

Fundação Estadual do Meio Ambiente
Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento
Gerência de Energia e Mudanças Climáticas

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: GUIA DE ORIENTAÇÕES PARA GOVERNOS MUNICIPAIS DE MINAS GERAIS

FEAM/DPED/GEMUC

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS:
GUIA DE ORIENTAÇÕES PARA GOVERNOS MUNICIPAIS
DE MINAS GERAIS**

Fundação Estadual do Meio Ambiente
Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento
Gerência de Energia e Mudanças Climáticas

Maio/2012

Belo Horizonte Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientações para governos municipais de Minas Gerais.	Belo Horizonte	163p.	Maio/2012
---	----------------	-------	-----------

© 2012 Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM

É permitida a reprodução desde que seja citada a fonte.

Governo do Estado de Minas Gerais

Antônio Augusto Junho Anastasia – Governador

Secretaria de Estado do Meio Ambiente
e Desenvolvimento Sustentável – SEMAD

Disponibilização Online

Adriano Magalhães Chaves – Secretário

Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM
Ilmar Bastos Santos – Presidente

Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento
Janaína Maria França dos Anjos

Corpo Editorial e Revisão:
Abílio César Soares de Azevedo
Cibele Mally de Souza
Consuelo Ribeiro de Oliveira
Felipe Santos de Miranda Nunes
Laura Maria Jacques Leroy

Gerência de Energia e Mudanças Climáticas
Felipe Santos de Miranda Nunes

Redação:

Abílio César Soares de Azevedo
Cibele Mally de Souza
Consuelo Ribeiro de Oliveira
Natália de Oliveira Silveira

Diagramação e Normalização:

Cibele Mally de Souza
Natália de Oliveira Silveira

Rodovia Prefeito Américo Gianetti, s/n – Prédio Minas, 1º andar - Bairro Serra Verde - Belo Horizonte - Minas Gerais
Brasil - CEP: 31630-900

Home page: <http://www.feam.br/mudancas-climaticas>

F981a Fundação Estadual do Meio Ambiente.
Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientação
para governos municipais de Minas Gerais / Fundação Estadual do Meio Ambiente.
--- Belo Horizonte: FEAM, 2012.
163 p. ; il.

FEAM-DPED-GEMUC.

1. Resíduo sólido urbano – Aproveitamento energético. 2. Resíduo sólido urbano – tratamento térmico e biológico. 3. Resíduo sólido – gestão. 4. Consórcio público. 5. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. 5. Regularização ambiental. I. Título.

CDU: 628.477:504

SIGLAS E SÍMBOLOS

% – percentagem ou porcentagem
AAF – Autorização Ambiental de Funcionamento
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social
CDR – Combustível Derivado de Resíduos
CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais
CERH – Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CNPJ – Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica
COFINS – Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
DN – Deliberação Normativa
DQO – Demanda Química de Oxigênio
FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente
GDL - Gás de lixo (biogás)
GEE – Gases de Efeito Estufa
ICMS – Imposto sobre Operações Relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação
IN – Instrução Normativa
ISO – <i>International Organization for Standardization</i>
ISSQN – Imposto sobre Serviços de Qualquer Natureza
LI – Licença de Instalação
LO – Licença de Operação
LP – Licença Prévia
MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MP – Material Particulado
NBR – Norma Brasileira
NMOCs – Compostos Orgânicos Não Metano
ONU – Organização das Nações Unidas
PCI – Poder Calorífico Inferior

SIGLAS E SÍMBOLOS (Continuação)

PCS – Poder Calorífico Superior
pH –Potencial Hidrogeniônico
PIS – Programa de Integração Social
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos
PRONAR – Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar
RCE – Reduções Certificadas de Emissão
RSS – Resíduos de Serviços de Saúde
RSU – Resíduo(s) Sólido(s) Urbano(s)
SDA – Secretaria de Defesa Agropecuária do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
SEDRU – Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional e Política Urbana
SEMAD – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SPE – Sociedade de Propósito Específico
ST – Sólidos Totais
THC – Hidrocarbonetos Totais
TJLP – Taxa de Juros de Longo Prazo
TOC – Carbono Orgânico Total
UHC – Hidrocarbonetos não Queimados
USEPA – <i>United States Environmental Protection Agency</i>
VOC – Compostos Orgânicos Voláteis

ELEMENTOS E COMPOSTOS QUÍMICOS

As – arsênio

C – carbono

Cd – cádmio

CH₄ – metano

Cl₂ – gás cloro ou cloro gasoso

Co – cobalto

CO – monóxido de carbono

CO₂ – dióxido de carbono ou gás carbônico

Cr – cromo

Cu – cobre

H₂ – hidrogênio gasoso

H₂O – água

H₂S – gás sulfídrico ou sulfeto de hidrogênio

HCl – ácido clorídrico

HF – ácido fluorídrico

Hg – mercúrio

Mn – manganês

N – nitrogênio

N₂ – nitrogênio gasoso

N₂O₅ – pentóxido de nitrogênio

NH₃ – amônia

Ni – níquel

NO – monóxido de nitrogênio ou óxido nítrico

NO₂ – dióxido de nitrogênio

NO_x – óxidos de nitrogênio

O₂ – oxigênio gasoso

Pb – chumbo

Sb – antimônio

Se – selênio

Sn – estanho

SO_x – óxidos de enxofre

SO₂ – dióxido de enxofre

SO₃ – trióxido de enxofre

Te – telúrio

Tl – tálio

V – vanádio

UNIDADES DE MEDIDA

°C – grau Celsius

μm – micrometro

atm – atmosfera

cm – centímetro

cm² – centímetro quadrado

GHz – gigahertz

hab. – habitante

h - hora

kcal – quilocaloria

kg – quilograma

kJ – quilojoule

km – quilômetro

km² – quilômetro quadrado

kW – quilowatt

kWh – quilowatt-hora

m – metro

m³ – metro cúbico

MHz – megahertz

MJ – megajoule

mm – milímetro

MPa – megaPascal

MW – megawatt

mW – miliwatts

MWe – megawatt elétrico

MWh – megawatt-hora

Nm³ – normal metro cúbico (1 atm e 0 °C)

Ω (ohm) – medida da resistência elétrica

ppm – partes por milhão

ppm_v – partes por milhão em volume

s – segundo

t – tonelada

tCO₂eq – toneladas equivalentes de CO₂

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Geração média <i>per capita</i> de resíduos sólidos urbanos no Brasil.	15
Tabela 2 - Distribuição das sedes municipais no estado de Minas Gerais, segundo tamanho da população urbana.	17
Tabela 3 - Ações e metas físicas do Projeto Estruturador - Qualidade Ambiental - Resíduos Sólidos do governo do estado de Minas Gerais.	21
Tabela 4 - Poder calorífico inferior (PCI) de alguns resíduos sólidos urbanos.	29
Tabela 5 - Classificação simplificada das modalidades de pirólise.	33
Tabela 6 - Efeitos da temperatura na pirólise de RSU.	34
Tabela 7 - Características dos gaseificadores.	36
Tabela 8 - Estimativas da quantidade mínima de RSU e geração de energia elétrica para tecnologias usuais de aproveitamento energético.	66
Tabela 9 - Características de alguns dos principais incineradores de resíduos instalados no Brasil.	68
Tabela 10 - Percentual de lixo urbano incinerado em países desenvolvidos.	71
Tabela 11 - Destino dos resíduos em alguns países desenvolvidos (1994).	71
Tabela 12 - Dados técnicos de plantas de incineração de RSU visitadas pela CEMIG em 2009.	72
Tabela 13 - Dados técnicos de plantas de biometanização e gaseificação de resíduos orgânicos visitadas pela CEMIG em 2009.	75
Tabela 14 - Custos percentuais de investimento em relação ao custo total de uma planta de incineração.	76
Tabela 15 - Resumo dos dados das usinas hipotéticas de incineração de RSU – estudo ENGEBIO.	77
Tabela 16 - Simulação dos valores da implantação da UAER em duas etapas – estudo ENGEBIO.	77
Tabela 17 - Custos de investimentos em usina termelétrica a biogás de aterro com potência instalada de 3,2 MW (valores estimados para 2008).	79
Tabela 18 - Emissões evitadas por tecnologia.	99
Tabela 19 - Características gerais de equipamentos de depuração dos efluentes atmosféricos.	132
Tabela 20 - Características de alguns tecidos usados em filtros de mangas.	135
Tabela 21 - Características de geração de energia de tecnologias comerciais de máquinas térmicas.	148

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tecnologias para a limpeza de gás em sistemas integrados gaseificação e ciclo combinado.	39
Quadro 2 - Municípios de Minas Gerais com indústrias cimenteiras ambientalmente licenciadas para o coprocessoamento de resíduos.....	68
Quadro 3 - Vantagens e desvantagens de algumas das tecnologias usuais de aproveitamento energético de resíduos.	80
Quadro 4 - Prazo de validade dos certificados de regularização ambiental.	88
Quadro 5 - Porte e potencial poluidor na Deliberação Normativa COPAM n. 74/2004 aplicáveis às atividades apresentadas neste Guia.....	88
Quadro 6 - Cronograma de metas do programa de segregação de resíduos, a partir da concessão da licença de operação do sistema de coleta e de tratamento térmico.	90
Quadro 7 - Métodos preventivos e corretivos para redução da emissão de NO _x	139
Quadro 8 - Vantagens e desvantagens dos métodos biológicos.	143

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição gravimétrica dos RSU no Brasil e em Minas Gerais.	19
Figura 2 - Evolução do tratamento/disposição final dos resíduos sólidos urbanos no estado de Minas Gerais.	20
Figura 3- Representação da grelha no forno - caldeira.	26
Figura 4 - Diagrama de fluxo do processo de incineração, tipo combustão em grelha, com recuperação de energia.	27
Figura 5 - Diagrama de fluxo do processo no reator pirolítico.	32
Figura 6 - Desenhos esquemáticos dos gaseificadores contracorrente e de leito fluidizado.	37
Figura 7 - Tocha de plasma e representações esquemáticas do dispositivo gerador e do forno de plasma.	40
Figura 8 - Fluxograma esquemático de uma instalação com o processo plasma gaseificação.	41
Figura 9 - Faixas de frequência de radiações eletromagnéticas (em Hertz).	42
Figura 10 - Aspecto físico e princípio de funcionamento do magnetron.	43
Figura 11 - Representação esquemática do processo de microondas.	44
Figura 12 - Fluxograma do processo e respectivos pontos de entrada de resíduos.	46
Figura 13 - Representação esquemática da biorrefinaria pelo processo B.E.M.	50
Figura 14 - Representação esquemática do processo de digestão anaeróbia.	52
Figura 15 - Exemplos de unidades de processo utilizadas com digestores anaeróbios.	54
Figura 16 - Representação esquemática de uma leira com as condições ambientais ótimas na compostagem.	56
Figura 17 - Foto de um túnel de compostagem.	56
Figura 18 - Representação esquemática simplificada do processo de captação e tratamento do biogás.	60
Figura 19 - <i>Flares</i> . a) <i>flare</i> enclausurado (fechado); b) <i>flare</i> aberto.	61
Figura 20 - Rotas para utilização de gás de aterro (GDL).	64
Figura 21 - Curvas de projeção de geração e recuperação de biogás do aterro sanitário de Uberaba/MG.	83
Figura 22 - Determinação da classe do empreendimento conforme Deliberação Normativa COPAM n. 74/2004.	87
Figura 23 - Ciclo do projeto de MDL.	100
Figura 24 - Representações esquemáticas de coletores de câmaras gravitacionais múltiplas e inerciais.	133
Figura 25 - Representação esquemática de ciclone e de filtro de mangas do tipo de jato de pressão.	134
Figura 26 - Foto de uma manga de tecido especial Ryton.	134
Figura 27 - Representação esquemática de precipitador eletrostático.	136
Figura 28 - Representação esquemática de lavadores úmidos de gases.	137
Figura 29 - Comportamento qualitativo entre as emissões de CO, NO _x e UHC – turbina a gás.	138
Figura 30 - Representação esquemática dos processos de Redução Catalítica Seletiva (SCR) e Redução Não Catalítica Seletiva (SNCR).	139
Figura 31 - Faixas típicas granulométricas das partículas e de aplicação dos equipamentos para remoção.	141
Figura 32 - Representações esquemáticas de um biolavador e de um biopercolador.	142
Figura 33 - Representações esquemáticas de biofiltros dos tipos fechado e aberto.	142
Figura 34 - Representação esquemática do ciclo Rankine de um sistema simples de potência a vapor.	144
Figura 35 - Desenho esquemático de uma turbina a vapor.	145
Figura 36 - Representação esquemática de uma turbina a gás.	146
Figura 37 - Representação esquemática de turbina a gás em ciclo combinado.	147
Figura 38 - Vista de motores ciclo Otto e representação esquemática do princípio de funcionamento.	148
Figura 39 - Aspectos básicos das células a combustível.	150
Figura 40 - Fluxo do aproveitamento de biogás em células a combustível para a geração de eletricidade.	151

SUMÁRIO

1. APRESENTAÇÃO	13
2. INTRODUÇÃO	14
3. CONTEXTUALIZAÇÃO	15
3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	15
3.2 GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM MINAS GERAIS.....	17
3.3 OPORTUNIDADES PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	21
4. ROTAS TECNOLÓGICAS PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RSU	24
4.1 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO TÉRMICO.....	24
<i>O que é tratamento térmico de resíduos?</i>	24
<i>Em que o tratamento térmico de resíduos pode ser aplicado?</i>	24
<i>Quais as tecnologias de tratamento térmico de resíduos existentes?</i>	25
<i>Quais as tecnologias mais utilizadas para aproveitamento energético de resíduos e por quê?</i>	48
<i>Quais os avanços tecnológicos em andamento?</i>	49
4.2 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO BIOLÓGICO.....	50
<i>O que é tratamento biológico?</i>	50
<i>Em que o tratamento biológico pode ser aplicado?</i>	50
<i>Quais as tecnologias de tratamento biológico com possibilidade de aproveitamento energético?</i>	51
<i>Quais as opções de aproveitamento energético do biogás gerado?</i>	64
<i>Quais as tecnologias mais utilizadas e por quê?</i>	65
<i>Quais os avanços tecnológicos em andamento?</i>	65
5. DADOS COMPARATIVOS ENTRE TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO	66
<i>Qual a capacidade mínima de processamento para viabilidade de projeto e potencial de geração de energia elétrica?</i>	66
<i>Existem instalações comerciais em funcionamento no Brasil e no Mundo?</i>	67
<i>Há dados sobre os custos de implantação e operação e tempo de implantação?</i>	75
<i>Quais as vantagens e desvantagens na implantação/operação de tecnologias de aproveitamento energético?</i> ..	80
<i>Quais são as orientações básicas quanto à escolha do local do empreendimento?</i>	81
<i>Quais são as orientações básicas quanto à escolha de uma das tecnologias de aproveitamento energético de biogás de aterros por parte das Prefeituras?</i>	82
6. CONSÓRCIOS INTERMUNICIPAIS PARA VIABILIDADE DE PROJETO	84
<i>O que são consórcios intermunicipais de gestão de resíduos sólidos?</i>	84
<i>Quais as exigências, vantagens e desvantagens de formação destes consórcios intermunicipais?</i>	84
<i>De quem serão os direitos sobre os produtos gerados?</i>	85
<i>Onde buscar orientação governamental?</i>	86
7. PROCEDIMENTOS PARA REGULARIZAÇÃO AMBIENTAL	87
<i>Como é o processo de licenciamento dessas atividades no estado de Minas Gerais?</i>	87
<i>Existe legislação específica para alguma dessas tecnologias?</i>	89
8. OPORTUNIDADES DE IMPLEMENTAÇÃO DE MDL	98

<i>O que é MDL?</i>	98
<i>Como obter créditos de carbono com projetos de aproveitamento energético de RSU?</i>	98
<i>Quais as metodologias de MDL existentes?</i>	101
9. LEVANTAMENTO DE DADOS MUNICIPAIS PARA SUBSÍDIO AOS ESTUDOS DE VIABILIDADE DE PROJETO	102
<i>Quais as principais informações que são afetadas aos municípios que pretendem destinar RSU ao aproveitamento energético?</i>	103
10. INCENTIVOS PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	106
<i>Quais as instituições financeiras e programas (linhas de crédito)?</i>	106
<i>Quais as exigências das instituições financeiras para viabilização do financiamento?</i>	108
<i>Quais os fomentos governamentais de incentivo ao aproveitamento energético?</i>	109
REFERÊNCIAS	115
ANEXOS	125
ANEXO 1 - RESUMO DAS NORMAS REFERENTES AO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E OUTROS ASSUNTOS CORRELATOS	125
ANEXO 2 - EFEITOS ADVERSOS DE ALGUNS POLUENTES GERADOS NO PROCESSO DE TRATAMENTO TÉRMICO.....	128
ANEXO 3 - PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE SISTEMAS DE TRATAMENTO/CONTROLE DE EFLUENTES ATMOSFÉRICOS.....	131
ANEXO 4 - SISTEMAS INTEGRADOS PARA CONVERSÃO DE ENERGIA.....	144
ANEXO 5 - RESUMO DAS NORMAS LEGAIS REFERENTES AOS CONSÓRCIOS INTERMUNICIPAIS, LICITAÇÕES, CONTRATOS E OUTROS ASSUNTOS CORRELATOS	152
ANEXO 6 - RESUMO DE METODOLOGIAS DE MDL APLICÁVEIS ÀS ATIVIDADES DE PROJETOS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	153
ANEXO 7 - DETERMINAÇÕES PARA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	155

1. APRESENTAÇÃO

A Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM, considerando sua atribuição legal de fomentar e orientar boas práticas de gestão ambiental, disponibiliza o presente Guia de Orientações sobre o Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos, elaborado pela Gerência de Energia e Mudanças Climáticas com o apoio técnico da *U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)*.

Esta publicação decorre da constatação do grande número de propostas de projetos voltados para o aproveitamento energético de RSU em diversas localidades do estado de Minas Gerais e consequente necessidade de compilação das informações técnicas relativas ao tema em uma única publicação, de forma que possam ser mais facilmente avaliadas por tomadores de decisão em nível local e regional (prefeituras e potenciais consórcios), assim como um maior esclarecimento por parte do público leigo no assunto.

Este Guia foi desenvolvido com o intuito de prover as equipes técnicas de governos locais com uma visão geral das oportunidades e riscos associados ao aproveitamento energético de RSU. Busca, também, identificar e descrever sucintamente os aspectos técnicos, ambientais e econômicos das atuais rotas tecnológicas e os critérios de avaliação mais importantes para a tomada de decisão.

Esta publicação não tem a pretensão de ser definitiva e esgotar o assunto, extremamente vasto e em constante processo de aperfeiçoamento, mas sim contribuir para uma avaliação preliminar estruturada e consistente para análise e apreciação de oportunidades e implementação de projetos custo-efetivos, tanto atuais, quanto futuros. Também não visa ser usado como ferramenta única para basear as decisões finais de aprovação de projetos e investimentos, sendo altamente recomendado que sejam realizadas análises adicionais detalhadas e obtida orientação profissional qualificada, antes de qualquer decisão de investimento.

2. INTRODUÇÃO

2.1 GUIA DE ORIENTAÇÕES

Este Guia de Orientações sobre o Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos apresenta o estágio atual das principais tecnologias de tratamento térmico e biológico, com recuperação de energia, considerando suas exigências técnicas, vantagens e desvantagens.

Aborda, também, as informações necessárias nos estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental — que devem anteceder a decisão de implantação de qualquer uma dessas tecnologias —, a pertinência da formação de consórcios públicos intermunicipais — para melhor gestão desses resíduos, facilidade na obtenção de recursos financeiros e redução de custos operacionais —, as instituições financeiras com programas que contemplem também tais tecnologias e as exigências ambientais do estado de Minas Gerais no licenciamento dessas atividades.

Na forma de anexos, é apresentado um conjunto mais extenso de informações sobre temas relevantes, visando auxiliar na compreensão das questões envolvidas no aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos. O Guia também traz as referências bibliográficas consultadas, sendo destacadas algumas delas no texto.

2.2 A QUEM SE DESTINA

Este Guia se destina principalmente às Prefeituras Municipais, para que possam avaliar com mais critério esta forma de gestão de seus RSU, analisar projetos e discutir propostas que venham a ser a elas apresentadas.

2.3 LIMITAÇÕES

O Guia traz orientações gerais sobre o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos, com base em referências bibliográficas, e não substitui, de forma alguma, a necessidade de profissionais habilitados na elaboração dos estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental para escolha da tecnologia mais pertinente.

3. CONTEXTUALIZAÇÃO

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Os **resíduos sólidos urbanos (RSU)** são os resíduos domiciliares (originários de atividades domésticas em residências urbanas) e aqueles procedentes de limpeza urbana (originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana).

