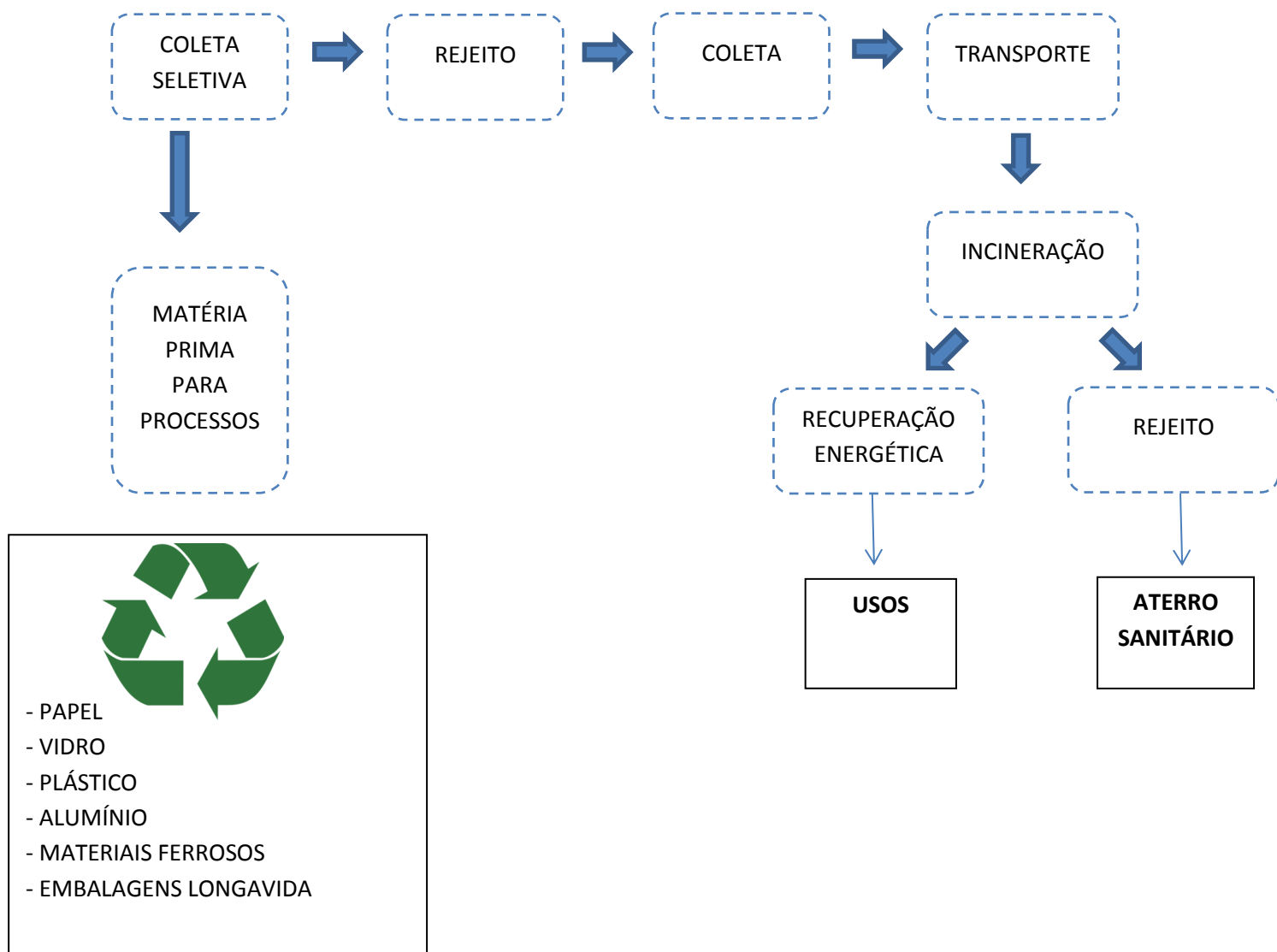


Figura 9 - Diagrama de blocos do ciclo do resíduo após a coleta seletiva (Fonte: O autor, 2013)

O estudo considerará os resíduos com poder calorífico acima de 2.000 Kcal/Kg, que tenham passado pelo processo de catação feito manualmente antes de irem para a unidade de tratamento. Após essa separação, o processo de incineração limpo e seguro contemplará as seguintes etapas indicadas nas figuras 10 e 11 - (FISIA BABCOCK ENVIRONMENT, 2010):

- Depósito de Resíduos: todo o resíduo coletado como rejeito da coleta seletiva será descarregado em um depósito (1) e homogeneizado por um guindaste.

Esse guindaste transportará essa mistura a tremonha de alimentação (2). Através de uma caneleta o resíduo chega ao alimentador (3) que leva o resíduo às grelhas de combustão, de acordo com os requisitos de controle de queima.