A quantidade gerada de RSU depende de vários fatores, como os hábitos e costumes da sociedade, entretanto algumas bibliografias permitem uma estimativa da geração *per capita* com base no número de habitantes, conforme apresentado na Tabela 1.

Materiais presentes nos RSU:

Restos de alimentos, papéis, papelão, plásticos, borrachas, couro, isopor, embalagens metalizadas, fraldas descartáveis infantis e geriátricas, absorventes higiênicos, vidros, metais, entulhos, resíduos de jardins, tecidos, madeiras, pilhas, baterias, lâmpadas, eletroeletrônicos, materiais volumosos e outros.

Geralmente esses materiais são classificados como orgânicos (de origem animal e vegetal como restos de alimentos) e inorgânicos (como metais, vidro, borracha e plásticos).

Nem todos os materiais potencialmente recicláveis possuem mercado atualmente, seja por inviabilidade tecnológica ou econômica. E nem todo material orgânico é biodegradável.

Tabela 1 - Geração média *per capita* de resíduos sólidos urbanos no Brasil.

Tamanho da cidade	População urbana (hab.)	Geração <i>per capita</i> (kg/hab./dia)
Pequena	Até 30 mil	0,50
Média	30 mil a 500 mil	0,50 a 0,80
Grande	500 mil a 5 milhões	0,80 a 1,00
Megalópole	> 5 milhões	> 1,00

Fonte: Monteiro et al. (2001) apud CEMIG GT e FEAM (2010).

Alguns resíduos podem ser compatíveis aos RSU, como por exemplo:

- resíduos industriais e comerciais que tenham natureza e composição similares aos resíduos sólidos urbanos, excluídos os **resíduos perigosos** e os rejeitos radioativos;
- resíduos de serviços de saúde (RSS) do Grupo D - Resolução CONAMA n. 358/2005;

- lodos gerados em estações de tratamento biológico de efluentes líquidos compatíveis com os esgotos sanitários.

Resíduos perigosos são aqueles definidos na norma ABNT NBR 10.004 como classe I, devido às suas características de periculosidade (em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas), ou de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, ou oriundos de fontes relacionadas nos anexos A ou B da referida norma.

O estado de Minas Gerais, por exigência das Políticas Estadual e Nacional de Resíduos Sólidos, constante em leis promulgadas respectivamente em 2009 e 2010, tem como princípios orientadores ou objetivos a serem seguidos: não geração, prevenção, redução, reutilização e reaproveitamento, reciclagem, tratamento, disposição final ambientalmente adequada.

Seguindo a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, os municípios terão até 2 de agosto de 2014, para implementar a disposição final ambientalmente adequada dos seus **rejeitos**.

Rejeitos são os resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.

Contribuirão para a disposição final ambientalmente adequada os seguintes planos de gestão, também previstos na **PNRS**:

- Plano Nacional de Resíduos Sólidos;
- planos estaduais de resíduos sólidos;
- planos microrregionais de resíduos sólidos e os planos de resíduos sólidos de regiões metropolitanas ou aglomerações urbanas;
- planos intermunicipais de resíduos sólidos;
- planos municipais de gestão integrada de resíduos sólidos;
- planos de gerenciamento de resíduos sólidos.

Outras inovações da PNRS:

Responsabilidade compartilhada, determinando que todos os envolvidos no ciclo de vida do produto, desde o fabricante ao consumidor final, possuem atribuições e são responsáveis por direcionar adequadamente os resíduos pós-consumo.

Logística reversa, envolvendo todos os elos das cadeias de produção e consumo quanto à coleta e restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial para reaproveitamento no ciclo produtivo ou outra destinação final ambientalmente adequada.

3.2 GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM MINAS GERAIS

O estado de Minas Gerais, em 2010, contava com 19.595.309 habitantes, distribuídos em 853 municípios, sendo 85,3% na zona urbana. Possui área de 586.520,368 km², e sua taxa média de crescimento anual é de 0,91% (IBGE, 2011a; IBGE, 2011b).

No ano de 2010, conforme Tabela 2, o percentual de municípios mineiros com uma população urbana superior a 100 mil habitantes perfazia apenas 3,2%, compreendendo uma população de 8.130.843 habitantes (48,7% da população urbana do Estado). Além disso, cerca de 50% dos municípios possuía menos de 5.000 habitantes, o que indicou a necessidade de formação de consórcios públicos intermunicipais para adequada gestão em diversas áreas, dentre elas a de RSU visando redução de custos e quantidades mínimas de resíduos para escala econômica de sistemas de tratamento e mesmo para disposição em aterros sanitários.

Tabela 2 - Distribuição das sedes municipais no estado de Minas Gerais, segundo tamanho da população urbana.

Sedes Municipais (hab.)	Número de sedes		População urbana (hab.)	
	absoluto	%	absoluto	%
Mais de 500 mil	4	0,5	4.072.325	24,4
100 a 500 mil	23	2,7	4.058.518	24,3
50 a 100 mil	30	3,5	2.171.655	13
20 a 50 mil	72	8,4	2.256.396	13,5
10 a 20 mil	128	15,1	1.785.156	10,7
5 a 10 mil	176	20,6	1.224.712	7,3
Menos de 5 mil	420	49,2	1.144.892	6,8
Total	853	100,0	16.713.654	100,0

Fonte: Adaptado de IBGE (2011a).

A **composição gravimétrica dos RSU** expressa o percentual de cada componente em relação ao peso total desses resíduos.

A **composição gravimétrica** média de RSU em Minas Gerais se divide basicamente em: recicláveis (principalmente papel e papelão, plásticos, vidros e metais), matéria orgânica e diversos. Em relação à adotada em algumas literaturas especializadas para os resíduos sólidos domiciliares no

Brasil, essa composição apresenta praticamente o mesmo percentual de matéria orgânica e a mesma ordem de grandeza de recicláveis e “diversos”.

Como a fração matéria orgânica de RSU pode contemplar, além dos restos de alimentos, outros materiais formados por **substâncias orgânicas**, como resíduos de jardins, é recomendável sua descrição nas caracterizações gravimétricas, enquanto não existir uma normatização no país.

Substâncias orgânicas: qualquer espécie de matéria, natural ou artificial, que contenha em sua estrutura os elementos carbono e hidrogênio, e um ou mais de outros elementos, como: oxigênio, nitrogênio, halogênios, enxofre, fósforo, silício e boro.

Na fração reciclável estão inclusos alguns materiais também formados por substâncias orgânicas, como papel, papelão e plásticos, de interesse nas tecnologias de aproveitamento energético, pois, apesar de terem potencialidade para a reciclagem, não possuem mercado, por razões como sujeidade ou tecnologia viável. Na fração “diversos” estão inclusos também alguns materiais de interesse, como couro, trapos e madeira.

A composição gravimétrica dos RSU, bem como seu **poder calorífico**, pode ser influenciada por vários fatores, tais como o número de habitantes, poder aquisitivo, nível educacional, hábitos e costumes da população, condições climáticas e sazonais, mudanças na política econômica do país e na política nacional de resíduos sólidos.

Poder calorífico: indica a capacidade potencial de um material liberar determinada quantidade de energia quando submetido à queima.

Algumas caracterizações gravimétricas disponíveis de RSU em Minas Gerais não têm demonstrado grandes diferenças para municípios com diferentes populações (Figura 1).

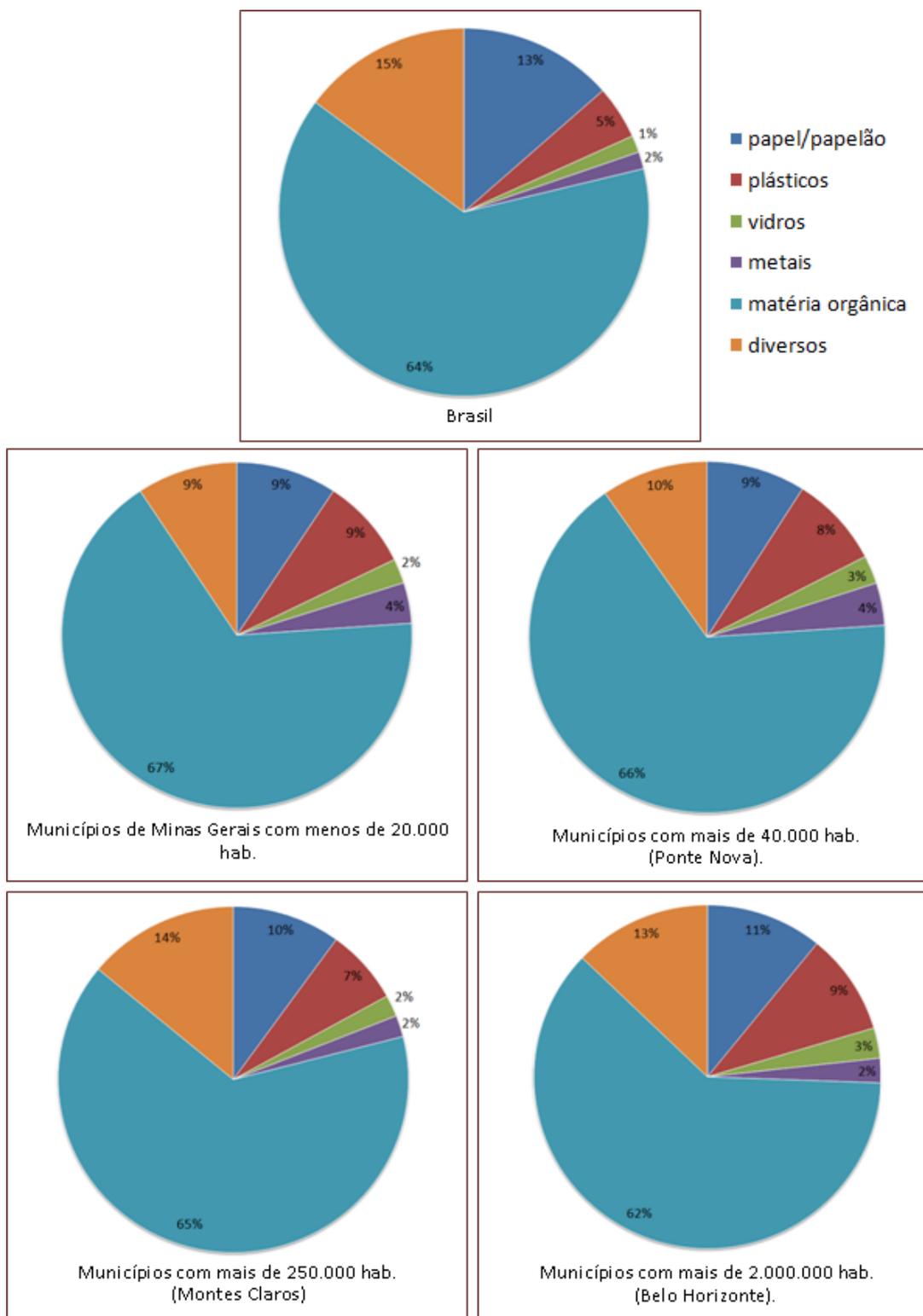


Figura 1 - Composição gravimétrica dos RSU no Brasil e em Minas Gerais.

Fonte: Pereira Neto (2007); Pereira Neto e Magalhães (1999); Oliveira (1998); Coame (2004); Magalhães e Magalhães (2008); Cançado, Lessa e Parreira (2007) apud CEMIG GT e FEAM (2011).

Apesar da evolução do tratamento/disposição final dos RSU no estado de Minas Gerais ter demonstrado que, a partir de 2001, houve redução significativa da população urbana com destinação inadequada de seus resíduos, em 2010, 29,57% ainda dispunham em lixões e 17,25% em aterros controlados, ao invés de aterros sanitários ou usinas de triagem e compostagem ambientalmente regularizadas pelo COPAM, o que representava 670 municípios em situação irregular naquele ano (Figura 2).

Em Minas Gerais, ainda é reduzido o número de recicladores e de municípios estruturados para a coleta seletiva de RSU, sendo que grande parte dos resíduos são coletados misturados, em caminhões compactadores, o que contamina os potencialmente recicláveis e dificulta a triagem, contribuindo para a inviabilidade técnica da reciclagem de alguns materiais.

O Projeto Estruturador - Qualidade Ambiental - Resíduos Sólidos do governo do estado de Minas Gerais, estabeleceu ações e metas físicas relativas à disposição de resíduos e coleta seletiva (Tabela 3).

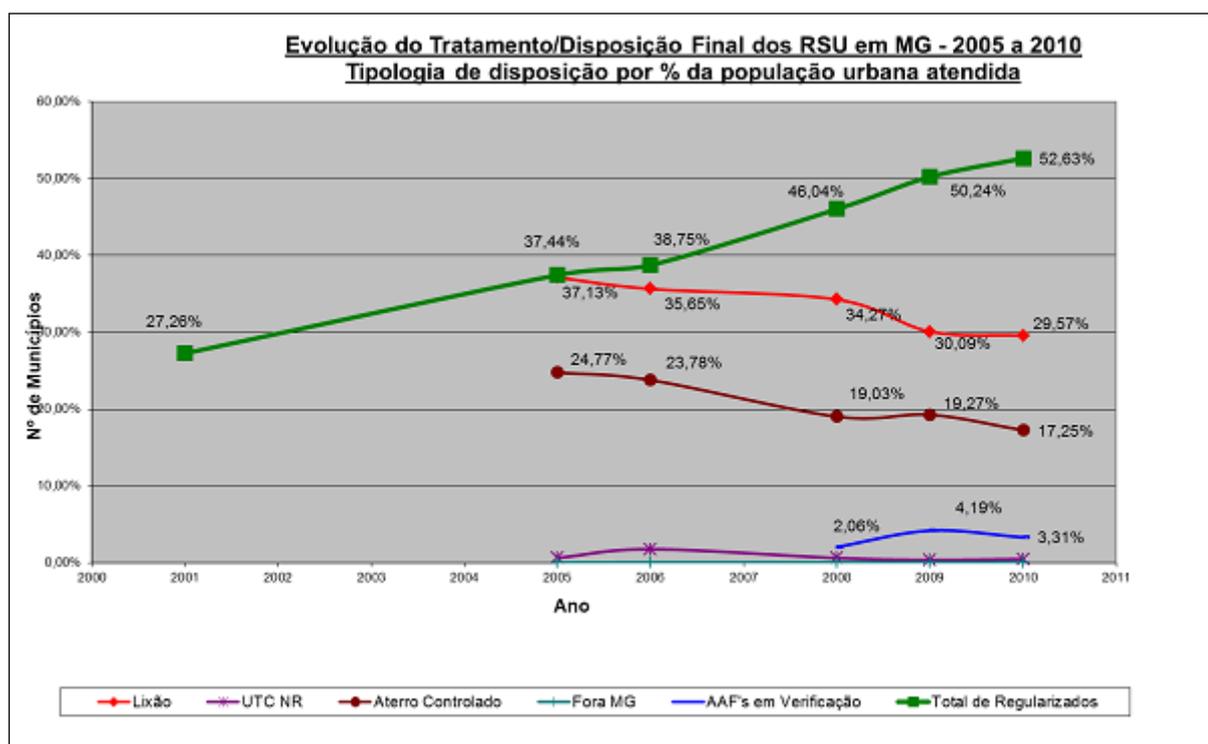


Figura 2 - Evolução do tratamento/disposição final dos resíduos sólidos urbanos no estado de Minas Gerais.
Fonte: FEAM (2011).

Tabela 3 - Ações e metas físicas do Projeto Estruturador - Qualidade Ambiental - Resíduos Sólidos do governo do estado de Minas Gerais.

Ação/Item	Metas físicas até dezembro				Realizado até outubro/2010
	2010	2011	2012	2013	
Ação: Apoio a implantação de sistemas de disposição final adequada - Minas sem Lixões					
População urbana atendida com disposição adequada de resíduos sólidos	55%	60%	62%	65%	50%
Ação: Implantação da coleta seletiva, reaproveitamento e reciclagem					
Programa de coleta seletiva implantado (n° de municípios)	20	20	15	0	43

Fonte: Friche (2010).

Referente aos **resíduos de serviços de saúde (RSS)**, apesar de o gerenciamento ser de responsabilidade dos geradores, tem sido usual os serviços de coleta urbana municipais realizarem o transporte e a destinação final desses resíduos aos seus aterros ou vazadouros. Em 2008, dos 853 municípios mineiros, 787 coletavam e/ou recebiam esses resíduos, sendo que 508 municípios (64,5%) adotavam alguma forma de disposição no solo (IBGE, 2010c).

Geradores de Resíduos de Serviços de Saúde (RSS): todos os serviços relacionados com o atendimento à saúde humana ou animal, inclusive os serviços de assistência domiciliar e de trabalhos de campo; laboratórios analíticos de produtos para a saúde; necrotérios, funerárias e serviços onde se realizem atividades de embalsamamento, serviços de medicina legal, drogarias e farmácias inclusive as de manipulação; estabelecimentos de ensino e pesquisa na área da saúde, centro de controle de zoonoses; distribuidores de produtos farmacêuticos, importadores, distribuidores e produtores de materiais e controles para diagnóstico *in vitro*, unidades móveis de atendimento à saúde; serviços de acupuntura, serviços de tatuagem, dentre outros similares.

Apresenta-se no Anexo 1 uma relação de normas aplicáveis à gestão de resíduos sólidos e outros assuntos correlatos que auxiliarão no entendimento dos aspectos regulatórios abordados neste Guia.

3.3 OPORTUNIDADES PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O aproveitamento energético de RSU, desde que utilize rotas tecnológicas apropriadas e devidamente analisadas quanto aos riscos de implementação, é uma alternativa ambientalmente correta de tratamento desses resíduos e uma oportunidade de negócios.

Entretanto, sua viabilidade econômica depende, além do balanço entre receitas e despesas, de um adequado modelo de negócios com a(s) prefeitura(s) municipal(is) para garantia na obtenção desses resíduos.

Diversas tecnologias comerciais estão disponíveis mediante o sistema de pacote fechado (*turn key*), no qual a empresa contratada fica obrigada a entregar a obra em condições de pleno funcionamento, o que requer

alta qualidade técnica associada à elaboração e implementação dos projetos. Assim, é recomendável que o contrato contemple também os serviços de treinamento e apoio técnico operacional.

Conforme Decreto Federal que regulamenta a PNRS, a recuperação energética dos resíduos deverá ser ainda disciplinada em ato conjunto dos Ministérios do Meio Ambiente, de Minas e Energia e das Cidades, exceto quanto ao aproveitamento energético dos gases gerados na biodigestão e na decomposição da matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários.

A PNRS estabelece 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”.

Como instrumentos econômicos da Política Nacional estão previstas várias medidas indutoras ao aproveitamento energético de resíduos, dentre elas:

- incentivos fiscais, financeiros e creditícios;
- cessão de terrenos públicos;
- subvenções econômicas;
- fixação de critérios, metas e outros dispositivos complementares de sustentabilidade ambiental para as aquisições e contratações públicas;
- apoio à elaboração de projetos no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL ou quaisquer outros mecanismos decorrentes da Convenção Quadro de Mudança do Clima das Nações Unidas¹.

A produção de energia elétrica a partir de RSU apresenta duas características importantes:

- exige coleta e transporte para concentrar os RSU, pois o conteúdo energético por unidade de volume é baixo;
- as tecnologias de conversão apresentam forte economia de escala (o investimento por unidade de insumo cai e as eficiências de conversão aumentam com a capacidade).

Ressalta-se que os valores médios para disposição de RSU em aterros sanitários são de R\$ 20/t (administrados por Prefeituras) ou R\$ 40/t (aterros privados) (BRASIL, 2011c, p. 18), em geral, inferiores aos praticados por outras tecnologias de tratamento, o que pode inviabilizar a instalação de novas tecnologias, além de dificultar a remuneração do investimento e a cobertura dos custos de operação e manutenção

¹ **Convenção Quadro de Mudança do Clima das Nações Unidas (UNFCCC):** criada em 1992 durante a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento com o objetivo de reunir países em um esforço conjunto para estabilizar as concentrações de gases de efeito estufa em níveis que não resultem em uma mudança do clima perigosa. Seu braço executivo é a Conferência das Partes (COP), que se reúne anualmente.

dessas instalações. No entanto, as **externalidades negativas** de todas as alternativas de tratamento devem ser avaliadas, visto que as mesmas atualmente não são contabilizadas nos custos das tecnologias e comparadas para a efetiva escolha.

Externalidades negativas: os custos da poluição não recaem sobre o poluidor, mas sobre a sociedade em geral.

Estudos referentes à Matriz Energética de Minas Gerais 2007 – 2030 estimam que, no longo prazo, o alto preço da energia e a escassez de outras opções de geração poderão viabilizar, além do aproveitamento do potencial eólico, a incineração de resíduos sólidos urbanos, representando esta, em 2030, um acréscimo de capacidade quase equivalente a uma hidrelétrica de grande porte (293 MW), além de oferecer uma possibilidade de disposição final dos resíduos com importantes vantagens ambientais (CONER, 2007).

4. ROTAS TECNOLÓGICAS PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RSU

As principais rotas tecnológicas para o aproveitamento energético de RSU utilizam processos térmicos ou biológicos. Uma consulta aos Anexos 2 e 3 auxiliará no entendimento dos efeitos adversos dos poluentes atmosféricos gerados por esses processos e dos sistemas de tratamento aplicáveis.

4.1 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO TÉRMICO

O que é tratamento térmico de resíduos?

É o tratamento por processos que utilizam o calor como forma de recuperar, separar ou neutralizar determinadas substâncias presentes nos resíduos, ou reduzir massa e volume, ou produzir energia térmica, elétrica ou mecânica.

A Resolução CONAMA n. 316/2002, ao definir o tratamento térmico como todo e qualquer processo cuja operação seja realizada acima da temperatura mínima de 800 °C, não contemplou aqueles que ocorrem em temperaturas inferiores.

Em que o tratamento térmico de resíduos pode ser aplicado?

Aplica-se a qualquer resíduo que tenha em sua composição química os elementos carbono e hidrogênio, podendo ser originários de atividades industriais, domésticas, comerciais e rurais.

Em uma planta dedicada aos RSU, a princípio, qualquer resíduo compatível a este poderá ser tratado em conjunto, independente de sua origem, desde que contemplados e aprovados no processo de regularização ambiental.

Em relação aos diversos grupos de RSS, estes apresentam, além de sua potencial patogenicidade, teores de elementos tóxicos, como cloro e metais pesados, exigindo cuidados adicionais nos sistemas de limpeza de gases.

Quais as tecnologias de tratamento térmico de resíduos existentes?

Atualmente, as principais tecnologias de tratamento térmico de resíduos, com aproveitamento energético, são a incineração, a pirólise, a gaseificação, o plasma e o coprocessamento em forno de clínquer.

Os processos de tratamento térmico a baixa temperatura, como fornos de microondas e autoclaves, não possuem o objetivo de aproveitamento energético. Comumente esses processos destinam-se à desinfecção de resíduos de serviços de saúde antes de sua destinação a aterros sanitários. No entanto, a tecnologia de microondas será abordada neste Guia por se considerar que esta pode ser caracterizada como um pré-tratamento dos resíduos, com posterior uso energético.

As tecnologias citadas são descritas de forma sucinta a seguir.

INCINERAÇÃO

a) Princípios básicos e diagrama de fluxo do processo

A incineração é um processo de combustão controlada, que tem como princípio básico a reação do oxigênio com componentes combustíveis presentes no resíduo (como carbono, hidrogênio e enxofre), em temperatura superior a 800 °C, convertendo sua energia química em calor.

Como uma combustão não é totalmente completa, realiza-se a elevadas temperaturas e os RSU têm composições diversas, são gerados como produtos da combustão, além de vapor d'água, CO₂ e SO_x, HCl, HF, CO, NO_x, material particulado (partículas finas quase sempre com sílica), metais — em particular Cd, Hg, As, V, Cr, Co, Cu, Pb, Mn, Ni e Tl, entre outros — e substâncias orgânicas (como dioxinas) na forma gasosa ou aderidas também ao material particulado. Também são gerados rejeitos (**cinzas volantes** e **escórias**) de materiais inorgânicos nos RSU que não participam das reações de combustão.

As **cinzas volantes** são as partículas sólidas de pequena dimensão arrastadas pelos gases e são normalmente retidas em sistemas de filtragem; as **escórias** são os materiais que ficam retidos no forno. Esses resíduos poderão conter também determinados metais.

Na combustão, a formação de **dioxinas** (substâncias comprovadamente cancerígenas) ocorre por mecanismos complexos, envolvendo matéria orgânica, oxigênio e cloro. Estas são destruídas a temperaturas acima de 600 °C, mas sintetizadas novamente entre 500 °C e 250 °C na presença de cloro e carbono. A maior parte das dioxinas fica retida nas cinzas volantes (OLIVEIRA, 2009 apud CEMIG GT e FEAM, 2009).

A incineração, como outros tipos de combustão, é fonte de emissão de gases de efeito estufa, sendo o mais relevante o CO₂.

O processo de combustão realiza-se em forno de incineração, composto basicamente de **câmara de combustão** – onde os resíduos são inseridos a uma taxa de alimentação pré-definida e ocorre o processo de queima controlada – e **câmara de pós-combustão** – onde se completa a queima controlada de CO e substâncias orgânicas contidas nos gases procedentes da câmara de combustão.

Os fornos de incineração podem ter diversas configurações, como:

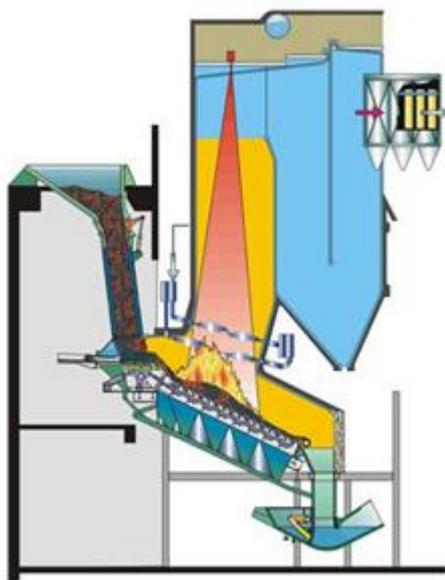
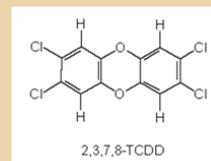


Figura 3- Representação da grelha no forno - caldeira.
Fonte: ENGEBIO (2010b)

- **Leitos fluidizados tipos circulante ou borbulhante:** são mais utilizados para lodo de esgoto; os resíduos, que devem estar triturados a diâmetro igual ou inferior a 2,5 cm, são incinerados em suspensão em leito de partículas inertes como areia e cinzas, insuflado com ar primário de

Há 210 compostos de dioxinas e furanos, sendo que 17 destes requerem especial atenção por sua toxicidade. As concentrações são expressas em termos de equivalência de toxicidade (TEQ), um método que relaciona esses compostos com o 2,3,7,8 – TCDD (tetraclorodibenzodioxina), o membro mais tóxico da família.



² **Granulometria:** expressa a dimensão representativa do tamanho de partículas.

combustão; exige maior complexidade operativa e ainda não alcançou seu pleno desenvolvimento comercial.

- **Câmaras múltiplas:** são adotadas geralmente para capacidades pequenas (0,2 a 200 t/dia), aplicável, por exemplo, a determinados grupos de resíduos de serviços de saúde; os resíduos são incinerados na grelha fixa da câmara primária e a pós-queima dos gases ocorre na câmara secundária; como gera baixas pressões de vapor, não é recomendado para a geração de energia elétrica (CEMPRE, 2010).
- **Forno rotativo:** é mais utilizado para resíduos industriais e quantidade de resíduos superior a 24 t/dia (CEMPRE, 2010).

Em plantas de incineração de RSU com geração de energia elétrica, por exemplo, do tipo combustão em grelha (Figura 4), o resíduo é descarregado no silo da usina (1) de onde é tomado por agarradores mecânicos e jogado em moegas (2). Das moegas o lixo é empurrado gradualmente para o interior do incinerador (3). O calor produzido pela queima do lixo é utilizado na caldeira (4) para aquecimento de água e o vapor gerado nesta é conduzido por tubulações para um sistema de turbina e gerador, para a produção de energia elétrica. Depois de o resíduo ser incinerado restam, sobre as grelhas, as escórias, que são drenadas para sistemas coletores situados abaixo das grelhas (5), resfriadas com água, passando posteriormente por separadores eletromagnéticos que promovem a extração de metais para reciclagem. Os gases de combustão são enviados para os sistemas de tratamento e remoção de poluentes (6) passam por filtros para retenção de partículas finas (poeiras) (7) e são lançados ao meio ambiente através da chaminé (8).

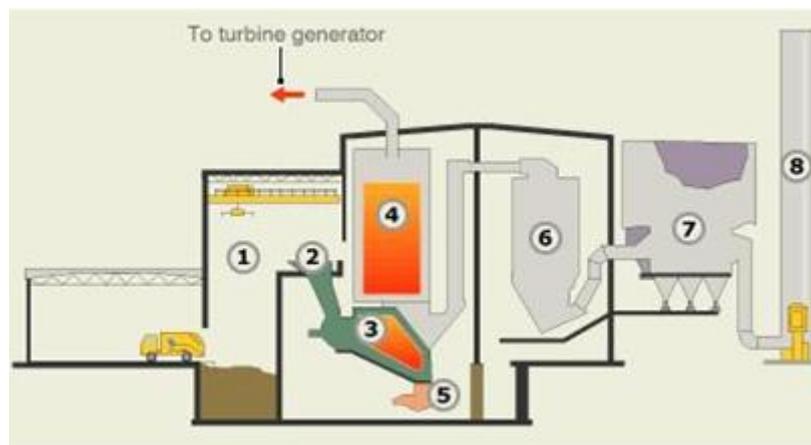


Figura 4 - Diagrama de fluxo do processo de incineração, tipo combustão em grelha, com recuperação de energia.
Fonte: *National Energy Education Development Project* (2006) apud ENGEBIO (2010b).

b) Principais exigências técnicas operacionais (CEMPRE, 2010).

➤ Temperatura elevada na câmara de combustão

Recomendado cerca de 1.200 °C, para decompor a maior parte dos compostos orgânicos a gás carbônico e água; quanto às tubulações metálicas próximas às grelhas, devido aos gases corrosivos formados, devem ser revestidas com material refratário e a temperatura não deve ser superior a 420 °C (CEMPRE, 2010). Entretanto, para evitar a formação de NO, principal composto de NO_x a ser considerado na combustão, deve-se controlar a temperatura para não ultrapassar 1.100 °C (LUFTECH, 2011).

- Teor de oxigênio elevado nos gases de combustão emitidos na chaminé: deverá ser acima de 7% em volume, para assegurar que houve suficiente excesso de ar na combustão; mas se muito elevado poderá reduzir significativamente a temperatura na câmara de combustão.
- Turbulência elevada nos gases de combustão: obtida, por exemplo, por injeção de ar a alta velocidade sobre a grelha.
- Tempo de residência dos gases na câmara de pós-combustão: deve ser superior a 1 segundo, à temperatura acima de 800 °C, para possibilitar a destruição de compostos orgânicos poluentes nos gases de combustão.
- Sistema automático de intertravamento da alimentação do forno que deverá impedir a alimentação de resíduos ao forno sempre que ocorra uma das condições especificadas em normas ambientais. No arranque, enquanto não for atingida a temperatura de 850 °C ou outra temperatura mais elevada definida na Licença Ambiental, quais sejam (Diretivas Europeia 2000/76/CE e 2010/75/UE):
 - baixa temperatura de combustão (menor que 850 °C ou outra temperatura mais elevada definida na Licença Ambiental);
 - falta de indicação de chama;
 - falta de energia elétrica ou queda brusca de tensão;
 - queda do teor de oxigênio na câmara pós-combustão ou na chaminé;
 - excesso de monóxido de carbono na chaminé, acima de 500 ppm_v;
 - mau funcionamento dos monitores e registradores de oxigênio ou de monóxido de carbono;
 - interrupção do funcionamento de equipamentos de controle/tratamento de efluentes atmosféricos;
 - parada do ventilador ou exaustor;
 - sobrepessão positiva na câmara de combustão;
 - queda de suprimento do ar de instrumentação;
 - medições contínuas previstas pelo Órgão Ambiental indicando que foi excedido qualquer um dos valores-limites de emissão.

c) Características do RSU para escolha da tecnologia

Interessa à incineração as frações de RSU que apresentem elevado poder calorífico, como plásticos, papel/papelão e borrachas (Tabela 4). Entretanto, os RSU em Minas Gerais, assim como no Brasil, possuem uma elevada fração de matéria orgânica a qual, devido à sua elevada umidade, apresenta baixo poder calorífico em relação a outros materiais; isto pode resultar em resíduos misturados com **carga térmica** inferior à de projeto do forno de incineração, implicando no aumento do consumo de combustível auxiliar.

Carga térmica dos RSU
= quantidade x Poder
Calorífico Inferior médio

Tabela 4 - Poder calorífico inferior (PCI)³ de alguns resíduos sólidos urbanos.

RSU	PCI (base seca) kcal/kg	Umidade (%)	Cinzas (%)	PCI* (base úmida s/ cinzas) kcal/kg
Matéria orgânica	4.300	66	25	712
Papel e papelão	3.800	21	5	2.729
Têxteis e couro	4.200	36	10	1.921
Madeira	3.700	25	5	2.490
Plástico	10.300	17	3	8.193
Borracha	9.700	5	6	8.633

(*) obtido por cálculo com base nos dados da CODESC.

Fonte: CODESC (2003) apud CEMIG GT e FEAM (2011).

Dessa forma, e considerando que os princípios da PNRS resultarão no impedimento do processamento de resíduo bruto em plantas de incineração, os RSU não procedentes de coleta seletiva deverão ser previamente destinados a um processo de triagem, para a separação dos materiais efetivamente recicláveis ainda presentes e a preparação de lotes de **combustível derivado de resíduos (CDR)**.

O CDR é produzido a partir de uma série de estágios de classificação e remoção magnética de materiais ferrosos e não ferrosos dos RSU, resultando em uma fração combustível de maior poder calorífico composta basicamente por materiais plásticos, papeis e papelão não reciclados, madeira, pano e fração orgânica

Os principais resíduos que têm sido incinerados são: RSU, industrial, perigoso, de serviços de saúde e lodo de esgoto.

Para os RSS o tratamento térmico por incineração é uma das formas adequadas de destinação final, entretanto, considerando o reduzido volume em relação aos RSU, tem sido adotado, em alguns países, a destinação destes para incineração conjunta, pois os sistemas de tratamento de gases adotados para RSU permitem atender aos padrões de emissão. Há, entretanto, necessidade de prever local específico nas instalações para o recebimento e a manipulação dos RSS, antes de sua destinação ao forno de incineração.

³ Poder calorífico inferior (PCI) – definição vide Anexo 7 (item 2.2.2).

d) Principais aspectos ambientais com potenciais impactos negativos

As plantas de incineração, além de rigorosos sistemas de tratamento/disposição de efluentes e resíduos, devem dispor de sistemas de monitoramento contínuo dos controles operacionais e das emissões atmosféricas geradas. Deve-se monitorar também, com frequência determinada, a qualidade das águas subterrâneas e superficiais, os efluentes líquidos gerados e descartados, o nível de ruído ambiental, a qualidade do ar, solo e, em situações específicas, inclusive de alimentos produzidos na área de influência do empreendimento.

Os controles operacionais também contribuem como medidas preventivas para redução de emissões atmosféricas, como CO e NO_x.

Referente às emissões atmosféricas, em países desenvolvidos tem sido exigido como monitoramento contínuo: CO, partículas, HCl, SO₂, NO_x, TOC, HF, NH₃; e como periódico: Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Cd, Tl, Hg e dioxinas e furanos.

d.1) Sistema de tratamento/disposição de efluentes atmosféricos

Para o sistema de tratamento de efluentes atmosféricos (gases de combustão) sugere-se que sejam utilizados como referência os padrões de emissão estabelecidos na Diretiva Europeia 2010/75/UE (a qual acrescenta poucas alterações à Diretiva 2000/76/CE e a revogará a partir de 7 de janeiro de 2014), por serem mais restritivos que os da Resolução CONAMA n. 316/2002, e de qualidade do ar no raio de alcance da pluma de dispersão atmosférica, estabelecido na Resolução CONAMA n. 003/1990, ou outra exigência específica estabelecida pelo Órgão Ambiental.

d.2) Sistemas de tratamento/disposição de efluentes líquidos

Os sistemas de tratamento de efluentes líquidos (**chorume** procedente dos RSU recebidos e efluentes industriais e domésticos) visam ao atendimento dos padrões de lançamento estabelecidos na Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH n. 001/2008; para tanto o seu dimensionamento deverá considerar as características físico-químicas previamente avaliadas para esses efluentes. Em países da União Europeia, o chorume é geralmente coletado e aspergido no próprio forno de incineração.

Chorume: líquido altamente poluente, de cor escura e de odor desagradável, resultado da decomposição da matéria orgânica.

d.3) Sistemas de tratamento/disposição de resíduos do processo

Os resíduos sólidos (cinzas volantes e escórias), antes da proposta de sua destinação final, devem ser caracterizados para verificação da classe conforme a norma ABNT NBR 10.004.

Em algumas plantas de países da União Europeia tem sido observado um percentual de geração de escórias e cinzas volantes em torno de 18% e 3% da quantidade de RSU processado, respectivamente. Nesses países tem sido realizada a inertização das cinzas volantes com cimento antes da disposição final em aterros sanitários dotados de dupla impermeabilização. Em algumas instalações, parte dos efluentes líquidos provenientes do sistema de depuração de poluentes atmosféricos tem sido reutilizada nos processos de arrefecimento de escórias e de inertização de cinzas volantes.

Já as escórias devem passar por processo de desferrização, em eletroímã, antes de sua utilização, geralmente como cobertura de aterros sanitários, sendo comercializadas as sucatas ferrosas separadas no processo.

PIRÓLISE

a) Princípios básicos e diagrama de fluxo do processo

A pirólise é um processo de decomposição térmica, na ausência de oxigênio, por fonte externa de calor, que converte a matéria orgânica em diversos subprodutos.

O fracionamento das substâncias orgânicas ocorre gradualmente à medida que estas passam pelas diversas zonas de calor de um reator vertical ou horizontal: na zona de secagem, parte inicial no reator, perde a umidade e na zona pirolítica propriamente dita (pode variar de 300 °C a 1.600 °C), ocorrem os processos de volatilização, oxidação e fusão, resultando em (LIMA, 1995):

- gases não condensáveis, compostos principalmente por nitrogênio e gás de síntese (*syngas*⁴);
- líquido pirolenhoso, obtido pela condensação de gases que se desprendem durante o processo, com baixo teor de enxofre, composto por ácido pirolenhoso (ácido acético, metanol, alcatrão solúvel e outros vários compostos em menor quantidade) e alcatrão insolúvel;

⁴ **Syngas**: gás sintético, composto basicamente por uma mistura de dióxido de carbono, hidrocarbonetos (C_nH_m) e, principalmente, monóxido de carbono e hidrogênio.

- resíduo sólido, constituído por carbono quase puro (char) e ainda, por vidros, metais e outros materiais inertes (escória) caso presentes no RSU processado.

Apresenta-se na Figura 5 o diagrama de fluxo do processo no reator pirolítico.

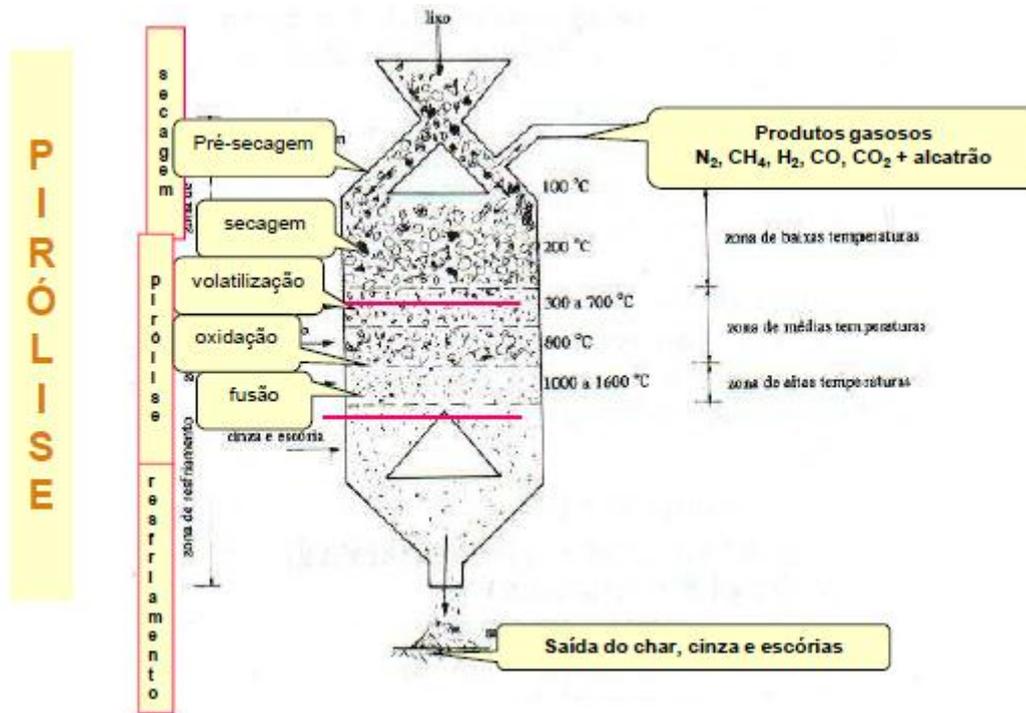


Figura 5 - Diagrama de fluxo do processo no reator pirolítico.
Fonte: Lima (1995).