- Grelhas Móveis: O processo de incineração de resíduos ocorre nas grelhas móveis (4) que são constituídas por fileiras de barras, uma ao lado da outra. As fileiras de barras das grelhas são dispostas uma sobrepondo-se à outra e de forma contínua e alternada se movimentam para frente e para trás. O resíduo e, posteriormente escória, são transportados por essas fileiras até o fim das grelhas, onde a escória é depositada dentro do extrator de escória (5).
- Extrator de Escória: O extrator de escória (5) está parcialmente cheio de água, resultando na exclusão do ar entre o meio ambiente e a caldeira. A escória após as grelhas é resfriada com água e encaminhada pela haste do extrator a um transporte vibratório que leva ao depósito de escória (6).
- Controle do fogo e do ar: Os operadores da usina monitoram o processo de incineração nas grelhas (7) com CCTV (circuito fechado de televisão). O ar primário necessário para a incineração é suprido controladamente através das grelhas. Para obter uma queima ótima dos gases de combustão, ar adicional (ar secundário) é injetado acima das grelhas. Na caldeira, os gases de combustão quente são então resfriados até a temperatura desejada de saída dos gases de combustão.
- Caldeira: O calor dos gases de combustão é utilizado para aquecer a água desmineralizada nas superfícies de aquecimento do economizador (10). A água de alimentação da caldeira é então encaminhada ao tambor (11) que alimenta o evaporador operado por circulação natural. A mistura de água e vapor, que surge na radiação das paredes da caldeira (evaporador) (8), é separada no tambor, tornando-se água e vapor (11). O vapor é levado às superfícies de aquecimento do superaquecedor (9). Depois de aquecido a uma temperatura específica, o vapor é conduzido até a turbina (12).

- Turbina: Dentro da turbina (12), o vapor superaquecido aciona o rotor da mesma que logo após é condensado. A energia liberada durante esse processo é utilizada no gerador acoplado para produzir eletricidade, a qual é distribuída à rede pública. O condensado é coletado no tanque de água de alimentação (13) e retorna finalmente à caldeira.
- Absorvedor do tipo “Spray Dryer”: Na parte superior do absorvedor (14), água e leite de cal são injetados nos gases de combustão da caldeira. Ao descer pelo absorvedor, o resfriamento dos gases de combustão atinge a condição ótima de reação para absorver os poluentes ácidos. Após o resfriamento os gases são recirculados (produtos de reação separados no filtro de manga), reagente seco novo e carvão ativado são injetados no reator de fluxo forçado (15).
- Filtro de manga: Os poluentes ainda contidos nos gases de combustão reagem quimicamente ou são adsorvidos pelos sólidos e depois precipitados com as partículas de cinzas volantes nas mangas do filtro (16). Como um meio de filtragem, as mangas do filtro garantem que os gases de combustão filtrados cumpram com segurança a todos os requisitos ambientais e legais. Um alto percentual de produtos de reação é recirculado ao montante do filtro de mangas. O material recirculado pode ser umedecido para otimizar a utilização dos materiais de alimentação. Um fluxo parcial de produtos de reação é continuamente descarregado e transportado a silos (17) para eliminação.
- Ventilador: O ventilador (18) mantém a pressão baixa no processo de incineração e conduz os gases de combustão através da caldeira e do sistema de limpeza de gases. A pressão baixa garante também a hermeticidade relativa dos gases de combustão.
- Chaminé: Os gases de combustão limpos saem do processo para a atmosfera por meio da chaminé (19). Para melhorar a eficiência, são instalados mais trocadores de calor de condensação nas usinas de incineração de resíduos. Isso significa que um vapor de água limpo e puro é expelido pela chaminé, na forma de fumaça branca que se dissolve – um sinal de utilização ótima de energia. O rejeitos do processo são enviados a aterros sanitário.

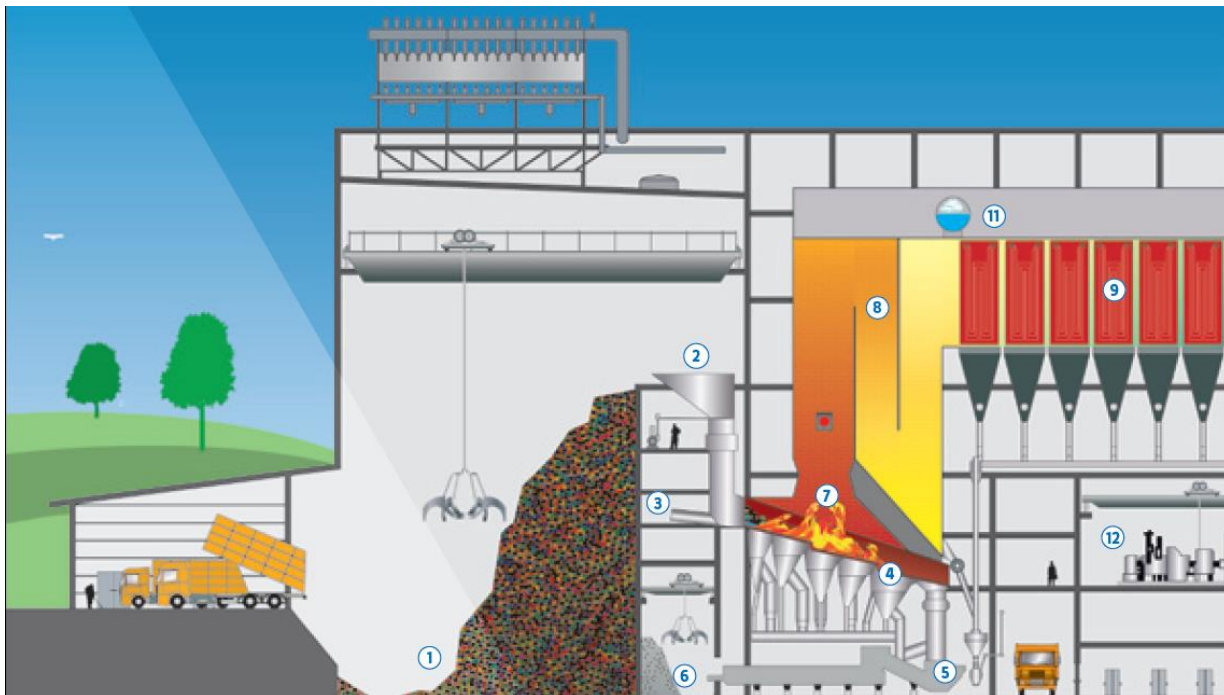


Figura 10 - Usina de Incineração (parte I) (Fonte: FISIA BABCOCK ENVIRONMENT, 2010).