A proporção relativa das fases gasosa, líquida e sólida varia em função da temperatura (geralmente opera-se entre 400 °C e 900 °C), do processo, da composição da biomassa e do tipo de equipamento empregado.

O líquido pirolenhoso é corrosivo, nocivo e altamente poluente. Este pode ser gaseificado ou refinado para uso energético e, dependendo da concentração de alcatrão e outros compostos tóxicos, pode ser utilizado na agricultura (CAMPOS, 2007).

Os gases não condensáveis podem ser utilizados para a produção de vapor através de trocadores de calor e caldeiras ou, após resfriamento e limpeza em sistema de controle de emissão, podem ser queimados em caldeiras, turbinas a gás ou motores de combustão interna, para geração de eletricidade ou destinados à fabricação de produtos químicos.

No final do processo, os materiais sólidos fundidos juntamente com a escória (vidros, terra, pedras, metais e outros) são resfriados e removidos. É possível, ainda, submeter o rejeito da pirólise a um processo de segregação, obtendo-se, principalmente, vidros e metais. O carvão pode ser processado ou utilizado como carvão ativado devido às suas propriedades de absorção.

O balanço energético do sistema de pirólise é sempre positivo, pois produz mais energia do que consome.

Conforme o tempo de residência, a taxa de aquecimento e a temperatura, o processo de pirólise recebe diferentes denominações, tendo diferentes produtos principais. Entretanto, tem sido usualmente classificada como pirólise lenta ou rápida, conforme o tempo de residência da matéria-prima no forno e a temperatura do processo (Tabela 5).

Tabela 5 - Classificação simplificada das modalidades de pirólise.

Modalidades de Pirólise	Tempo de residência	Temperatura (°C)	Produto principal
Lenta (carbonização)	Horas/dias	350 a 700	Sólido de carbono quase puro (char)
Rápida	0,5 a 2 segundos	400 a 600	Líquido pirolenhoso

Fonte: Adaptado de Gomes (2010).

b) Principais exigências técnicas operacionais

Como principais exigências técnicas da pirólise, usando como referência os parâmetros que interferem na carbonização da madeira para produção de carvão vegetal (FIGUEIREDO, 2009), pode-se inferir:

- tipo, umidade, forma e dimensão da matéria-prima;
- temperatura final da reação;
- taxa de aquecimento e tempo de permanência na temperatura final;
- adição de catalisadores;
- atmosfera de reação (inerte ou parcialmente inerte);
- técnica utilizada (fonte de energia);
- qualificação do operador (processos artesanais);
- pressão (rendimento e cinética das reações).

Apresentam-se na Tabela 6 alguns resultados de um estudo que demonstra os efeitos da temperatura nos percentuais de subprodutos da pirólise.

Tabela 6 - Efeitos da temperatura na pirólise de RSU.

Temperatura (°C)	Percentuais de subprodutos da pirólise (%)		
	gases	líquidos	sólidos
482	12,23	61,08	24,71
649	18,64	59,18	21,80
927	24,36	58,70	17,67

Fonte: Lima (1995).

c) Principais aspectos ambientais com potencial de impactos negativos

Os sistemas de tratamento das emissões atmosféricas devem contemplar tanto aquelas procedentes do processo de pirólise como da queima do combustível utilizado para o aquecimento externo deste reator.

Assim, aplicam-se sistemas similares aos descritos para a tecnologia de incineração, visando ao atendimento da Resolução CONAMA n. 316/2002 ou outra norma definida pelo Órgão Ambiental.

Ressalta-se que, apesar de existirem várias configurações possíveis para uma planta de pirólise, o tratamento das emissões atmosféricas apenas com coletor de pó centrífugo (ciclone) e lavador de gases não é suficiente para o atendimento aos padrões de emissão. Em configurações que não utilizam os gases para a geração de energia elétrica, uma possibilidade é a destinação destes a um sistema pós-queima.

Embora já existam plantas de carbonização de madeira, para a pirólise de RSU as características dos efluentes e resíduos gerados no processo requerem estudos mais apurados, devido à heterogeneidade dessa matéria-prima, visando à escolha do melhor sistema de tratamento das emissões atmosféricas.

GASEIFICAÇÃO

A gaseificação é o processo de reação de carbono com o vapor para produzir hidrogênio e monóxido de carbono. Nesse processo ocorre a conversão da matéria-prima sólida ou líquida em gás por meio de oxidação parcial, sob a aplicação de calor (ENGEBIO, 2010b).

a) Princípios básicos e diagrama de fluxo do processo

A gaseificação é um processo termoquímico de decomposição da matéria orgânica, de fluxo contínuo ou batelada, sendo a técnica mais comum a oxidação parcial utilizando um agente de gaseificação (oxigênio, ar

ou vapor quente), em quantidades inferiores à estequiométrica (mínimo teórico para combustão), para a produção de *syngas* cujos principais componentes são monóxido de carbono e hidrogênio, mas contêm também dióxido de carbono e, dependendo das condições, metano, hidrocarbonetos leves, nitrogênio e vapor de água em diferentes proporções.

O gás produzido a partir da gaseificação de biomassa tem muitas aplicações práticas, tais como a geração de energia mecânica e elétrica, a geração direta de calor, ou como matéria-prima na obtenção de combustíveis líquidos — como hidrocarbonetos combustíveis sintéticos (diesel e gasolina), metanol, etanol e outros produtos químicos, através de processos de síntese química catalítica.

No processo de gaseificação ocorrem complexas reações ainda não bem conhecidas em sua totalidade. O atual estágio de seu desenvolvimento, porém, permite que ocorra a subdivisão destas reações em quatro etapas físico-químicas distintas, com temperaturas de reação diferentes: secagem, pirólise, redução e combustão (HENRIQUES, 2004).

A composição dos gases e a produção concomitante de combustíveis sólidos (carvão) e líquidos condensáveis (pirolenhosos) dependem dos seguintes fatores: tipo de forno de gaseificação, forma de fornecimento de energia ao processo, introdução ou não de vapor de água junto com o comburente (ar, O₂), tempo de retenção da carga, sistema de retirada de gases e outros produtos, da matéria orgânica utilizada.

Os gaseificadores são recipientes revestidos com material refratário e o processo ocorre a temperaturas de aproximadamente 850 °C, sob condições de pressão atmosférica ou sob elevada pressão (BRAND, 2010).

Na Tabela 7 estão reportadas algumas características gerais dos gaseificadores.

Tabela 7 - Características dos gaseificadores.

Características	Variações
Poder calorífico do gás produzido	Baixo: até 5 MJ/Nm ³ (997 kcal/kg)
	Médio: 5 a 10 MJ/Nm ³ (997 a 1.993 kcal/kg)
	Alto: 10 a 40 MJ/Nm ³ (1.993 a 7.972 kcal/kg)
Tipo de agente gaseificador	Ar, vapor d'água, oxigênio, hidrogênio (hidrogaseificação)
Tipo de leito	Fixo: corrente paralela ou contracorrente
	Fluidizado: borbulhante ou circulante
Pressão de trabalho	Baixa: pressão atmosférica
	Pressurizado: até 6 MPa (59,2 atm)
Natureza da biomassa	Resíduos agrícolas, industriais ou sólidos urbanos (lixo)
	Biomassa <i>in natura</i> , peletizada ou pulverizada

(*) Para gases é expresso em unidade de energia por volume. Para converter MJ/Nm³ em kcal/kg, deve-se multiplicar o valor por 239,2 kcal/MJ e dividir pela massa específica em kg/Nm³. As conversões nesta tabela, reportadas entre parênteses, adotam massa específica média de 1,2 kg/Nm³, considerando dados de Caputo (2009): valores para biomassa entre 1,07 e 1,25 kg/Nm³, conforme a composição do *syngas*, decorrente do processo de gaseificação.

Fonte: Adaptado de Cortez, Lora e Gómez (2009) e Henriques (2004).

A obtenção econômica de *syngas* de poder calorífico alto ou médio só é possível utilizando-se oxigênio puro, pois a eliminação do nitrogênio inerte do ar aumenta o poder calorífico, ou misturas de gases — oxigênio e vapor de água ou ar enriquecido com oxigênio e vapor de água (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2009; BRAND, 2010).

Os gaseificadores para a produção de *syngas* têm maior custo, pois o gás deve ser mais limpo, com baixos teores de alcatrão e pirolenhosos, exigindo unidades especiais de limpeza (BRAND, 2010).

A grande maioria dos gaseificadores em comercialização ou em fase de desenvolvimento atualmente pode ser enquadrada segundo o tipo de leito utilizado (CENBIO, 2002):

- **Leito fixo:** podem ser de **corrente paralela** (onde o sólido e o gás se movem no mesmo sentido, normalmente descendente), ou **contracorrente** (se movem em sentido opostos). É a tecnologia mais difundida, conhecida e dominada operacionalmente, a qual vem sendo implementada principalmente em pequenas escalas.
- **Leito fluidizado:** podem ser do tipo borbulhante ou circulante, conforme a velocidade com que o material atravessa o leito. No **tipo borbulhante**, a velocidade é em torno de 1 m/s, e no **circulante** o material atravessa em velocidade mais alta (7 m/s a 10 m/s), permitindo melhor mistura do ar com o combustível a ser gaseificado, mas as bolhas se tornam maiores formando grandes lacunas no leito e arrastando uma quantidade substancial de sólidos que são coletados, separados do gás e levados de

volta ao leito. São majoritariamente empregados em grandes instalações, por serem mais complicados de operar.

Para formar a base de suporte de um leito fluidizado, normalmente se utiliza areia, que representa um grande reservatório térmico capaz de atenuar grandes variações de umidade por períodos relativamente longos, no combustível alimentado, ao contrário de caldeiras de grelha.

Apresentam-se na Figura 6 os desenhos esquemáticos dos gaseificadores contracorrente e de leito fluidizado.

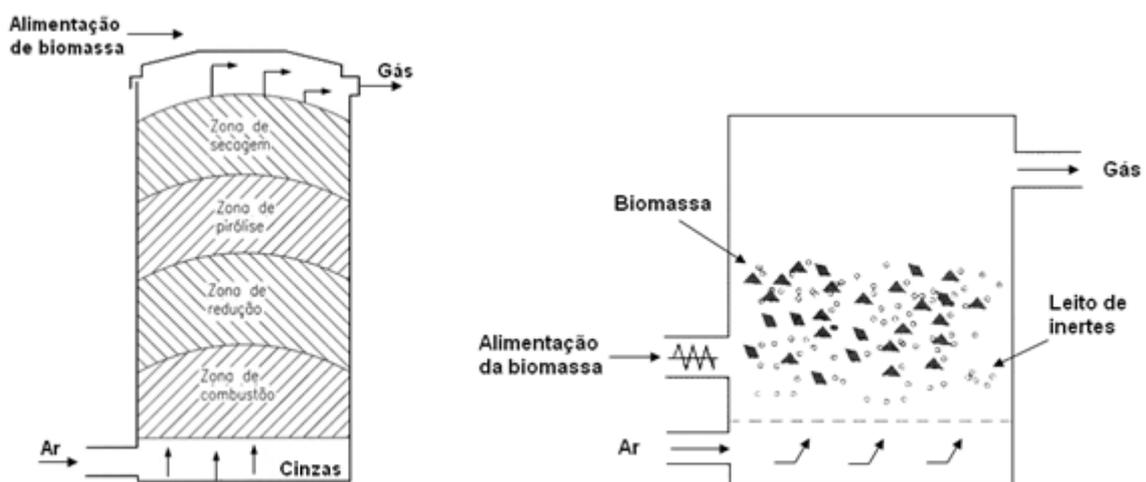


Figura 6 - Desenhos esquemáticos dos gaseificadores contracorrente e de leito fluidizado.
Fonte: Cortez, Lora e Gómez (2009).

Para a geração de energia em ciclos termelétricos utiliza-se principalmente a gaseificação pressurizada, entretanto esses sistemas apresentam problemas ainda não solucionados, como a alimentação de combustível, a redução do teor de alcatrão do gás, os óxidos de nitrogênio produzidos e a filtragem do gás quente (HENRIQUES, 2004).

A técnica de gaseificação é, em princípio, extremamente versátil, mas existem muitos problemas em transformar este potencial teórico em uma tecnologia viável e prática. Na maior parte dos casos, as dificuldades residem não no processo básico de gaseificação, mas sim no projeto de um equipamento que deve produzir um gás de qualidade, com confiabilidade e segurança, adaptado às condições particulares do combustível e da operação.

A maioria dos gaseificadores que se tornaram totalmente operacionais e comerciais foram aqueles projetados para fins de geração de calor; em relação àqueles para fins de geração de energia elétrica, poucos sistemas conseguiram a condição de operação em escala comercial, em todos os casos devido a problemas técnicos relacionados particularmente com a qualidade do gás produzido (alcatrão e particulado no gás) (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2009).

b) Principais exigências técnicas operacionais

Considerando informações em literaturas, referentes a pesquisas e implantações comerciais principalmente para gaseificação de madeira, casca de arroz, palha e outros resíduos agrícolas, verificam-se como exigências técnicas operacionais:

- taxa de alimentação do gaseificador;
- pressão e temperatura do processo;
- relação ar/combustível;
- sistema de limpeza dos gases antecedendo seu aproveitamento energético;
- sistema de remoção de cinzas.

c) Características do RSU para escolha da tecnologia

Os resíduos lignocelulósicos com baixa umidade (menos de 40%) como palha de cereais, cavacos de madeira, cascas de frutos, serragem, resíduos urbanos, resíduos animais, lodo de esgoto e outros, são os materiais mais indicados para a gaseificação como forma de aproveitamento energético (BRAND, 2010).

d) Principais aspectos ambientais com potenciais impactos negativos

Os sistemas de tratamento/controlado das emissões atmosféricas devem contemplar os principais problemas a respeito dos gases de gaseificação: material particulado (causa a erosão das palhetas das turbinas a gás), metais alcalinos (devido à corrosão e deposição nas palhetas) e o alcatrão (causa o bloqueio dos filtros de particulados).

Apresentam-se no Quadro 1 algumas tecnologias aplicáveis para a limpeza de gás em sistemas integrados gaseificação e ciclo combinado. O processo ciclo combinado está detalhado no Anexo 4.

Quadro 1 - Tecnologias para a limpeza de gás em sistemas integrados gaseificação e ciclo combinado.

Componente a remover	Tecnologia proposta
Alcatrão	Craqueamento com dolomita; catalisadores base níquel; ou catalisadores multimetálicos níquel/molibidênio
Metais alcalinos	Remoção de particulados mais solventes orgânicos
Particulados	Separadores ciclônicos; ou filtros cerâmicos ou de ligas metálicas (para turbinas a gás o primeiro tem baixa eficiência e o segundo ainda não foi testado comercialmente)

Fonte: Cortez, Lora e Gómez (2009).

PLASMA

a) Princípios básicos e diagrama de fluxo do processo

O plasma, conhecido como “o quarto estado da matéria”, é um gás ionizado, com boa condutividade elétrica e alta viscosidade, gerado pela dissociação das moléculas de qualquer gás devido à perda de parte dos elétrons quando a temperatura de aquecimento atinge 3.000 °C. O jato de plasma é gerado e controlado em um dispositivo denominado “tocha de plasma”, no qual ocorre a formação de um arco elétrico, através da passagem de corrente entre o cátodo e ânodo, provocando a ionização do gás injetado pelo seu aquecimento a temperaturas extremamente elevadas, variando de 5.000 °C a 50.000 °C de acordo com as condições de geração, mas tipicamente da ordem de 15.000 °C (ENGEBIO, 2010b).

Apresenta-se na Figura 7 a foto de uma tocha de plasma e representações esquemáticas do dispositivo gerador e do forno de plasma.

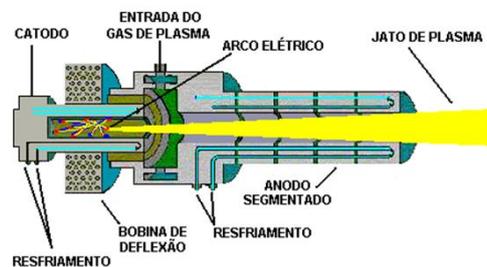
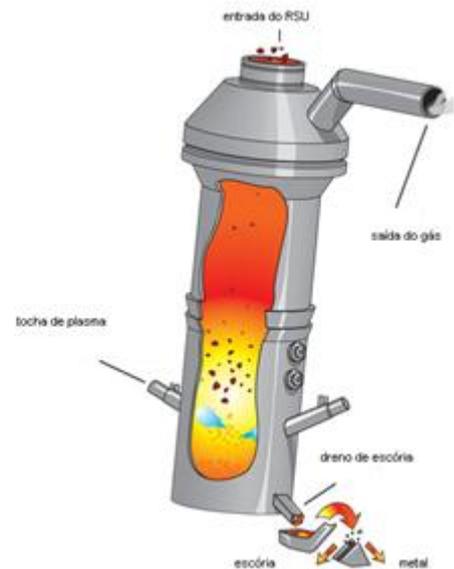
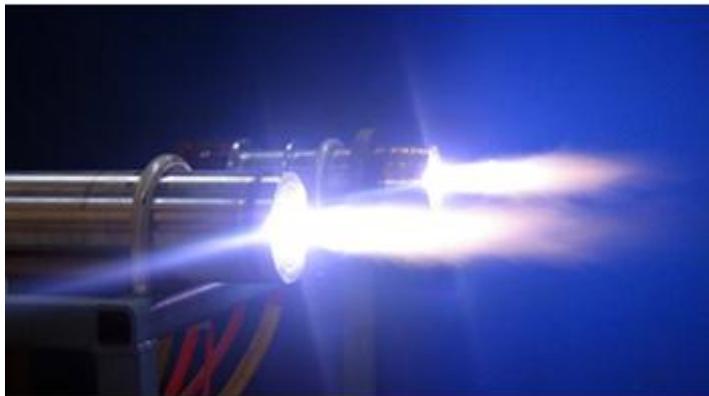


Figura 7 - Tocha de plasma e representações esquemáticas do dispositivo gerador e do forno de plasma.
 Fonte: Strickland (2011); Santos (2011).

Existem basicamente dois tipos de tratamento de resíduos por plasma:

- incidência da tocha de plasma diretamente sobre os resíduos produzindo a dissociação das ligações moleculares em compostos mais simples (*syngas*), com maior consumo de energia;
- incidência da tocha de plasma sobre os gases de síntese procedentes do processo de gaseificação de resíduo, contribuindo para a produção de um gás mais limpo (Figura 8). O resíduo é alimentado em uma câmara de gaseificação, por meio de um sistema de câmaras estanques. Ar pré-aquecido, enriquecido ou não com oxigênio, é injetado na base da fornalha para alimentar a combustão. O material não combustível é descarregado pela base, como escória líquida ou metal a cerca de 1.450 °C, enquanto o gás sai pelo topo do gaseificador entre 600 °C e 800 °C, sendo conduzido para a câmara de refino (reator de decomposição térmica a plasma), onde os hidrocarbonetos presentes no gás são decompostos e parcialmente oxidados para produzir um gás combustível limpo a cerca de 1.200 °C e 1.400 °C, tendo basicamente *syngas* (ENGEBIO, 2010b).

O *syngas* pode ter as mesmas aplicações discutidas para o processo de gaseificação. Os materiais inorgânicos são transformados em uma escória vítrea, a princípio, não perigosa.

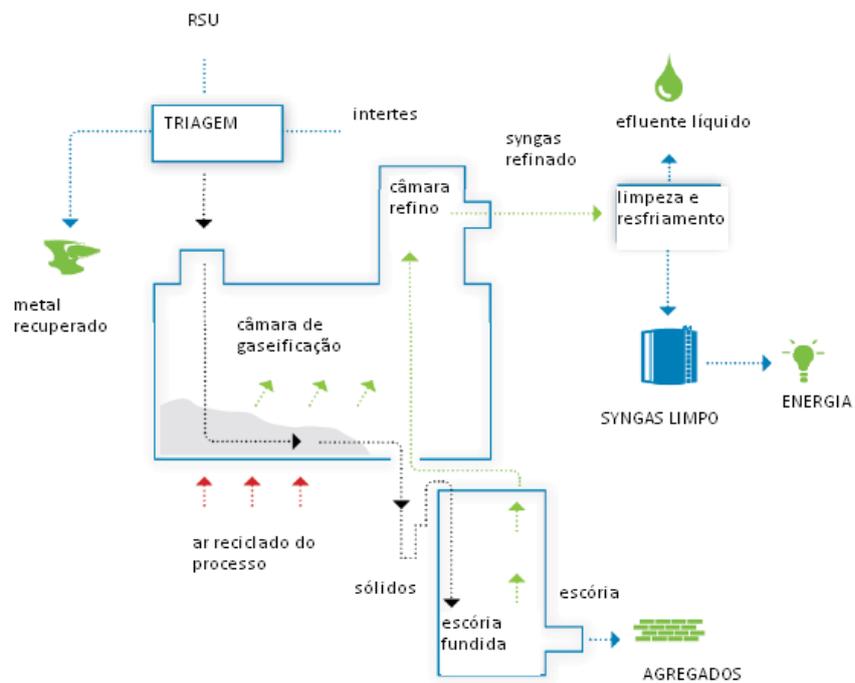


Figura 8 - Fluxograma esquemático de uma instalação com o processo plasma gaseificação.
Fonte: PLASCO TRAIL ROAD (2011).

É importante destacar que no processo a plasma não há combustão ou queima dos componentes do resíduo.

b) Principais exigências técnicas operacionais

Na concepção desses processos nenhum resíduo resultante pode deixar o sistema sem ser exposto a elevadas temperaturas, quer seja a escória vitrificada ou os gases da decomposição.

Não é necessário grande reservatório para armazenamento do *syngas*, pois a geração é contínua e basta um pequeno volume para garantir que, por exemplo, os motores tenham uma fonte ininterrupta de combustível (ENVIROPARKS, 2011b).

Ressalta-se que não foram identificadas na literatura pesquisada melhores informações sobre as exigências operacionais dessa tecnologia.

c) Características do RSU para escolha da tecnologia

Aplica-se a qualquer resíduo orgânico e inorgânico.

d) Principais aspectos ambientais com potenciais impactos negativos

O volume de gases inicialmente gerado é mais baixo do que na combustão convencional, mas depois da combustão dos gases produzidos, é idêntico ao de outras formas de incineração; o sistema não dispensa um sofisticado sistema de lavagem de gases, tal como nos incineradores.

No que diz respeito à produção de dioxinas e furanos, os sistemas estão dependentes das tecnologias de recuperação térmica utilizada a jusante, não sendo claro que se possa garantir uma vantagem nítida sobre as tecnologias de incineração mais avançadas, nem com as técnicas mais simples de gaseificação.

Os materiais inorgânicos transformados em uma escória vítrea apresentam potencial de uso em uma variedade de aplicações, tais como construção de leito de estradas e materiais de cobertura.

MICROONDAS

a) Princípios básicos e diagrama de fluxo do processo

As microondas são radiações eletromagnéticas produzidas por sistemas eletrônicos (osciladores) que se estendem pela região do espectro de 0,001 m até cerca de 1 m, correspondendo às frequências de 300 GHz a 0,300 GHz (CEPSRM, 2011), sendo mais comuns, como em fornos de microondas caseiros, a frequência de 2,45 GHz e uma potência elétrica nominal de 600 a 700 W (PEREIRA FILHO, 1999, p. 4). São classificadas como radiação não ionizante e seus efeitos são estritamente térmicos, portanto, não alteram a estrutura molecular do item que está sendo irradiado. Na Figura 9 é possível visualizar a faixa de frequência em que se encontram as microondas.

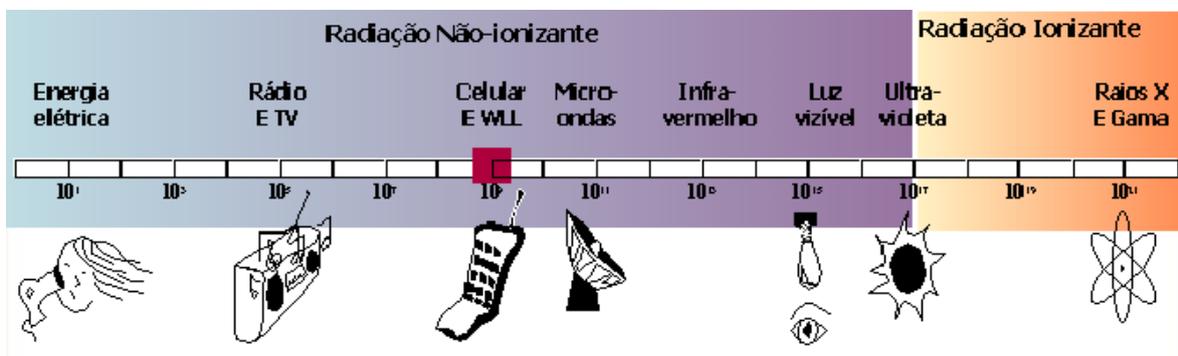


Figura 9 - Faixas de frequência de radiações eletromagnéticas (em Hertz).
Fonte: Guedes (2011).

As microondas carregam energia que interage com moléculas polares — como as da água, gorduras e açúcares —, e íons em solução, utilizando o fenômeno da ressonância, sendo convertidas em calor. Os metais têm a capacidade de refletir as microondas, enquanto materiais como vidro, porcelanas e papéis são transparentes para essa banda de frequência. O ar e os vasilhames colocados no interior da câmara de cozimento se aquecem apenas por condução ou convecção do material aquecido.

A estrutura básica do magnetron, válvula eletrônica utilizada nos fornos de microondas para transformar a energia elétrica em ondas eletromagnéticas, é constituída por um filamento (catodo), uma placa (anodo), antena, ímãs permanentes e um radiador para auxiliar na remoção do calor gerado. A tensão aplicada no filamento aquece o catodo, emitindo elétrons que são atraídos pela tensão positiva da placa; o campo magnético provocado pelos dois ímãs faz os elétrons girarem em alta velocidade em volta das pequenas cavidades da placa, gerando um sinal de alta frequência (2,45 GHz); com o movimento dos elétrons, ondas são induzidas nessas cavidades, se somam e saem pela antena com grande intensidade (Figura 10).

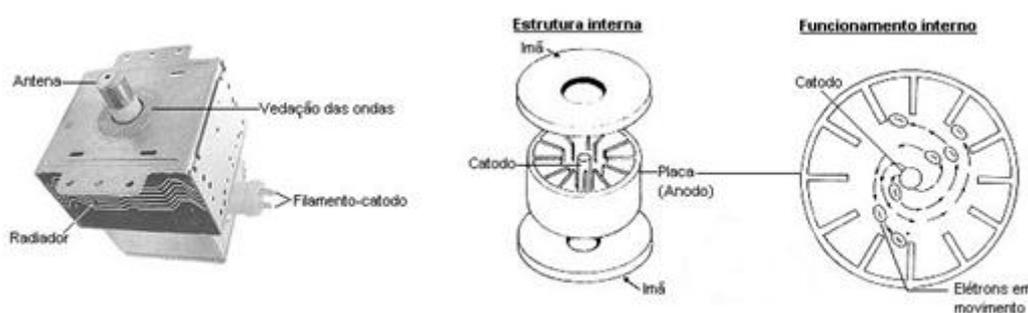


Figura 10 - Aspecto físico e princípio de funcionamento do magnetron.
Fonte: BURBOSELETRONICA (2011).

A tecnologia microondas é relativamente recente no tratamento de resíduos, em especial os resíduos de serviços de saúde (Figura 11), e consiste na descontaminação dos resíduos a uma temperatura elevada (entre 95 °C e 105 °C). Após processados, os resíduos tratados devem ser encaminhados para aterro sanitário (ANVISA, 2006).

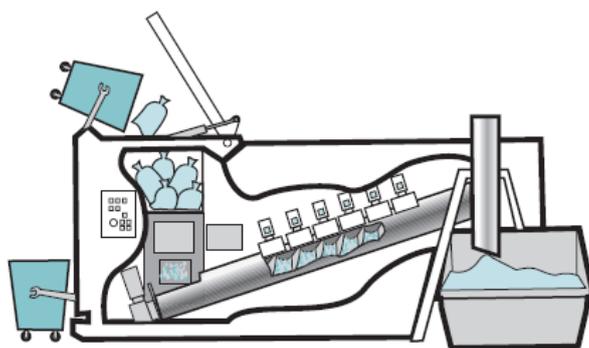


Figura 11 – Representação esquemática do processo de microondas.
Fonte: IBAM (2001).

b) Principais exigências técnicas operacionais

Para o processamento de RSS pela tecnologia de microondas, estes devem ser triturados, umedecidos com vapor a 150 °C e colocados continuamente em um forno com dispositivo para revolver e transportar a massa, assegurando que todo o material receba uniformemente a radiação de microondas (IBAM, 2001). Para os RSU o processamento é similar, mas usualmente sem a etapa de umedecimento, devido ao elevado percentual de umidade inerente a esses resíduos.

Um metal exposto à radiação microondas poderá apresentar correntes elétricas que acompanham as variações do campo elétrico. Isso não causará problemas enquanto o objeto puder suportar a passagem dessas correntes sem causar superaquecimento e enquanto as cargas não escaparem para o ar causando faíscas. Dessa forma, é recomendável a triagem, no mínimo, de metais antes da etapa de trituração, evitando a danificação do equipamento.

A instituição *Center for Devices and Radiological Health* da *U. S. Food and Drug Administration* - FDA/CDRH estabeleceu como segurança para os usuários o nível máximo de exposição à radiação microondas de 5 mW/cm² até a distância de 5 cm da superfície do forno, sendo este mesmo valor adotado no Brasil (HPS, 2011; INMETRO, 2011).

Para RSU, a utilização de fornos de microondas após trituração, a princípio, seria aplicável para redução de umidade e desinfecção dos resíduos, visando ao aumento de seu poder calorífico, eliminação de chorume e confecção de fardos prensados ou peletizados para o transporte às centrais termelétricas.

c) Características do RSU para escolha da tecnologia

Aplica-se aos RSU e aos RSS que necessitem passar por um processo de redução de umidade e/ou desinfecção.

d) Principais aspectos ambientais com potenciais impactos negativos

Os principais aspectos ambientais estão relacionados ao nível de ruído — procedentes principalmente de trituração dos resíduos e da exaustão de vapores do forno, ao vazamento de microondas para o exterior do forno durante o processamento, às emissões de vapores e odores durante a redução da umidade dos resíduos e seu resfriamento e aos rejeitos gerados no processo como os decorrentes da segregação dos resíduos recebidos e da substituição de peças/equipamentos, inclusive as válvulas magnetrons.

As medidas preventivas/corretivas para observância dos valores permitidos de níveis de ruído e de exposição à radiação microondas estão afetas primeiramente aos órgãos responsáveis pela segurança do trabalho no ambiente ocupacional.

Quanto aos sistemas de tratamento/controlado das emissões atmosféricas, caso inclua a condensação dos vapores, implica na necessidade de caracterização do efluente líquido gerado para o devido tratamento.

COPROCESSAMENTO

a) Princípios básicos e diagrama de fluxo do processo

A fabricação do cimento Portland comum (CPI), processo via seca, consiste, de forma sucinta, na preparação da “farinha crua” pela homogeneização das matérias-primas – calcário (carbonato de cálcio) e argila (silicatos complexos), usualmente nas proporções de 85% e 15%, respectivamente, e adição de areia para correção dos teores de sílica, bauxita e minério de ferro –, e cominuição em moinho para obtenção da granulometria desejada, seguida da calcinação em um forno rotativo – forno de clínquer – no qual a chama e o material atingem, respectivamente, as temperaturas de cerca de 2.000 °C e 1.500 °C. O clínquer obtido – composto por silicatos di-cálcicos, aluminatos tri-cálcicos e

As propriedades físico-químicas do cimento Portland têm evoluído constantemente, inclusive com o emprego de aditivos que melhoram suas características, como escória granulada de alto-forno e pozolanas (materiais naturais ou artificiais que contêm sílica em forma reativa), implicando em diferentes tipos de cimento.

ferro-aluminatos tetra-cálcicos –, é moído finamente em conjunto com o gesso (sulfato de cálcio) — que atua como um retardador de pega, evitando a reação imediata da hidratação do cimento, resultando no produto final, cimento (SIGNORETTI, 2008).

O processo de produção de clínquer por via úmida — moagem das matérias-primas com adição de água resultando em uma pasta com 30% a 40% em peso de água — utiliza um forno de maior comprimento, pois necessita de uma parte adicional para efetuar a evaporação da umidade, sendo atualmente pouco utilizado devido ao maior consumo energético nessa operação (SIGNORETTI, 2008).

O coprocessamento é realizado conjuntamente à produção do clínquer, sendo que alguns resíduos aportam energia térmica ao processo, enquanto outros configuram a substituição de matéria-prima. No Brasil, o percentual médio de substituição de combustíveis e matérias-primas é de 15% (SNIC, 2010). Os principais resíduos coprocessados são: borrachas, pneus e emborrachados, resíduos de biomassa, ceras, substâncias oleosas, lodo de Estação de Tratamento de Efluentes, resinas, colas e látex, catalisadores usados, madeira e terra contaminadas, solventes (PUC, 2010).

Na Figura 12 é apresentado o fluxograma do processo, com sinalização dos respectivos pontos de entrada dos resíduos.

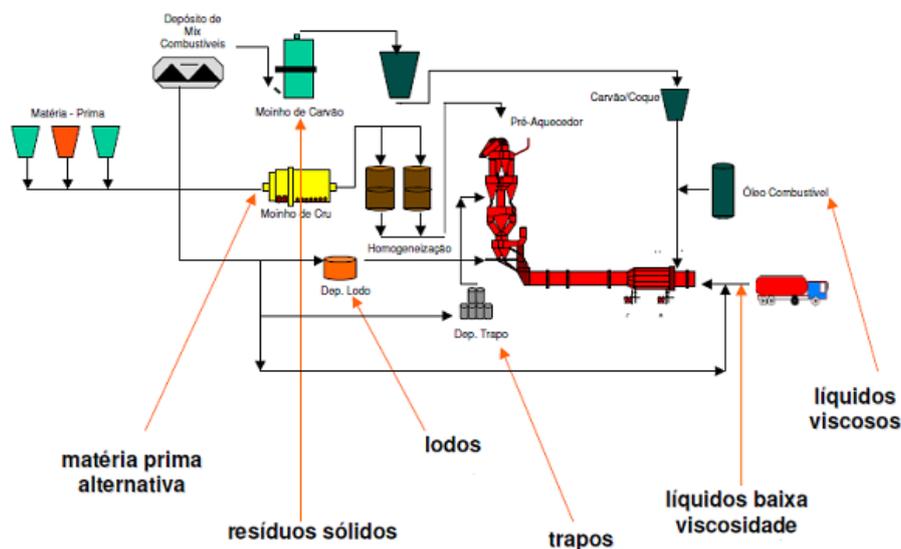


Figura 12 - Fluxograma do processo e respectivos pontos de entrada de resíduos.
Fonte: Adaptado de PUC Rio (2010).

b) Principais exigências técnicas operacionais

As condições mínimas de operação dos fornos de clínquer, para o coprocessamento de resíduos, estão estabelecidas na legislação ambiental (Deliberação Normativa COPAM n. 154/2010):

- Monitoramento contínuo *on-line* para o Órgão Ambiental de material particulado, NO_x, SO_x, O₂ e THC (hidrocarbonetos totais).
- Quando inexistente monitoramento contínuo de HCl e HF, campanha de monitoramento pelo Órgão Ambiental as expensas do empreendedor.
- Sistema de intertravamento elétrico que interrompa automaticamente a alimentação de resíduos, sempre que ocorram as seguintes condições especificadas nessa norma ambiental:
 - queda da temperatura de operação normal de trabalho;
 - ausência de chama no queimador;
 - queda de teor de O₂ no sistema;
 - mau funcionamento dos monitores de O₂ e temperatura;
 - inexistência de depressão no forno;
 - falta de energia elétrica ou queda brusca de tensão;
 - alimentação deficiente de "farinha crua";
 - emissões acima do padrão.

c) Características do RSU para escolha da tecnologia

O RSU somente será aceito para coprocessamento em fornos de clínquer, por exigência da legislação ambiental (Resolução CONAMA n. 264/1999 e Deliberação Normativa COPAM n. 154/2010), se tiver a finalidade de aporte de energia térmica ou substituição de matéria-prima e insumos quanto aos elementos cálcio, silício, alumínio, ferro, flúor, enxofre, potássio e sódio. Além disso, as cinzas produzidas incorporadas ao clínquer não deverão afetar a qualidade do cimento a ser comercializado.

Essas legislações proíbem o coprocessamento de resíduos domiciliares brutos, dos serviços de saúde, radioativos, explosivos, organoclorados, agrotóxicos e afins.

A referida Deliberação Normativa COPAM, além de exigir monitoramento das emissões e testes de lixiviação do clínquer, traz ainda as seguintes exigências quanto aos resíduos a serem coprocessados:

- não ultrapassar na entrada do forno os teores máximos dos elementos: Cd, Hg e Tl; As, Co, Ni, Se e Te, Sb, Cr, Sn, Pb e V;

- possuir poder calorífico inferior (PCI) mínimo de 2.000 kcal/kg ou, para resíduos domiciliares pré-tratados/tratados, de 1.500 kcal/kg.

São permitidas Unidades de Mistura e Pré-condicionamento de Resíduos, próprias ou de terceiros, para o preparo e ou mistura de resíduos diversos (*blend*), visando ao atendimento às características exigidas para o coprocessamento em forno de clínquer.

d) Principais aspectos ambientais com potenciais impactos negativos

O principal aspecto ambiental refere-se às emissões de material particulado e de poluentes gasosos como gases ácidos (HCl e HF), CO, NO_x, SO_x, compostos orgânicos — hidrocarbonetos totais, tolueno, etilbenzeno, xileno, benzeno — e substâncias inorgânicas na forma particulada.

As emissões de material particulado na produção de cimento ocorrem não somente no forno de clínquer, mas nos moinhos de cru, resfriador de clínquer e moinhos de cimento; há também as emissões fugitivas decorrentes do armazenamento e manipulação de materiais e de combustíveis, e da embalagem e expedição de cimento.

As emissões de CO₂ – decorrentes da descarbonatação do calcário e da queima de combustíveis no forno do clínquer – são de interesse crescente, pois coloca a indústria de cimento entre os responsáveis pela emissão desse gás de efeito estufa.

Quais as tecnologias mais utilizadas para aproveitamento energético de resíduos e por quê?

A tecnologia de tratamento térmico mais utilizada para RSU tem sido a incineração em grelha, por estar plenamente desenvolvida, existindo várias unidades em escala comercial instaladas em diversos países. O Brasil ainda não possui instalada uma unidade comercial de grande porte.

Na pirólise, embora as linhas gerais de seu conceito estejam consolidadas, os detalhes do processo como um todo ainda são alvo de inúmeros estudos e divergências. Tem sido há muito empregada na produção de carvão vegetal a partir da madeira e também se encontra tecnicamente consolidada em vários países para reciclagem de pneus.

A gaseificação também ainda está em fase de estudos, havendo algumas plantas instaladas, geralmente de pequeno porte, que utilizam madeira, casca de arroz, palha e outros resíduos agrícolas.

As tecnologias de pirólise e gaseificação foram primariamente usadas para fontes específicas — e geralmente únicas — de resíduos não misturados, como pneus e plásticos, ou então para se processar os combustíveis derivados de resíduos.

A técnica de plasma para RSU ainda não alcançou grande desenvolvimento industrial, mas a modalidade plasma gaseificação apresenta grande potencial.

Quais os avanços tecnológicos em andamento?

Um dos possíveis avanços poderá ser a utilização de sistemas conjugando termelétrica a gás, a ciclo combinado, acoplada a plantas de incineração de resíduos, com mais de um tipo de combustível; sistemas integrando gaseificação e ciclo combinado; bem como as “biorrefinarias”, que transformarão biomassas em energia e produtos químicos.

Os Sistemas Integrados de Gaseificação e Ciclo Combinado – IGCC, atualmente em fase pré-comercial, sendo mais adotados para carvão mineral e coque de petróleo, também representam a conjugação de diversas tecnologias de conversão de energia (HENRIQUES, 2004; HOFFMANN, 2010; LORA, 2011).

A planta IGCC da *Foster Wheeler PCFBG*, instalada em Värnamo/Suécia, em 1993, é a única que opera com biomassa e resíduos municipais (HOFFMANN, 2010).

No Brasil, um projeto denominado Biomassa-Energia-Materiais (B.E.M), poderá implicar na implantação de biorefinarias; este tem como base a pré-hidrólise ácida de biomassas em reator a vácuo produzindo açúcares e celulignina. Os açúcares são convertidos em outros produtos e a celulignina, combustível sólido com elevado poder calorífico (4.500 kcal/kg), é transformada em *syngas* por um processo térmico (Figura 13).