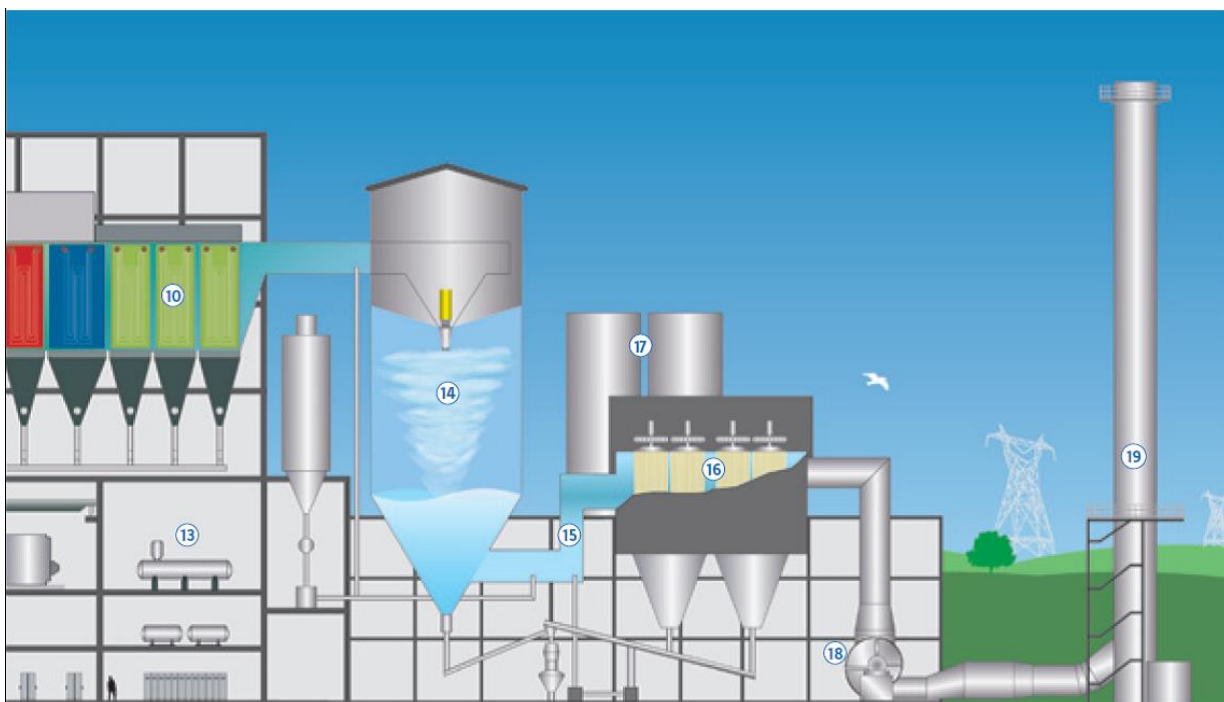


Figura 11 - Usina de Incineração (parte II) (Fonte: FISIA BABCOCK ENVIRONMENT, 2010).

## 4.2 Plano Governamental de Instalação de uma Usina de Incineração

O ciclo padrão para construção de uma usina de incineração envolve três fases: viabilidade, preparação do projeto e implementação do projeto. Ao final de cada uma delas, decisões governamentais irão aprová-la para dar início a próxima etapa. Desde o início da idéia do projeto até o funcionamento estima-se um prazo de cerca de 6 anos. O diagrama ilustrado na figura 12 representa as fases do projeto, os passos em cada fase e sua respectiva duração (RAND, HAUKOHL e MARXEN, 2000).

FASE DE VIABILIDADE	Pré-estudo de Viabilidade	6 meses
	Decisões Políticas	3 meses
	Estudo de Viabilidade	6 meses
	Novas decisões políticas	6 meses
FASE DE PREPARAÇÃO DO PROJETO	Estabelecimento das regras	6 meses
	Engenharia Financeira	3 meses
	Preparação da Licitação	6 meses
	Decisões governamentais	3 meses
FASE DE IMPLEMENTA- ÇÃO	Contrato e negociações	6 meses
	Construções e Supervisão	2,5 anos
	Comissionamento e testes	6 meses
	Operação e Manutenção	Indeterminado

Figura 12 - Fases para implantação de uma usina de incineração (Fonte: Adaptado de RAND, HAUKOHL e MARXEN, 2000).

Como pode ser observada, a fase de viabilidade é composta por quatro passos. No pré-estudo de viabilidade são considerados a quantidade de resíduo a ser incinerado, o valor calorífico, a capacidade da sua nova planta, a energia a ser vendida e alguns custos preliminares. Em seguida são feitas algumas análises governamentais em cima desse pré-estudo, e então será decidido sobre a continuidade ou a inviabilidade do projeto. Na próxima etapa, o estudo detalhado de viabilidade, são considerados todos os fatores do primeiro passo, porém em uma versão muito mais detalhada para em seguida ser definitivamente aprovado pelo plano de governo.

Na fase de preparação do projeto, primeiramente serão definidas todas as premissas básicas impostas pelo governo para caracterização do projeto. A partir desses detalhes, será feito um estudo financeiro acima da obra, o qual já abordará uma estimativa de preço que será estipulada com orçamento. Em seguida são preparados todos os documentos para o processo licitatório (especificação técnica e comercial do edital e qualificação exigida dos futuros contratados). No fim desta fase, o governo decide como o capital será disponibilizado e ratifica seu de acordo para início da próxima fase.

A última fase trata-se da implementação do projeto, no qual se decidirá a empresa vencedora e serão findados os contratos. A construção e supervisão da obra tem em média duração de 2 anos e meio, porém esse tempo dependerá do acordo entre a governança local e a vencedora do processo de licitação. O comissionamento e testes para segurança são feitos em um prazo de 6 meses em média, e em seguida é dado o aval para funcionamento.

### **4.3 Estudo de Viabilidade Energética e Econômica**

A incineração de resíduos não é uma operação corriqueira no Brasil. Além das normas ambientais serem bastante severas, a prática envolve um alto custo de investimento, operação e manutenção. O alto custo líquido do tratamento é um fator crítico na implantação de uma usina de incineração e o financiamento desta pode ser feito considerando subsídios governamentais e arrecadação de impostos.

No estudo feito por Rand, Haukhol e Marxen (2000) ao Banco Mundial, um dos fatores chaves para o processo ser economicamente viável é a capacidade da linha de produção ser pelo menos 240 t/dia (10 t/h). Uma usina deve conter ao menos 2 linhas de tratamento.

#### **Custo de Investimento**

O custo atual de investimento em uma usina de incineração depende de vários fatores, principalmente do tamanho e capacidade – o número de toneladas que serão processadas por dia e o correspondente valor calorífico do resíduo. Usinas de baixa capacidade são mais caras do que usinas de alta capacidade em termos de custo de investimento por tonelada. O custo do investimento em função da capacidade anual da nova usina está estimado na figura 13. No estudo, um baixo valor calorífico de 9MJ/Kg (2150 kcal/kg) é estipulado como base e é considerado que a maior parte dos maquinários é importada.

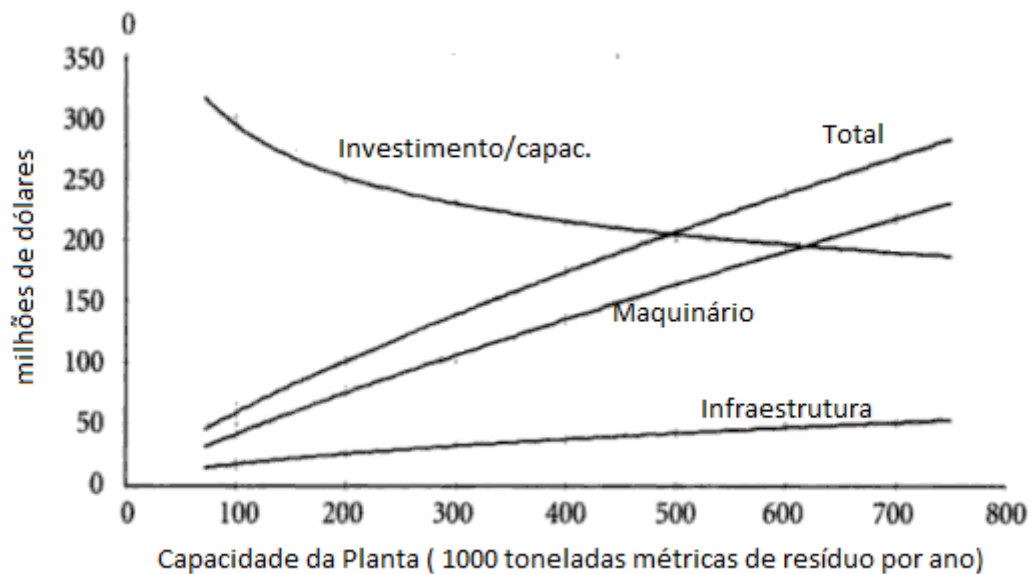


Figura 13 - Gráfico: Capacidade da Planta x Custo de Investimento (Fonte: RAND, HAUKOHL e MARXEN, 2000).

### Custo de Operação e Manutenção

Os custos de operação e manutenção envolvem:

- ✓ Custos fixos de operação
  - Custo de administração e salários
  
- ✓ Custos variáveis de operação
  - Custo com produtos químicos e para operação e supervisionamento do sistema de tratamento dos gases de emissão e do mesmo;
  - Custo de eletricidade (turbinas);
  - Custo de água e manejo desta água utilizada no tratamento;
  - Custo com o disposição dos resíduos;
  
- ✓ Custos de manutenção
  - Custo para manter o maquinário (como peças)
  - Custo para manter a construção (reformas, pinturas, etc)

Os custos fixos de operação dependem da quantidade de empregados, a porcentagem de pessoas com alto grau de instrução e engenheiros, além do piso

salarial na região de instalação. Em média, em país do Sul e Sudeste da Ásia, este custo está estimado em 2% do investimento total (RAND, HAUKOHL e MARXEN, 2000).