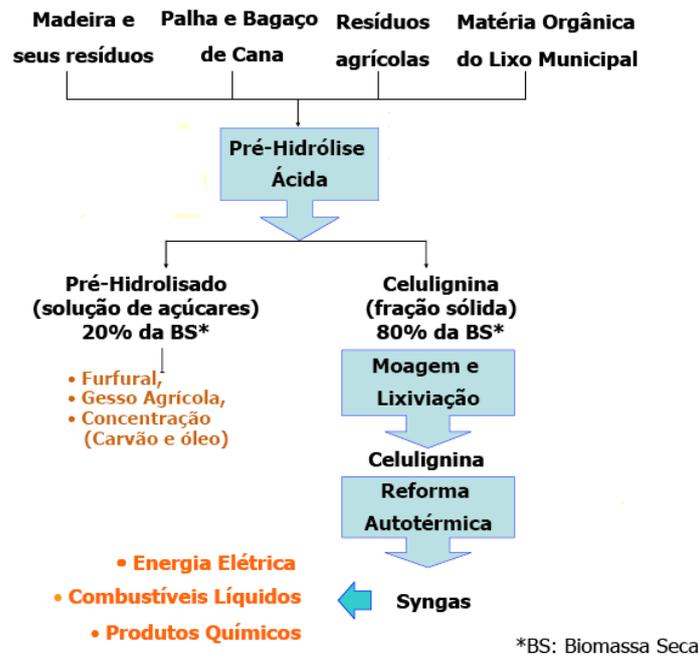


Figura 13 - Representação esquemática da biorrefinaria pelo processo B.E.M.
Fonte: Romão (2011).

Cabe ressaltar que, para resíduos sólidos urbanos, muitas das tecnologias citadas neste Guia estão em fase de desenvolvimento, podendo ocorrer avanços tecnológicos significativos que viabilizem implantações em escala comercial.

4.2 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO BIOLÓGICO

O que é tratamento biológico?

É uma forma de tratamento da matéria orgânica biodegradável na qual se intensifica a ação de microrganismos, visando à estabilização e oxidação dessa matéria. Havendo a presença de oxigênio livre, os processos são aeróbios. Na ausência do oxigênio livre, os processos são anaeróbios.

Em que o tratamento biológico pode ser aplicado?

Aplica-se aos resíduos orgânicos biodegradáveis, podendo ser originários de atividades industriais, domésticas, comerciais e rurais, como: restos de alimentos e poda, madeiras, papéis, papelão.

Possui ainda larga aplicação nos processos de tratamento secundário (biológico) de águas residuárias.

Quais as tecnologias de tratamento biológico com possibilidade de aproveitamento energético?

As tecnologias mais conhecidas de tratamento biológico de resíduos com aproveitamento energético são decorrentes da utilização do biogás procedente da biometanização de resíduos em reatores anaeróbios ou da captura em aterros sanitários.

As tecnologias citadas são descritas de forma sucinta a seguir.

BIOMETANIZAÇÃO

a) Princípios básicos e diagrama de fluxo do processo

A tecnologia de biometanização com aproveitamento energético tem como base a geração de biogás a partir da digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (FORSU) em reatores específicos. As plantas possuem as seguintes etapas:

- recepção (preferencialmente procedente de coleta seletiva);
- pré-tratamento (triagem, trituração da forsu e preparação da massa de alimentação do reator);
- digestão anaeróbia da forsu (gerando biogás e “digestato” — um lodo biológico);
- recuperação do biogás (para produção de energia elétrica, aquecimento, resfriamento, injeção em rede de gás natural, combustível de veículos ou iluminação);
- tratamento/controlado de ar ambiente, efluentes atmosféricos e líquidos e resíduos sólidos.

A digestão anaeróbia ocorre em 4 estágios: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, com atuação predominante de diferentes grupos de bactérias⁵ em cada estágio (Figura 14).

⁵ **Bactérias:** organismos unicelulares de dimensões microscópicas que podem sobreviver em condições com presença de ar (aeróbias), ausência de ar (anaeróbias) ou facultativas.

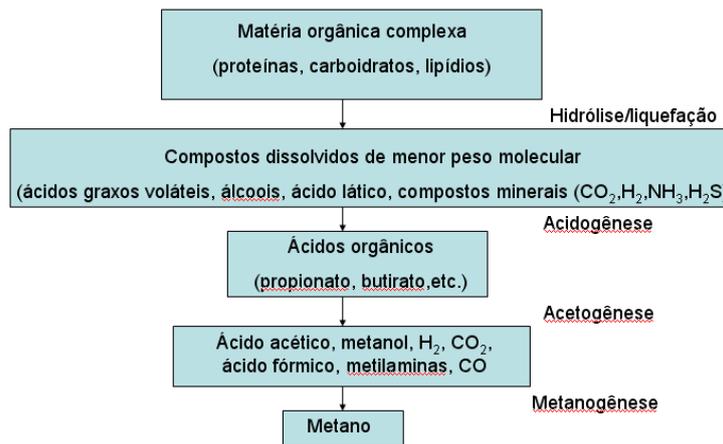


Figura 14 - Representação esquemática do processo de digestão anaeróbia.
Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997) e Verma (2002).

Em plantas industriais os tipos de sistemas de digestão anaeróbia têm sido de:

- um estágio (todas as fases em um único reator) – mais comum, embora menos eficiente;
- multi-estágios (em geral 2 reatores, no primeiro as fases até a acetogênese e no segundo a metanogênese) – maior flexibilidade operacional;
- em batelada (todas as fases em reator(es) preenchido(s) de uma única vez) – projeto e operação mais simples, menor custo de investimento e maior área.

Os sistemas em batelada podem produzir biogás de 50 a 100 vezes mais do que a observada em um aterro sanitário, devido à recirculação do percolado gerado e da temperatura mais elevada (AMARAL, 2004).

Os sistemas de digestão anaeróbia se classificam também quanto ao teor de sólidos totais (ST) na massa de alimentação do reator (REICHERT, 2005 apud CEMIG GT e FEAM, 2009):

- baixo teor de sólidos (ou úmidos): $ST < 15\%$ – implica maior volume do reator, consumo de água e geração de efluentes;
- médio teor de sólidos: $15\% < ST < 20\%$;
- alto teor de sólidos (ou secos): $22\% < ST < 40\%$ – implica menor volume do reator, equipamentos mais caros (bombas e outros).

O biogás formado na digestão anaeróbia é uma mistura gasosa composta tipicamente por 60% de CH_4 , 35% de CO_2 e 5% de outros gases como H_2 , N_2 , H_2S , CO , O_2 e aminas⁶ voláteis. Dependendo da eficiência do processo, o biogás chega a conter entre 40 e 80% de metano (FIGUEIREDO, 2007; CEMIG GT e FEAM, 2009).

⁶ **Aminas:** compostos orgânicos nitrogenados derivados da amônia.

O PCI do biogás, para efeito de simplificação, pode ser considerado 5.000 kcal/Nm^3 . Entretanto, torna-se menor à medida que se eleva a concentração de substâncias não combustíveis (como umidade e CO_2) e impurezas (como H_2S), uma vez que há diferenças no poder calorífico dos gases que compõem o biogás. O metano tem PCI de 8.124 kcal/Nm^3 (PCS de 9.024 kcal/Nm^3) e densidade de $0,68 \text{ kg/Nm}^3$ (GASNET, 2011b), o que equivale a 11.937 kcal/kg , superior ao valor típico de 10.000 kcal/kg para óleos combustíveis, e semelhante ao do gás natural (GN)⁷.

Após a digestão anaeróbia da massa de resíduos, que irá gerar o biogás (cerca de 100 a 200 Nm^3 de biogás por toneladada de RSU, com concentração de metano em torno de 50%), gera-se também um lodo biológico, cujo tratamento e disposição final devem ser incluídos no projeto de uma planta desse tipo.

Apresentam-se na Figura 15 alguns exemplos de unidades de processo utilizadas com digestores anaeróbios.

⁷ O GN distribuído para consumo, após seu processamento, é uma mistura composta tipicamente por 88% de metano, 9% de etano, 1% de propano e 2% de frações mais pesadas e gases inertes, tendo em média um PCS de 9.500 kcal/Nm^3 (MACHADO, MELO e LASTRES, 2007), com algumas variações de acordo com a sua origem e o seu processamento.

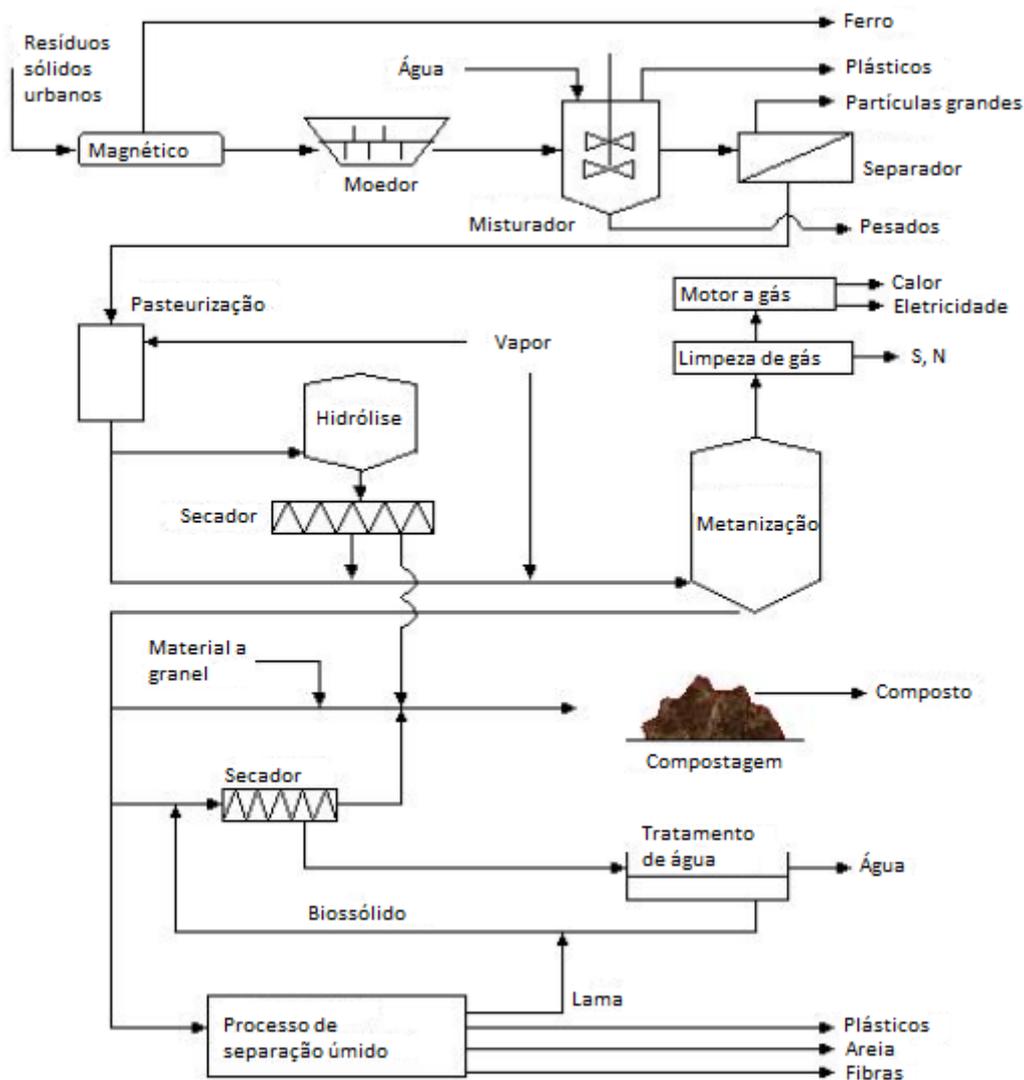


Figura 15 - Exemplos de unidades de processo utilizadas com digestores anaeróbios.
 Fonte: Verstraete (2002) apud Henriques (2004).

Nos países desenvolvidos, as plantas de biometanização estão instaladas em galpões fechados, dotados de sistema de tratamento dos odores do ar interno, visando não causar incômodos à vizinhança.

b) Principais exigências técnicas operacionais

Na digestão anaeróbia, os seguintes parâmetros deverão ser observados/controlados (REICHERT, 2005 apud CEMIG GT e FEAM, 2009):

- o teor de sólidos voláteis biodegradáveis e materiais de difícil degradação, pois repercutirá em outros parâmetros operacionais e na geração de biogás;

- a taxa de alimentação, para que não ocorra a acidificação; a mistura com lodo biológico acelera o processo por fornecer nitrogênio e inóculo. bons resultados têm sido obtidos com taxas de carga orgânica volumétrica entre 8,5 a 15 kg DQO/m³/dia (quantidade de compostos orgânicos, expressa em quilos de dco por dia, aplicada ao volume útil do reator em metros cúbicos);
- o pH (valor ótimo está entre 5,5 e 8,5), pois pode inibir a ação de organismos saprófitas⁸ (se inferior a 5) e bactérias metanogênicas (se inferior a 6,5);
- a temperatura de operação; esta poderá ser na faixa mesofílica (20 °C a 40 °C) e/ou termofílica (50 °C a 60 °C), sendo às vezes necessário um trocador de calor;
- a relação C/N, sendo os valores ótimos entre 20:1 e 30:1;
- o tempo de residência dos resíduos no reator (nos processos mesofílicos varia de 10 a 40 dias; e nos termofílicos adota-se tempos menores);
- a mistura no interior do reator dos resíduos com a massa fermentada, para garantir inoculação adequada e prevenir sobrecarga local e acidificação;
- a presença de substâncias tóxicas e/ou inibidoras nos resíduos, caso ocorram concentrações que excedam os limites de tolerância, tais como: metais pesados, metais alcalinos e alcalino-terrosos, cianetos, fenóis, cloretos e nitratos (CETESB, 2011).

É usual a mistura da FORSU com lodo biológico na alimentação do digestor, tanto na etapa de posta em marcha (partida) como durante a operação, pois tende a acelerar o processo de digestão pelo fornecimento de nitrogênio e de inóculo.

Durante a operação de processos de tratamento anaeróbio, os principais problemas enfrentados são a baixa taxa de carregamento, longo tempo de retenção, baixa eficiência e ação biológica não ideal, sendo necessárias as seguintes adequações: eliminação da camada de espuma, manutenção da temperatura uniforme em todo o tanque de digestão, inibição da sedimentação de partículas grandes, melhorias no controle do processo e dispersão de potenciais inibidores metabólicos, como os ácidos voláteis (SHARMA et al., 1999).

⁸ **Organismos saprófitas:** seres vivos decompositores, que incluem a maioria dos fungos e algumas bactérias.

c) Principais aspectos ambientais com potenciais impactos negativos

c.1) Resíduos sólidos

Os resíduos sólidos gerados no processo são compostos pelos materiais procedentes da triagem (recicláveis e não recicláveis), bem como do lodo biológico do reator anaeróbio.

O lodo biológico poderá ser destinado ao uso agrícola após sua estabilização por um processo, em geral, de **compostagem**.

A compostagem é feita em pátios onde o material a ser compostado é disposto em pilhas (forma cônica) ou leiras (forma prismática, Figura 16) e arejados por reviramento manual ou mecânico ou por injeção de ar. Outra possível técnica é a realização da fase de **degradação ativa** em reatores horizontais, com ou sem agitação mecânica do material e altura de resíduo de 2 m a 4 m (PEREIRA, 2011), como os túneis de compostagem (Figura 17) —compartimentos herméticos dotados de injeção de ar quente pela base do piso e de controles dos parâmetros umidade, oxigênio e temperatura, de forma a determinar a injeção de ar necessária e eventual aspersão de água para umidificação.

Compostagem é um processo aeróbio em que a maior parte da fração de carbono orgânico degradável do resíduo é convertida em CO₂. O metano é formado nas seções anaeróbias do composto, mas é oxidado nas seções aeróbias. O processo é afetado por fatores como umidade, oxigênio, temperatura, concentração de nutrientes e tamanho das partículas. Envolve duas fases distintas: **degradação ativa** (a temperatura deve ser controlada de 45 °C a 65 °C) e **maturação ou cura** (caracteriza-se pelo desenvolvimento de temperaturas entre 30 °C a 45 °C, ocorrendo a humificação da matéria orgânica estabilizada na primeira fase (PEREIRA NETO, 1996).

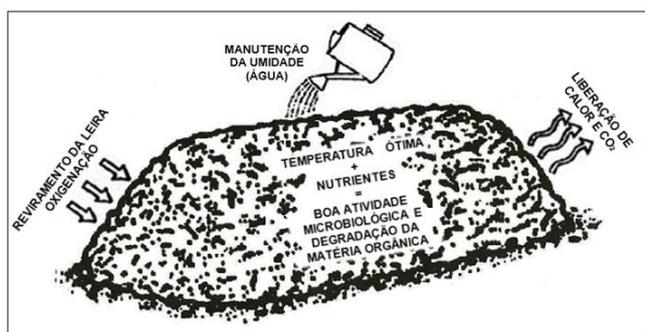


Figura 16 - Representação esquemática de uma leira com as condições ambientais ótimas na compostagem.

Fonte: Adaptado de Pereira Neto (1996).



Figura 17 - Foto de um túnel de compostagem.

Fonte: Elaboração própria.

A permissão de uso agrícola do lodo, bem como do efluente líquido tratado, depende de uma análise de suas características, do local pretendido para aplicação e das necessidades nutricionais do tipo de cultura escolhida.

A Instrução Normativa SDA n. 27/2006 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), “estabelece limites de agentes fitotóxicos, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas admitidas nos fertilizantes, corretivos, condicionadores de solo e substrato para plantas”.

Caso o produto não atenda aos parâmetros agronômicos definidos para registro ou não atenda aos limites definidos na Instrução Normativa SDA n. 27/2006 para contaminantes, poderá ser autorizado pelo MAPA, desde que haja:

- a comprovação de eficiência agronômica;
- a manifestação do Órgão Ambiental;
- o atendimento aos limites máximos de contaminantes e às demais disposições previstas na Resolução CONAMA n. 375/2006 (lodo de esgoto).

c.2) Efluentes atmosféricos

As emissões atmosféricas serão procedentes da queima do metano. Não há padrões de emissão nas normas federal e estadual específicos para o biogás, entretanto, por similaridade com o gás natural pode-se aplicar os padrões para este combustível estabelecidos na Resolução CONAMA n. 382/2006 ou n. 436/2011.

O ar do ambiente ocupacional dos galpões de recepção, triagem e preparação dos resíduos para a digestão anaeróbia, bem como de túnel de compostagem, também devem ser destinados a sistema de tratamento de gases para minimização de odores.

Em países desenvolvidos, têm sido utilizados no tratamento do ar ambiente:

- áreas de pré-tratamento: biofiltro para remoção dos odores de H₂S, *mercaptans*⁹ e aminas;
- túnel de compostagem: lavador ácido para remoção de NH₃.

Não há padrões na legislação ambiental nacional que estabeleçam o limite de percepção de odor, ou seja, a concentração de uma substância no ar ambiente a partir da qual ela passa a ser perceptível pelo olfato humano. Dessa forma, a percepção dos odores pela comunidade de entorno deve ser considerada pelo Órgão Ambiental como um instrumento de avaliação da eficiência dos sistemas de controle implantados.

⁹ ***Mercaptans (ou tióis)***: compostos formados por um radical orgânico ligado ao grupamento SH (enxofre e hidrogênio)

c.3) Efluentes líquidos

Os efluentes líquidos sanitários e os de origem industrial (compostos principalmente pelo líquido do desaguamento do digestato do reator anaeróbico) devem ser destinados a sistema de tratamento, visando ao atendimento dos padrões de lançamento da Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH n. 001/2008.

O efluente líquido do desaguamento do digestato é, geralmente, recirculado ao reator (hidrata a mistura) e o excedente destinado à estação de tratamento de efluentes.

BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO

a) Aterro sanitário

O aterro sanitário é uma técnica de aterramento dos RSU, que consiste basicamente na compactação dos resíduos no solo na forma de camadas, periodicamente cobertas com terra ou outro material inerte, de modo a produzir uma degradação natural e lenta, por via biológica, até a mineralização da matéria biodegradável. Exige cuidados especiais e técnicas específicas a serem seguidas, desde a seleção e preparo da área, até sua operação e monitoramento.

Deve funcionar de modo a fornecer proteção ao meio ambiente, evitando a contaminação das águas subterrâneas pelo chorume, além do acúmulo do biogás gerado pela decomposição da matéria orgânica em seu interior.

O aterro apresenta como principais características técnicas:

- impermeabilização da base do aterro, que pode ser executada com argila ou geomembranas sintéticas;
- sistema de drenos que permite a saída do biogás;
- sistema de coleta de chorume;
- sistema de drenagem de águas pluviais, as quais ao infiltrarem no maciço do aterro podem gerar instabilidade geotécnica e o aumento da produção de chorume.

O chorume deve ser previamente tratado antes de seu lançamento em corpo receptor, podendo a unidade de tratamento localizar-se na área do aterro ou não.

O biogás pode ser queimado na atmosfera ou ter aproveitamento energético. A maioria dos aterros utiliza o sistema de drenos abertos, onde é mantida acesa uma chama para queima imediata do biogás que vai sendo naturalmente drenado. Esse sistema apresenta uma baixa eficiência e estima-se que apenas 20% do biogás sejam efetivamente destruídos pela queima. O restante é emitido para a atmosfera (ICLEI, 2009).

A utilização do biogás pode ser objeto de projetos que visem ter como recompensa financeira a comercialização de créditos de carbono em mercados voluntários ou Reduções Certificadas de Emissão (RCEs) do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, conforme previsto no Protocolo de Quioto.

b) O biogás

Após a disposição dos RSU em aterro sanitário, reações bioquímicas passam a ocorrer nos componentes orgânicos presentes. Em faixa próxima à superfície, devido à presença de ar atmosférico, ocorre a oxidação aeróbia desses compostos com formação de dióxido de carbono e vapor d'água. Nas camadas mais profundas predominam as condições com ausência de oxigênio favorecendo a digestão anaeróbia. Essa digestão ocorre em quatro estágios conforme anteriormente abordado no item Biometanização.

O biogás de aterro contém em torno de 54% de CH₄ e 46% de CO₂ e ainda, pequena concentração de vapor d'água, amônia, gás sulfídrico e outros constituintes (ENGEBIO, 2009b). No meio industrial é adotado o percentual de 50% para expressar a concentração do metano.

c) Captação e tratamento do biogás

A coleta do biogás em aterros sanitários com a finalidade de aproveitamento energético requer o prévio planejamento da instalação dos equipamentos destinados a esse fim, permitindo ao operador do sistema o monitoramento e ajuste do fluxo de gás.

Visando reduzir o investimento inicial, a implantação do sistema de extração é normalmente realizada em etapas, ampliando as instalações conforme o aumento da geração de biogás.

Apresenta-se na Figura 18 o esquema simplificado do processo de captação e tratamento do biogás.

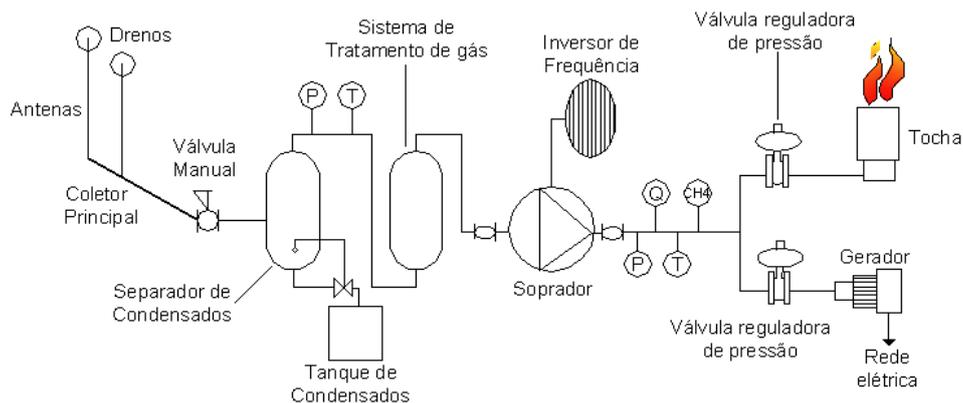


Figura 18 – Representação esquemática simplificada do processo de captação e tratamento do biogás.
 OBS: T, P, Q, CH₄ referem-se aos controles da temperatura, pressão, vazão e concentração de metano.
 Fonte: ENGEBIO (2009a).

O sistema de captação do biogás é composto basicamente por drenos horizontais e verticais, sopradores, filtros, para a remoção de material particulado, e tanques separadores de condensado. O pré-tratamento do biogás para a remoção de particulados e líquidos tem a finalidade de proteger os sopradores, equipamentos que fornecem a pressão necessária para a extração do biogás, aumentando a vida útil dos mesmos. Os drenos existentes no aterro e que apresentam boa vazão de biogás podem ser adaptados e integrados ao sistema de captação. A adaptação consiste na impermeabilização da parte superior dos drenos, instalação de um cabeçote e interligação ao sistema de coleta.

As tubulações provenientes dos drenos são interligadas a pontos de regularização de fluxo (*manifolds*) e estes são interligados a uma linha principal, que conduz o biogás para os sistemas de queima ou aproveitamento energético. A linha principal é conectada a um soprador.

O sistema de captação pode utilizar tubulações individuais de captação para cada poço ou grupos de poços de drenagem de biogás, ligados a *manifolds* distribuídos uniformemente pelo aterro.

O resfriamento do biogás ao longo da tubulação instalada sobre o aterro gera bastante condensado. Para evitar o entupimento dos tubos e a perda de pressão nas linhas, são previstos drenos com sifões. O condensado recolhido é novamente infiltrado no maciço do aterro, quando o sistema de drenagem de chorume for eficiente, ou encaminhado à estação de tratamento de esgoto (ETE) do empreendimento, quando essa condição não for atendida.

Um sistema de extração de biogás de aterro pode ainda conter um *flare* para a queima do excesso de gás ou para uso durante os períodos de manutenção dos equipamentos (Figura 19).

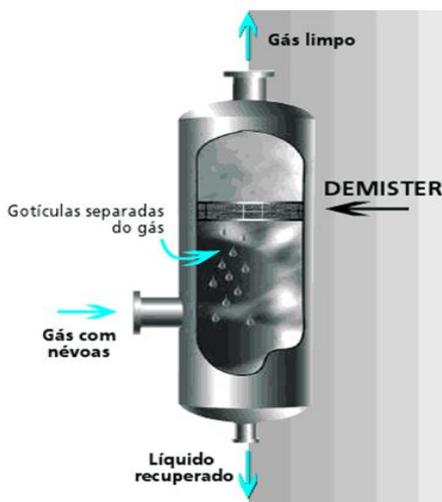


Flare (ou tocha): dispositivo simples para ignição e queima de biogás. Pode ser aberto ou enclausurado. (Figura 19)
No *flare* enclausurado o queimador, ou o conjunto de queimadores, situa-se dentro de um invólucro cilíndrico revestido de material refratário que permite uma queima uniforme do biogás e um baixo nível de emissões atmosféricas.

Figura 19 - Flares. a) *flare* enclausurado (fechado); b) *flare* aberto.
Fonte: ICLEI (2009); Combustec (2011).

Os *flares* enclausurados podem reduzir o nível de ruído e iluminação. Nestes o monitoramento contínuo dos teores de metano e oxigênio e da temperatura do gás de exaustão é relativamente simples e visa o controle do processo.

A instalação de um *flare* é recomendável especialmente para os projetos que se destinam à obtenção de créditos de carbono nos quais a recuperação energética se mostrar economicamente inviável, por ser um meio seguro de eliminação do biogás produzido nos aterros e permitir o monitoramento do volume de metano queimado. O *flare* deverá atender aos requisitos definidos na metodologia de MDL.



A primeira etapa de tratamento do biogás extraído ocorre pela passagem desse gás através de um filtro, para a remoção de material particulado eventualmente arrastado durante a extração. Após passagem pelo filtro, o biogás é encaminhado a um tanque separador de líquidos, o desumidificador — Demister é o sistema mais utilizado —, que tem a finalidade de segregar as gotículas de líquidos contidas no biogás, evitando seu aporte para os sopradores do sistema de extração de gases. O líquido gerado é enviado ao sistema de coleta de chorume.

Figura - 20 - Esquema de um desumidificador
Fonte: Nelson Clark Engenharia (2011).

O biogás, já isento de partículas sólidas e de gotículas líquidas, passa então pelo soprador sendo encaminhado para a queima controlada no *flare* e/ou para sistemas de aproveitamento energético.

d) Principais exigências técnicas

Para empregar a maioria das tecnologias de utilização de biogás de aterro é necessário seu processamento, que irá variar em função da utilização do gás. A forma primária de tratamento do biogás é a remoção do vapor d'água. A redução do teor de umidade e do número de compostos gasosos e particulados diminui a natureza corrosiva do biogás, o que reduz os custos de manutenção. A produção de combustível de alto teor requer a separação da porção de metano presente no biogás.

A degradação de lixo orgânico é um processo exotérmico e, portanto, o biogás possui uma temperatura elevada (de 30 °C a 60 °C) e é essencialmente saturado com vapor d'água. O teor alto de umidade, em combinação com dióxido de carbono, sulfato de hidrogênio e compostos orgânicos voláteis (VOC), cria um gás potencialmente corrosivo. As técnicas de redução de umidade que podem ser aplicadas incluem separadores de umidade, eliminadores de neblina, esfriamento direto, compressão seguida de esfriamento, absorção e adsorção.

O esfriamento e a compressão do biogás diminuem sua capacidade de reter umidade. O processo de resfriamento é geralmente atingido por meio do uso de trocadores de calor ar/ar ou ar/líquido. A compressão, depois do esfriamento, serve para desidratar mais o biogás.

As técnicas de absorção usam um material sólido granulado que possui afinidade com água. Neste processo, a água adere ao material granulado à medida que o gás passa. São exemplos desses meios: gel de sílica, alumina e silicatos, conhecidos como crivos moleculares. Esta técnica é algumas vezes usada em conjunto com a absorção em sistemas mecânicos, tais como purificadores de gás Venturi.

As partículas sólidas transportadas pela corrente de biogás precisam ser removidas em aplicações para uso de combustível de alto e médio teor de metano para evitar danos aos sistemas de ventilação e aos outros componentes do equipamento. A maior parte da matéria particulada fina está nas gotículas de umidade do biogás. A remoção de umidade, portanto, serve o duplo objetivo de também remover a matéria particulada. Filtros também podem ser usados para reduzir o conteúdo particulado do biogás, porém requerem um alto nível de manutenção e precisam ser limpos com frequência e/ou substituídos.

Os compostos gasosos normalmente removidos do biogás são compostos de enxofre, compostos orgânicos não-metano (NMOCs) e compostos orgânicos voláteis (VOC). Estes compostos podem ser removidos por meio do uso de carbono granulado ativado, de solventes seletivos ou da esponja de ferro.

O dióxido de carbono presente no biogás não possui valor calórico e cria um líquido corrosivo quando combinado com vapor d'água. Ao usar métodos de extração, adsorção e de separação de membrana, o dióxido de carbono pode ser removido.

A composição do resíduo, umidade, tamanho de partículas, dentre outros fatores, impactam no potencial de geração de biogás. Este potencial depende ainda das condições do clima, geografia e relevo do sítio do aterro, e outros fatores locais, destacando-se os bons sistemas de impermeabilização e de drenagem — pluvial e de chorume. O chorume, quando não bem drenado, pode dificultar a captura do biogás por afogamento dos drenos. Em um poço de coleta de gás, o acúmulo de chorume pode impedir o fluxo do metano através do maciço ou ainda bloquear as aberturas/ranhuras do poço de extração.

e) Principais aspectos ambientais com potencial de impactos negativos

A queima do biogás para o aproveitamento energético ou obtenção de créditos de carbono gera benefícios ambientais expressos na produção de energia elétrica ou térmica a partir de um combustível renovável, na redução de odores representados pelas emissões fugitivas dos aterros sanitários, e na queima de um gás de efeito estufa, o metano — 21 vezes mais potente que o CO₂.

O sistema de controle dos efluentes atmosféricos, procedentes da queima do biogás, deve estar dotado de equipamentos de monitoramento contínuo, no mínimo, para os parâmetros vazão, CO₂ e O₂; e periódico para os parâmetros CO, NO_x, SO_x e CH₄. A avaliação das emissões deve contemplar os parâmetros e frequências estabelecidos pela Resolução CONAMA n. 382/2006 ou n. 436/2011 que estabelecem os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas.

Quais as opções de aproveitamento energético do biogás gerado?

O biogás gerado nos processos de biometanização se assemelha ao biogás produzido nos aterros sanitários, podendo ser usado para as mesmas finalidades. Basicamente, pode ser convertido em energia útil como combustível para motores de combustão interna ou turbinas, como combustível para queima em fogões ou caldeiras ou mesmo como combustível para transporte da frota veicular. A escolha de uma das alternativas varia de acordo com três componentes: o sistema de coleta utilizado, o sistema de tratamento do biogás e o sistema de geração ou recuperação energética.

Apresentam-se na Figura 21 algumas rotas para utilização de gás de aterro (GDL).

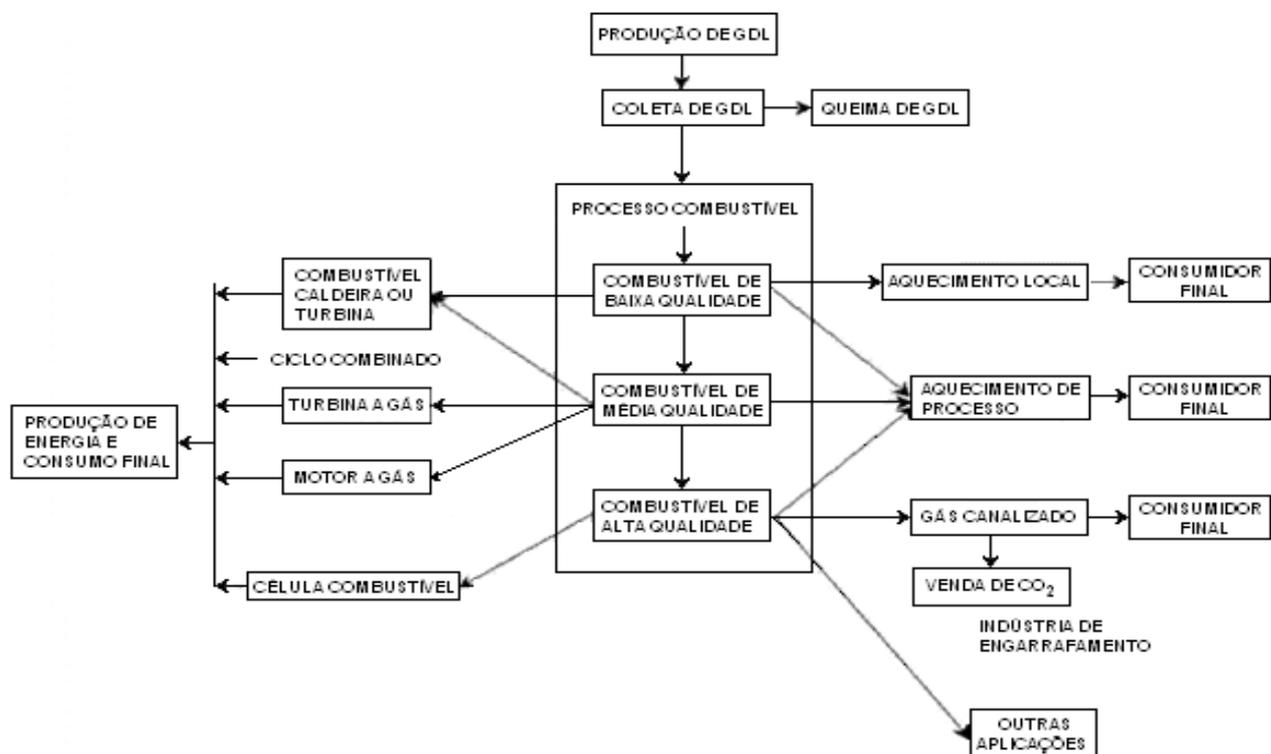


Figura 20 - Rotas para utilização de gás de aterro (GDL).

Fonte: Willumsen (2001) apud EPE (2008).

O biogás de aterro pode ser classificado em três categorias, com base no nível de pré-tratamento/processamento antes da utilização:

- **Combustível de baixa qualidade ou baixo teor** – A utilização de biogás como combustível de baixo teor requer essencialmente processamento mínimo, envolvendo câmara(s) de remoção de condensado, como parte do sistema de coleta do biogás, e tanques de decantação da umidade para reduzi-la na corrente de gás (BANCO MUNDIAL, 2004).

- **Combustível de média qualidade ou teor médio** – Equipamentos de tratamento de gás adicionais são usados para extrair mais umidade (com contaminantes) e material particulado mais fino. O processo envolve caracteristicamente a compressão e a refrigeração do biogás e/ou tratamento químico, ou purificação, para remover umidade adicional e os compostos gasosos como *mercaptans*, compostos de enxofre, silício e compostos orgânicos voláteis (BANCO MUNDIAL, 2004). Contém tipicamente 50% de metano (MICHELSEN, 2010).
- **Combustível de alta qualidade ou alto teor** – A utilização como combustível de alto teor envolve extenso pré-tratamento do biogás — separação do dióxido de carbono e de outros constituintes gasosos; remoção de impurezas (*mercaptans*, compostos de enxofre, sulfato de hidrogênio e compostos orgânicos voláteis) e desidratação por meio de compressão (BANCO MUNDIAL, 2004). Contém de 90% a 99% de metano (MICHELSEN, 2010).

É importante observar que os projetos de aproveitamento de biogás não utilizam a expressão baixa qualidade, uma vez que esta foi incorporada à categoria média qualidade.

Quais as tecnologias mais utilizadas e por quê?

A tecnologia de aproveitamento do biogás de aterro é o uso energético mais simples dos resíduos sólidos urbanos. É uma alternativa que pode ser aplicada a curto e médio prazos para os gases produzidos na maioria dos aterros já existentes, como ocorre em centenas de aterros de diversos países.

No Brasil, o aproveitamento energético do biogás gerado a partir da matéria orgânica biodegradável é ainda incipiente. Em Minas Gerais existem algumas unidades implantadas utilizando dejetos de suinocultura, que utilizam o biogás gerado para queima em *flare*, reivindicando as emissões evitadas em projetos de MDL (BRASIL, 2011b).

Quais os avanços tecnológicos em andamento?

Os aspectos construtivos de um aterro sanitário interferem na geração de biogás. Assim, os novos projetos, com perspectivas de aproveitamento do biogás face ao volume de RSU a serem dispostos, devem ser concebidos e implantados considerando a melhor técnica de impermeabilização dos maciços e dos sistemas de captação do biogás, otimizando a recuperação do biogás e a redução das emissões fugitivas.

5. DADOS COMPARATIVOS ENTRE TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

Qual a capacidade mínima de processamento para viabilidade de projeto e potencial de geração de energia elétrica?

Na Tabela 8 encontra-se a quantidade mínima de RSU recomendada por estudos relativamente recentes para as tecnologias de tratamento térmico por incineração, digestão anaeróbia e biogás de aterro, visando ao aproveitamento energético, assumindo-se uma viabilidade de projeto equiparada a de uma termelétrica a gás natural.

Tabela 8 - Estimativas da quantidade mínima de RSU e geração de energia elétrica para tecnologias usuais de aproveitamento energético.

Tecnologia	t RSU/dia ¹	MWh / t RSU ²
Incineração	500	0,4 a 0,6
Digestão anaeróbia	200	0,1 a 0,3
Biogás de aterro sanitário	300	0,1 a 0,2

Fonte: 1- Tolmasquim (2003); 2- Oliveira (2009).

A menor geração pelo gás do aterro em relação ao gás de digestores se deve ao baixo índice de recuperação do gás de aterros sanitários, em geral da ordem de 50% do total produzido.

Entretanto, já é possível atualmente viabilizar tecnologias de incineração e digestão anaeróbia com o mínimo de 150 t/dia de RSU bruto, sendo mais conveniente o mínimo de 250 t/dia. Nesse caso, para a incineração, será necessário combustível auxiliar quando o PCI estiver entre 1.675 kcal/kg e 2.000 kcal/kg (OLIVEIRA, 2011), e nunca inferior a 1.435 kcal/kg (BANCO MUNDIAL, 2000 apud CEMIG GT e FEAM, 2010).

Quanto à quantidade de resíduos depositados, necessária para que um aterro sanitário seja considerado economicamente viável do ponto de vista de coleta e utilização de metano para fins energéticos, a experiência da USEPA, datada de 1996, indica o valor de um milhão de toneladas já depositado (CETESB, 2006, p. 112).

No entanto, outros estudos consideram que o aterro sanitário deve receber, no mínimo, 200 t/dia de resíduos, apresentar uma capacidade total de recepção, no mínimo, de 500.000 t e uma altura mínima de

carregamento de 10 m; além disso, os resíduos não devem ter sido depositados há mais de que 5 ou 10 anos antes de sua recuperação (JOHANNESSEN, 1999, p. 8).