Os custos variáveis de operação dependerão do sistema específico escolhido para o controle e tratamento dos gases e, além disso, do custo do manejo dos rejeitos gerados na combustão dos resíduos. O custo anual de manutenção é estimado em 1% do investimento da construção mais 2,5% do investimento em maquinário. A figura 14 representa o resultado do custo anual de operação e manutenção segundo critérios estabelecidos pelo Banco Mundial (RAND, HAUKOHL e MARXEN, 2000).

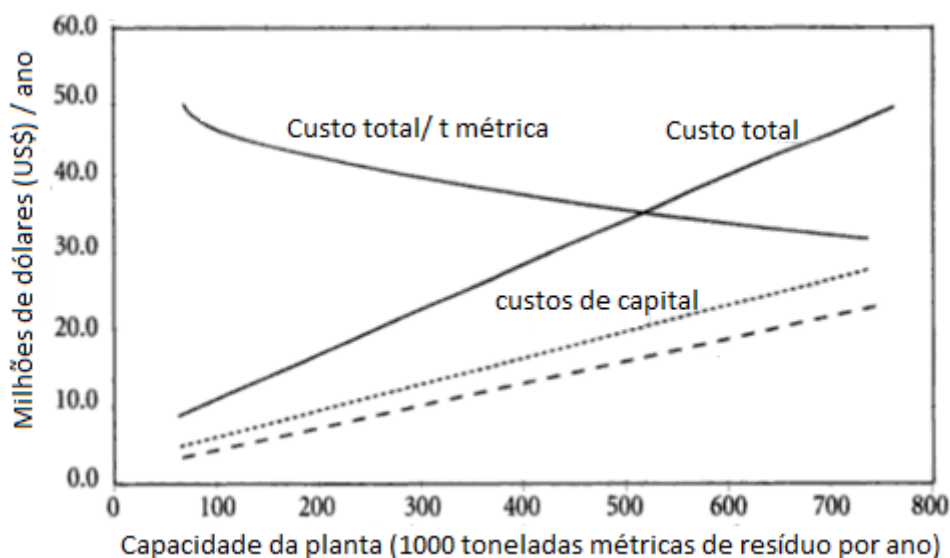


Figura 14 - Gráfico: Capacidade da Planta x Custo de Manutenção (Fonte : Rand, Haukhol e Marxen, 2000).

### Venda de Energia

A venda da energia produzida na usina é um elemento bastante significativo no cálculo do fluxo financeiro líquido gerado. Segundo Rand, Haukhol e Marxen (2000) em casos extremos a venda dessa energia pode cobrir de 80 a 90% dos custos totais, mas na média dos países da Europa e América do Norte essa venda supre 40% dos custos, com resíduos de poder calorífico na faixa de 9 a 13MJ/kg.

A energia potencial produzida depende bastante do poder calorífico líquido do resíduo a ser processado. A tabela 15 apresenta dados da quantidade de energia produzida

por tonelada de resíduo trabalhado, em função de seu valor energético agregado, e são mencionados valores tanto para venda de calor e venda de energia separadamente quanto para a combinação das duas (o banco mundial considerou o preço de venda de calor US\$15/MWh e preço de venda de eletricidade de US\$35/MWh).

Poder Calorífico $H_{inf}$ MJ/kg	Combinação			Apenas Calor		Apenas Energia	
	Energia MWh/t	Calor MWh/t	Renda US\$/t	Calor MWh/t	Renda US\$/t	Energia MWh/t	Renda US\$/t
6	0.33	1.08	28	1.33	20	0.58	20
7	0.39	1.26	33	1.56	23	0.68	24
8	0.44	1.44	37	1.78	27	0.78	27
9	0.50	1.63	42	2.00	30	0.88	31
10	0.56	1.81	47	2.22	33	0.97	34

### Cálculo do custo líquido do tratamento

O custo do tratamento líquido é calculado baseado nas estimativas de custo e o retorno potencial da venda de energia. Para este estudo de viabilidade o valor energético agregado para o resíduo incinerado será considerado 9MJ/kg. Rand, Haukhol e Marxen (2000) definem uma função gráfica para o custo total e líquido do tratamento dos resíduos sólidos em uma usina de incineração, mostrada na figura 16.

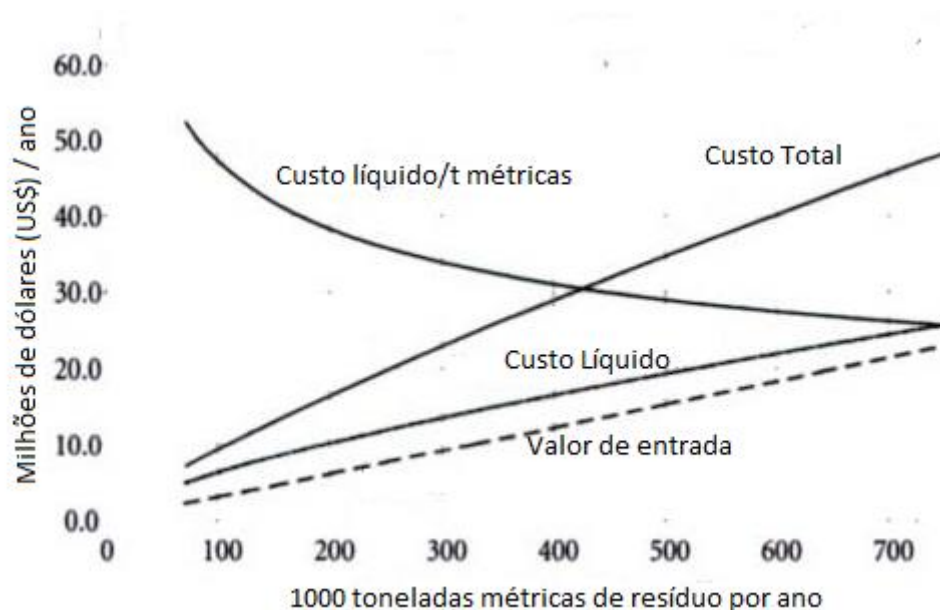


Figura 16 - Gráfico de custos líquidos para implantação de uma usina de incineração (Fonte: Rand, Haukhol e Marxen, 2000).

## 4.4 Estudo aplicado ao Brasil

### 4.4.1 População Mínima para a implantação da usina

Assim como ressaltado no Estudo de Viabilidade Energética e Econômica, segundo o Banco Mundial é fundamental produzir no mínimo 240 t/dia (10 t/h) e contemplar ao menos 2 linhas de produção para construção de uma usina de incineração com aproveitamento energético, ou seja, o local deverá produzir no mínimo 480 t/dia de Resíduo Sólido Urbano para o projeto ser viável. Como mostrado na figura 17, extraída do Panorama de Resíduos Sólidos 2011 realizado pela ABRELPE, o país produz cerca de 381 Kg/hab./ano ou 1,06 Kg/hab./dia. O quadro abaixo sintetiza esses dados e apresenta a população mínima para tornar viável a construção da usina.

I - Condição Mínima:
- 240 ton/dia x 2 linhas de produção
II - Geração de RSU per capita:
- 381,6 Kg/hab/ano = 1,06 Kg/hab/dia
A partir de I e II:
= 480 ton/dia / 1,06Kg/hab/dia
<b>= 452.830,18 habitantes</b>

Quadro 10 - Cálculo da população mínima para viabilidade de uma usina de incineração (Fonte: O autor, 2013).

### 4.4.2 Gasto para implantação de uma usina de incineração considerando a população mínima

Para calcular o custo líquido de tratamento foi utilizado o gráfico 16 apresentado anteriormente, no qual a curva de custo líquido é dada pela curva de custo total menos a curva de valor de entrada (venda de energia).

Aproximando linearmente a curva “ Net Cost” a partir dos pontos (200,10) e (600,20), obtêm-se a reta  $y = \frac{1}{40}x + 5a$ , sendo x a milhagem de tonelada métrica de resíduo e y a milhagem de dólares gasto por ano. Sendo assim, para a quantidade anteriormente definida, de 480 t/dia, ou 172.800 toneladas de resíduos produzidos, calcula-se um custo de 9,32 milhões de dólares por ano, equivalente a cerca de 18,64 milhões de reais.

#### 4.4.3 A escolha da Turbina Ideal na Usina

Considerando o pior e melhor caso para o valor energético dos materiais a serem incinerados (6MJ/Kg e 10MJ/Kg), a partir dos dados da tabela 11 apresentada no estudo de viabilidade econômica e energética pode-se definir a potência de saída quando o processo é apenas para produção de energia elétrica.

I - Condição Mínima	I - Condição Mínima
- 10t/hora por linha = 10t/hora	- 10t/hora por linha = 10t/hora
II - Valor Energético Mínimo : 6MJ/Kg	II - Valor Energético Máximo: 10MJ/Kg
->Energia : 0,58MWh/t (35% de eficiência)	->Energia : 0,97MWh/t (35% de eficiência)
A partir de I e II:	A partir de I e II:
Potência = 10ton/h x 0,58MWh/t	Potência = 10ton/h x 0,97MWh/t
<b>Potência = 5,8 MW</b>	<b>Potência = 9,7 MW</b>

Quadro 11 - Cálculo da Potência para o Pior e Melhor Caso (Fonte: O autor, 2013)

A grande variedade nas classes de turbinas a vapor industriais permite escolher o maior custo benefício para cada caso. Primeiramente a turbina escolhida deverá cumprir rigorosamente com as diretrizes estabelecidas no padrão de qualidade ISO 9001 e ISO 14001. Segundo o portfólio de turbinas a vapor para usinas de incineração da empresa alemã Siemens, a escolha da turbina requer conhecimento da pressão, temperatura e, sobretudo, da potência de saída. A imagem 19 apresenta o alcance de potência para cada modelo de turbina da empresa Siemens (SIEMENS, 2013).

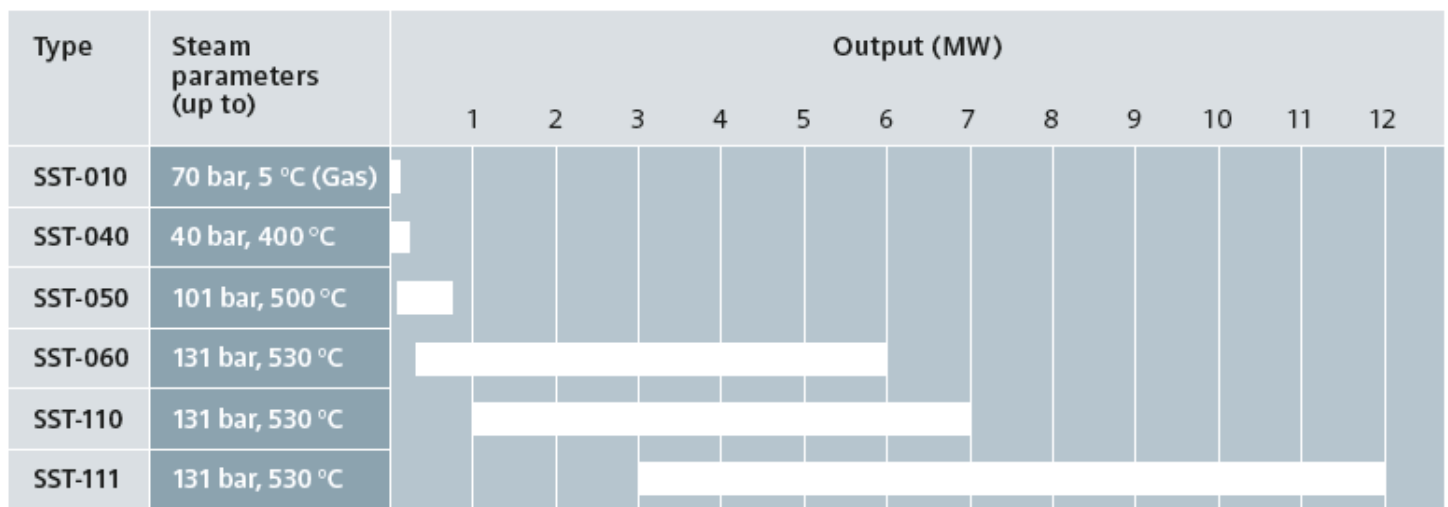


Figura 17 - Potência de Saída para modelos de turbina Siemens (Fonte: (SIEMENS, 2013))

A partir dos dados da figura 17, a melhor turbina a ser implementada em um projeto no Brasil seria SST-110 para potência de 5,8W a 7W (menor custo de implantação) e a SST-111 para maiores projetos (potência acima de 7MW). As especificações das turbinas escolhidas são:

- **SST-110**

Formalmente conhecida como versão TWIN, a SST-10 apresenta a maior eficiência em relação ao seu custo e alto desempenho. Com uma caixa dupla ligada a um inversor, essa turbina pode trabalhar em diferentes linhas de produção de calor. (SIEMENS, 2013)



Figura 18 - Turbina SST-110 Siemens (Fonte: (SIEMENS, 2013))

<b>SST-110</b>
<b>Dados Técnicos</b>
Potência de saída : 7MW
Pressão de Entrada: até 131 bar
Temperatura de entrada do vapor saturado seco: até 530 C
Rápido acionamento
Pressão de escape: contrapressão ou vácuo
<b>Dimensões</b>
Comprimento: aproximado de 6m
Largura: 2.8m
Altura: 3.2m
<b>Características</b>
Tipos: Contrapressão, extração ou condensação
Unidade de óleo integrado na estrutura de base
Válvulas de controle disponíveis
Rápido início, sem pré aquecimento
Arquitetura compacta
Pressão controlada
Aplicações de alta ou baixa pressão
Apropriado para expansão de gás
Indicado pelo Ciclo de Rankine

Quadro 12 - Especificação da turbina selecionada para mínimo custo de instalação (Fonte: (SIEMENS, 2013))

- **SST-111**



Figura 19 - Turbina SST-111 Siemens (Fonte: (SIEMENS, 2013))

A SST-111 é uma turbina de calor com caixa dupla ou tripla e com um inversor integrado, projetada para operações flexíveis e de grande eficiência. (SIEMENS, 2013)

<b>SST-111</b>
<b>Dados Técnicos</b>
Potência de saída : 12MW
Pressão de Entrada: até 131 bar
Temperatura de entrada do vapor saturado seco: até 530° C
Pressão de Saída: até 0.06 bar
<b>Dimensões</b>
Comprimento: aproximado de 8m
Largura: 4m
Altura: 4m
<b>Características</b>
Tipo: condensação
Unidade de óleo integrado na estrutura de base
Válvulas de controle disponíveis
Rápido início, sem pré-aquecimento
Arquitetura compacta
Pressão controlada
Aplicações de alta ou baixa pressão
Possibilidade de reaquecimento

Tabela 13 - Especificação da turbina selecionada para projetos maiores (Fonte: (SIEMENS, 2013))

## 5. Conclusão

O trabalho realizado nesta monografia visou apresentar um estudo de viabilidade para a implantação de usinas de incineração para resíduos sólidos urbanos em algumas cidades do Brasil. Através de informações do contexto histórico dos resíduos sólidos e suas definições de acordo com a legislação brasileira e planos nacionais, foi possível traçar diretrizes para um adequado tratamento dos mesmos visando à recuperação energética. O processo proposto tratou da incineração dos rejeitos da coleta seletiva com alto valor energético, ou seja, serão encaminhados aos incineradores os resíduos com poder calorífico maior que 2000 Kcal/Kg que não forem aproveitados na reciclagem.

Constatou-se que o processo governamental da licitação é bastante demorado, o que faz com que a implantação leve aproximadamente 6 anos. A familiarização com as etapas dessa usina foi importante para ressaltar a adequação ambiental, bem como para inferir informações para o estudo de viabilidade. Para atender as condições mínimas impostas no estudo do Banco Mundial, concluiu-se que a população de uma determinada região deve ser no mínimo 452.830 habitantes. Ressalta-se que esse fato não garante em sua totalidade a viabilidade de uma nova usina, cabendo um estudo mais detalhado.

Outro resultado obtido foi o gasto mínimo de 18,64 milhões de reais por ano para tratamento desses rejeitos. Esse valor dependerá de diversos fatores, como a taxa do câmbio para manutenção de equipamentos importados, a infraestrutura do local de instalação, preço de venda da energia e quantidade de empregados. Por fim foi proposto um modelo de turbina adequado para garantir o maior custo-benefício da nova usina. O trabalho pode ser utilizado em futuras pesquisas na área de resíduos sólidos e fontes alternativas de energia.

## Revisão Bibliográfica

ABRELPE, A. B. D. E. D. L. P. E. R. E. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo. 2011.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. ANEEL. Brasília. 2002.

ANEEL, A. N. D. E. E. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3 ed. ed. Brasília: [s.n.], 2008.

BRASIL. **Lei N. 12.305 - Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília: [s.n.], 2010.

EEA, E. E. A. **Diverting waste from Landfill**. [S.l.]. 2009.

EMAE. **Compare o método tradicional e a queima de resíduos**. São Paulo. 2012.

ENOSHITA, E. DiárioSP. **DiarioSP**, 2013. Disponível em:  
<<http://www.diariosp.com.br/noticia/detalhe/25602/Usina+de+lixo+de+Sao+Bernardo+fica+para+2015>>. Acesso em: 15 Maio 2013.

EPE, E. D. P. E. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande**. Rio de Janeiro, p. 77. 2008.

FISIA BABCOCK ENVIRONMENT. **Energia a partir do lixo**. Gummersbach. 2010.

GRIPP, W. G. **Aspéctos Técnicos e ambientais da incineração de resíduos sólidos urbanos: considerações sobre a proposta de São Paulo**. São Carlos. 1998.

GRUPO VIRTUOUS. Incineração. **Só Biologia**, 2008. Disponível em:  
<<http://www.sobiologia.com.br/figuras/Solo/incineracao.gif>>. Acesso em: Maio 2013.

IBGE, I. B. D. G. E. E. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Rio de Janeiro. 2010.

ISWA, I. S. W. A. [S.l.].

LEMOS, P. F. I. **Resíduos sólidos e responsabilidade civil pós-consumo**. [S.l.]: Revista dos Tribunais, 2011.

LIMA, A. X. **Estudo de Viabilidade de uma Usina de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos**. [S.l.]. 1994.

MARTINS, M. J. Saneamento dos Resíduos Sólidos. **Site da Marcasaude**, Janeiro 2012. Disponível em:

<[http://www.marcasaude.com.br/pdf/saude\\_e\\_ambiente/saneamento\\_dos\\_residuos\\_solidos.pdf](http://www.marcasaude.com.br/pdf/saude_e_ambiente/saneamento_dos_residuos_solidos.pdf)>. Acesso em: 2013 Abril.

MASSUKADO, L. M. **Sistema de Apoio a Decisão: Avaliação de Cenários de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos Domiciliares**. São Carlos. 2001.

MENEZES, R. A. A.; GERLACH, J. L.; MENEZES, M. A. **Estágio Atual da Incineração no Brasil**. Associação Brasileira de Limpeza Pública. Curitiba. 2000.

MICHAELS, T. **The 2007 ISWA Directory of Waste-to-Energy Plants**. ISWA. [S.l.]. 2007.

MUNFORD, L. **A cidade na história**. [S.l.]: Martins Fontes, 1991.

P. SIMMONS, N. G. S. M. K. N. J. T. N. J. T. **The state of Garbage in America**, 2006.

PASSINATO, C. D. B. **Pesquisas de Química**, 2008. Disponível em: <<http://crispassinato.wordpress.com/2008/07/15/o-lixo-e-o-meio-ambiente-panorama-internacional/>>. Acesso em: 2013.

PITA, M. **Infraestrutura Urbana**, 2011. Disponível em: <<http://www.infraestruturaurbana.com.br/solucoes-tecnicas/5/artigo224674-1.asp>>. Acesso em: 25 maio 2013.

PSOMOPOULOS, C. S. **Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA**. [S.l.]. 2009.

RAND, T.; HAUKOHL, J.; MARXEN, U. **Municipal Solid Waste Incineration - Requirements for a Successful Project**. Washington, D.C.: [s.n.], 2000.

RISCADO, A. **Racionalização da geração, sistemas de coleta e disposição de resíduos, geração de insumos e energia, gestão de resíduos em obras**. ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade. Rio de Janeiro. 2010.

SANTOS, G. D. D. **ANÁLISE E PERSPECTIVAS DE ALTERNATIVAS DE DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: O CASO DA INCINERAÇÃO E DA DISPOSIÇÃO EM ATERROS**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 193. 2011.

SCHALCH, V. **Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos. Notas de Aula**, São Carlos, 2012.

SIEMENS. Siemens. **Site da Siemens**, 2013. Disponível em: <[www.siemens.com/energy/steamturbines](http://www.siemens.com/energy/steamturbines)>. Acesso em: março 2013.

SIMIÃO, J. **Gerenciamento dos Resíduos Sólidos Industriais em uma Empresa de Usinagem sobre o Enfoque da Produção Mais Limpa**. São Carlos. 2011.

SIMMONS, P. et al. **The state of Garbage in America**. **BioCycle**, v. 47, n. 4, p. 26.

WORLD BANK. **Municipal Solid Waste Incineration**. Washington D. C. 1999.