A partir da divergência de valores mínimos de quantidade de resíduos encontrada na literatura, recomenda-se fortemente que estudos de viabilidade local sejam realizados por equipes técnicas especializadas para determinação dos riscos de implantação de projetos de aproveitamento energético, com base nas diferentes tecnologias citadas.

Existem instalações comerciais em funcionamento no Brasil e no Mundo?

Em países desenvolvidos há plantas comerciais para o aproveitamento energético de RSU, principalmente utilizando as tecnologias de incineração, coprocessamento e biogás de aterro.

No Brasil, a prática usual para tratamento dos RSU ainda tem sido a disposição no solo, havendo poucos aterros sanitários com aproveitamento energético. Entretanto, para resíduos industriais e de serviços de saúde há unidades de incineração (principalmente nos estados da Bahia, São Paulo e Rio de Janeiro) e de coprocessamento de resíduos industriais em fornos de clínquer (inclusive em Minas Gerais).

Na Tabela 9 são reportadas as características de alguns principais incineradores localizados no Brasil, em geral do tipo rotativo; todos eles possuem, pelo menos, lavadores de gases e o controle contínuo de emissão para os parâmetros O_2 e CO/CO_2 . As cinzas geradas são destinadas, em geral, a aterro industrial classe I.

Tabela 9 - Características de alguns dos principais incineradores de resíduos instalados no Brasil.

Planta	Estado	Capacidade (t/ano)	Resíduos processados	Tratamento dos gases	Controles contínuos de emissões
BASF	SP	2.700	R.S.L.P, exceto ascarel	LAA	O ₂ , CO, SO _x
BAYER	RJ	3.200	R.S.L.P, inclusive bifenilas policloradas	LAA, separador de gotículas	O ₂ , CO
CETREL	BA	10.000	R.L organoclorados	LAA	O ₂ , CO ₂ , NO _x
CETREL	BA	4.500	R.S classe I	Ciclone, LAA	O ₂ , CO, CO ₂ , NO _x , SO ₂ , opacidade
CIBA	SP	3.200	R.I, exceto ascarel e radioativos	LAA, <i>demister</i> (eliminador de névoa), ciclone	O ₂ , CO, NO _x , SO _x , MP, temperatura, vazão
CINAL*	Al	11.500	R.S.L.P, inclusive PCBs e organoclorados	LAA	O ₂ , CO, CO ₂ , NO _x , SO _x , MP
CLARIANT	SP	2.700	R.S.P.	LAA	O ₂ , CO, CO ₂ , NO _x , SO _x , MP
ELI LILY	SP	10.400	R.S.L.P	LAA	O ₂ , CO, CO ₂
KOMPAC*	CE	10.950	RSS e R.I	LAA	O ₂ , CO, CO ₂
RHODIA	SP	18.000	R.S.L.P, inclusive organoclorados	LAA	O ₂ , CO, CO ₂ , NO _x
SILCON**	SP	3.600	RSS	LAA	O ₂ , CO, CO ₂ , NO _x

R.S.L.P = resíduos sólidos, líquidos e pastosos; R.I = resíduos industriais; RSS = resíduo de serviço de saúde

LAA = lavadores ácido e alcalino; MP = material particulado

(*) incinerador tipo câmara horizontal com leito recíprocante

(**) incinerador leito fixo, pirolítico

Fonte: Menezes, Gerlach e Menezes (2000).

As cimenteiras no estado de Minas Gerais, que tem realizado o coprocessamento de uma grande variedade de resíduos industriais, como pneus, óleos, borrachas e solventes, estão localizadas em nove municípios (Quadro 2); estas cobram do respectivo gerador para a prestação deste serviço e providenciam, junto ao Órgão Ambiental, o processo de licenciamento necessário.

Quadro 2 - Municípios de Minas Gerais com indústrias cimenteiras ambientalmente licenciadas para o coprocessamento de resíduos.

Município	Razão social da indústria cimenteira
Ijaci	Camargo Correa Cimentos S/A
Pedro Leopoldo	Camargo Correa Cimentos S/A Holcim Brasil S/A
Matozinhos	Cia. de Cimento Portland LACIM (ex-Lafarge Brasil S/A)
Arcos	Cia. de Cimento Portland LACIM (ex-Lafarge Brasil S/A)
Carandaí	Cimento Tupi S/A
Vespasiano	Empresa de Cimentos Liz S/A
Barroso	Holcim Brasil S/A
Montes Claros	Lafarge Brasil S/A (LI em junho/2010);
Itaú de Minas	Votorantim Cimentos S/A

Fonte: Adaptado de Minas Gerais (2011e).

a) Algumas experiências brasileiras de aproveitamento energético de RSU

a.1) Incineração

Foi construída uma planta experimental, denominada USINAVERDE, no campus da UFRJ da Ilha do Fundão, no município Rio de Janeiro. O objetivo desta planta foi desenvolver a tecnologia de tratamento térmico de RSU com produção de energia elétrica. A planta tem capacidade para incinerar 30 t/dia de RSU e a termelétrica possui potência de 750 kW. A USINAVERDE adota uma solução modular para suas plantas em escala comercial, tendo cada módulo a capacidade de tratamento de 150 t/dia de RSU bruto, que permite atender as necessidades de disposição final de resíduos de cerca de 180 mil habitantes (ENGEBIO, 2010b).

a.2) Pirólise

Foi instalada uma planta comercial de pirólise de RSU, na modalidade carbonização, no município de Unaí/MG, projetada para o recebimento e processamento nominal em batelada de 3 t/h de RSU, em 3 turnos, perfazendo 72 t/dia, operando continuamente durante o ano. Os principais produtos serão briquetes de carvão, originários da carbonização do lixo, e a energia elétrica, a ser produzida na termelétrica, que utilizará os briquetes como combustível. Os briquetes de carvão também serão utilizados para o aquecimento externo do forno horizontal de pirólise. A planta possui licença de instalação corretiva, entretanto, em maio/2011 a licença de operação foi negada devido ao estágio atual de instalação e a insubsistência técnica dos projetos apresentados como cumprimento das condicionantes da licença de instalação. Uma nova requisição de licença de operação foi formalizada em agosto/2011 e encontra-se em análise no Órgão Ambiental.

a.3) Coprocessamento

No município de Cantagalo, no estado do Rio de Janeiro, o coprocessamento de RSU foi licenciado em 1999 e vem sendo realizado em escala piloto com a utilização do resíduo domiciliar municipal na fábrica de cimento da empresa Lafarge, situada no mesmo município. Os procedimentos para utilização dos RSU no coprocessamento são o beneficiamento em uma usina de triagem e compostagem, com posterior peneiramento. A fração mais fina do composto é utilizada em lavouras no município como fertilizante e a fração mais grossa é encaminhada à cimenteira para o coprocessamento (FEAM, 2010).

a.4) Biogás de aterro sanitário

No município de Belo Horizonte foi instalada uma central de aproveitamento energético de biogás no antigo aterro sanitário da BR 040, sendo a energia gerada comprada e distribuída na rede da Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG. Desativado desde 2007, o antigo aterro recebia cerca de 4 mil toneladas de resíduos por dia, tendo sido fechado com 25 milhões de toneladas aterradas. O biogás coletado é utilizado como combustível em três motores com capacidade de geração de 1,426 MW cada, totalizando 4,278 MW, suficiente para abastecer cerca de 20 mil residências de baixo consumo (inferior a 100 kWh/mês). A central foi projetada e construída pelo Consórcio Horizonte Asja, que tem concessão para explorar o local durante 15 anos. O empreendimento recebeu registro do Conselho Executivo das Nações Unidas como projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), permitindo ao empreendimento a obtenção e comercialização no mercado internacional das RCEs em conformidade com o Protocolo de Quioto (PBH, 2011).

No município de São Paulo, o biogás gerado nos aterros sanitários São João e Bandeirantes é utilizado por duas usinas termelétricas, com potências instaladas de 24 MW e 22 MW, respectivamente. Em Salvador/BA, o biogás gerado em seu aterro municipal é aproveitado para a geração de energia elétrica, na termelétrica Termoverde Salvador, do Grupo Solvi, com potência instalada de 19,73 MW (GASNET, 2011a). E, na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, há o projeto de o biogás extraído do Aterro Metropolitano de Jardim Gramacho, após purificação e separação do gás em metano e CO₂, ser escoado através de gasoduto de 6 km até a Refinaria de Duque de Caxias — REDUC, da Petrobrás. O responsável pelo projeto é o Consórcio Nova Gramacho Energia Ambiental, formado pelas empresas Biogás Energia Ambiental, Grupo Synthesis e Construtora J. Malucelli (GASNET, 2011b).

b) Algumas experiências internacionais de aproveitamento energético de RSU

b.1) Incineração

Nas Tabelas 10 e 11 estão reproduzidos alguns dados sobre a prática de incineração em países desenvolvidos, os quais demonstram que esse processo está bem consolidado na Europa e no Japão.

Tabela 10 - Percentual de lixo urbano incinerado em países desenvolvidos.

País	Número de Incineradores	Incineração de resíduos como tratamento do lixo urbano (%)	Fração com recuperação de energia
Suíça	29	80	80%
Japão	1893	72	Poucas plantas
Dinamarca	32	65	100% (maioria aquecimento*)
Suécia	21	59	100% (maioria aquecimento*)
França	100	41	68% da capacidade
Holanda	9	39	50% da capacidade
Alemanha	51	30	-
Itália	51	17	30% da capacidade
EUA	168	19	75% das usinas
Espanha	21	15	24% das usinas
Reino Unido	7	5	25% da capacidade (Poucas plantas*)

Fonte: Lima (1994) e BNDES (1997) apud Menezes, Gerlach e Menezes (2000); CEMIG GT e FEAM (2009).

(*) Willumsen (1999) apud Henriques et al. (2003).

Tabela 11 - Destino dos resíduos em alguns países desenvolvidos (1994).

País	Aterros sanitários (%)	Usinas de Triagem e Compostagem (%)	Incineradores (%)
Alemanha	72	3	25
Bélgica	62	9	29
Dinamarca	37	7	56
Espanha	76	16	8
França	50	20	30
Holanda	50	20	30
Inglaterra	90	1	9
Itália	56	10	34
Japão	24	4	72
Suécia	35	10	55
Suíça	6	6	88

Fonte: Conecte Educação (2008) apud ENGEBIO (2010b); CEMIG GT e FEAM (2009).

Nesses países, as plantas estão frequentemente localizadas em áreas urbanas e possuem projetos arquitetônicos arrojados. Em países europeus é usual a destinação de parcela do vapor gerado para o aquecimento de residências.

Na Tabela 12 estão transcritos alguns dados técnicos obtidos pela CEMIG em visitas a plantas de incineração da Europa e EUA, realizadas em 2009.

Tabela 12 - Dados técnicos de plantas de incineração de RSU visitadas pela CEMIG em 2009.

Instalação	País	Qte RSU (t/dia)	Potência (MW)		Relação MWh liq./t RSU	Eficiência Elétrica (%)	PCI RSU (kcal/kg)
			bruta	líquida			
Covante (Semass) (1)	E.U.A.	3.000	80	70	0,56	22	nd
AEB (WTE Plant)	Holanda	2.800	nd	67	0,57	22	2.400
Veolia (Miame-Dade) (1)	E.U.A.	2.688	76	64	0,57	nd	nd
Covanta (Hempstead)	E.U.A.	2.500	78	69	0,66	20	2.600
Bréscia	Itália	2.230	76	70	0,82	26	2.500
Valorsul	Portugal	2.016	44	38	0,45	nd	1.900
HVC	Holanda	1.800	68	60	0,8	22	2.600
AEB (WFP Plant)	Holanda	1.600	66	57	0,86	30	2.400
Wheelabrator	E.U.A.	1.500	45	40	0,64	nd	nd
Lipor II	Portugal	1.100	25	21	0,46	nd	1.800
Mainz (2)	Alemanha	780	32	nd	nd	23	2.350-2.675
Zabalgardi (2)	Espanha	720	99,5	95 (2) /22,5(3)	0,75	42	1.900
ZAB	Suíça	415	5,5	nd	nd	nd	2.600
Novo Energy	E.U.A.	200	4	3,4	0,41	nd	nd

(1) Processa CDR

(2) Usina em ciclo combinado a gás natural integrada com planta de valorização energética de RSU

(3) Potência líquida referente à planta de valorização energética de RSU

nd – não disponível

Fonte: CEMIG GT e FEAM (2010).

b.2) Pirólise

Na cidade de Günzburg, Alemanha, a empresa municipal de limpeza urbana tem uma usina de pirólise, em atividade permanente desde 1985, que processa 38.580 t/ano de resíduos (domésticos, comerciais, volumosos e lodo de esgoto). Os resíduos triturados são colocados em um tambor rotativo (2,64 t/h) aquecido por chamas de gás, onde as temperaturas variam de 400 °C a 500 °C. O *syngas* produzido no processo passa por um separador ciclônico para a remoção das partículas brutas e então é direcionado para uma câmara de pós-combustão onde a temperatura é de 1.200 °C.

A planta de pirólise *Müllpyrolyseanlage*, Burgau/Alemanha, processa 34.000 t/ano de RSU e utiliza o *syngas* para a geração de energia elétrica. Os gases de combustão procedentes da queima do *syngas* na caldeira são destinados a um sistema composto por um lavador de gases tipo seco utilizando bicarbonato de sódio e carvão ativado (para remover SO₂, HCl e Hg), seguido de filtro de mangas para reter o material particulado. Nessa planta adiciona-se cal aos RSU recebidos para remover SO₂ do *syngas* (PYROLYSIS FACILY, 2004).

Realiza-se o monitoramento das emissões atmosféricas quanto aos seguintes parâmetros: material particulado, HCl, SO₂, carbono total, Cd e Tl, Hg, dioxinas e furanos. As escórias e carvão (char) procedentes do forno são resfriados em água; os resíduos retidos no ciclone e no filtro de mangas são destinados ao

aterro e a uma mina de cal, respectivamente; uma parte do vapor residual que sai da turbina é destinada para o aquecimento de uma estufa na vizinhança, sendo que, após condensação, retorna ao tanque de água de alimentação da usina (PYROLYSIS FACILY, 2004).

b.3) Gaseificação (Plasma Gaseificação)

Processando RSU pela tecnologia plasma gaseificação, existem duas plantas em operação no Japão e uma no Canadá:

- A indústria situada no parque industrial Mihama-Mikata/Japão, começou a operar em 2002. Ela pode processar mais de 24 t/dia de RSU e 4 t/dia de lodo de tratamento de esgoto. A indústria é relativamente pequena e não produz *syngas* para combustível. Entretanto, são produzidos vapor e água quente, que são usados para geração de energia e calor no parque industrial. A indústria usa um sistema de resfriamento a água para a escória fundida e separa os nódulos de metal para vendê-los como sucata. A areia é misturada com o concreto para ser usada em blocos de pavimentação (ENGEBIO, 2010b).
- A indústria em Utashinai, Japão, também começou a processar RSU em 2002. O desenho original dos equipamentos determinou sua capacidade em torno de 170 t/dia de RSU e de resíduos automotivos. Atualmente, processa aproximadamente 300 t/dia, gerando mais de 7,9 MWh de eletricidade, enviando aproximadamente 4,3 MWh à rede elétrica (ENGEBIO, 2010b).
- Em Ottawa/Canadá, há desde janeiro/2008 uma planta demonstrativa de escala comercial da *Plasco Energy Group* com capacidade de 100 t/dia RSU, que produz eletricidade, e as escórias são comercializadas (PLASCO ENERGY GROUP, 2011).

Na Flórida/EUA está em construção uma planta plasma gaseificação (Geoplasma-St. Lucie) com potência instalada de 18 a 20 MW, operação prevista para 2013, que irá processar 600 t/dia de RSU e 60 t/dia de pneu picado, visando à comercialização de energia elétrica e vapor (ERG, 2011).

Em Hirwaun, sudeste do País de Gales, o grupo *Enviro Parks* está implantando uma planta que irá processar cerca de 5% dos RSU, prevendo sua conclusão até 2014. Será uma planta avançada conjugando área de CDR (separando os recicláveis), digestão anaeróbia (a partir de matéria orgânica de restaurantes e a separada seletivamente nas residências) e tratamento térmico por plasma gaseificação (para os restos de orgânicos e demais resíduos que não se prestaram a outras destinações) para produzir energia e o mínimo de resíduos e impactos ambientais. O digestato produzido no processo poderá ter uso agrícola ou na planta de conversão de energia a plasma (ENVIROPARKS, 2011a).

No Japão, o plasma é usado também para fundir cinzas de incineração e, conseqüentemente, reduzir o volume descartado; na França, cinzas de incineração e asbesto são transformados, pela tecnologia de plasma, em escória inerte.

b.4) Biometanização

Nos últimos quinze anos, especialmente na Europa, a digestão anaeróbia assumiu papel importante entre os métodos de tratamento de RSU.

No final de 2004, por exemplo, a Europa tinha disponível uma capacidade de digestão anaeróbia de 2.553.000 t/ano para tratamento de resíduos orgânicos domiciliares (decorrente de 86 plantas com capacidade média de 29.686 t/ano), sendo 37 plantas na Alemanha (totalizando uma capacidade de 683.605 t/ano); no entanto, estava na Espanha a maior capacidade instalada (818.000 t/ano). As instalações na Alemanha possuíam à época capacidade média de 18.500 t/ano, enquanto que as instalações mais recentes nos arredores de Barcelona (Espanha) tratavam em média 63.000 t/ano de orgânicos presentes no RSU (CEMIG GT e FEAM, 2009).

As principais tecnologias comerciais existentes para a digestão anaeróbia de RSU são denominadas: VALORGA (francesa), DRANCO (belga), BTA (alemã), WAASA (finlandesa), KOMPOGÁS (suiça) e LINDE (suiça), as quais estão patenteadas e implantadas em diversos países.

Observam-se ainda problemas técnicos nos digestores das tecnologias comerciais, principalmente no que tange aos aspectos operacionais, tais como a agitação do material, acumulação de inertes, criação de caminhos preferenciais e zonas mortas (DEFLORE, 2009 apud CEMIG GT e FEAM, 2009).

Na Tabela 13 estão reportados dados técnicos referentes a plantas de biometanização e gaseificação de países europeus e dos EUA, respectivamente, visitadas pela CEMIG em 2009.

Tabela 13 - Dados técnicos de plantas de biometanização e gaseificação de resíduos orgânicos visitadas pela CEMIG em 2009.

Instalação	País	Qte RSU (t/dia)	Potência bruta (MW)	Relação MWh bruto/t RSU
Biometanização				
Ecoparc 1	Espanha	700	5	0,171
Omrin	Holanda	630	6	0,229
Kompogas (Otefingen)	Suíça	35	0,33	0,226
Kompogas (Oensingen)	Suíça	45	0,65	0,347
Gaseificação de biomassa em leito fluidizado				
Zero Point	E.U.A.	24	2	2.000

Fonte: CEMIG GT e FEAM (2010).

b.5) Biogás de aterro sanitário

Existem estudos internacionais em desenvolvimento relacionados ao aproveitamento energético de biogás de aterros sanitários, dentre eles uma publicação orientando sobre as melhores práticas em projetos de energia relacionados ao biogás de aterro, desenvolvido pela EPA e que está em fase de revisão (Comunicação pessoal EPA).

Entretanto, uma referência bibliográfica de 2001 já mencionava a existência de cerca de 950 plantas de gás de lixo em todo o mundo — número que deve ser visto com reserva, pois não é possível obter dados exatos de todos os países —, nas quais o gás é utilizado com propósito energético, localizando-se em diversos países, principalmente EUA, Alemanha, Inglaterra, Suécia, Holanda, Itália, Austrália, Canadá, Dinamarca e Noruega (LANDIM e AZEVEDO, 2008).

Há dados sobre os custos de implantação e operação e tempo de implantação?

São escassos na literatura os dados referentes aos custos de implantação e de operação e ao tempo de implantação das tecnologias apresentadas neste Guia, mesmo porque esses dependem das especificidades de cada projeto, o que vem reforçar a necessidade dos estudos próprios de viabilidade econômica para a decisão sobre uma ou outra tecnologia.

Apresentam-se, a seguir, alguns dados sobre custos, advindos principalmente de estudos contratados pela FEAM e de parcerias com terceiros.

a) Incineração

Apresentam-se, na Tabela 14, as estimativas dos percentuais de alguns itens do custo de investimento, excluindo a aquisição do terreno, em relação ao custo total, considerando os valores divulgados antecedente ao ano de 1999 (MENEZES, 1999).

Tabela 14 - Custos percentuais de investimento em relação ao custo total de uma planta de incineração.

Itens do custo de investimento	Percentual do custo total (%)
Projeto	5 – 8
Construção civil	10 - 25
Forno e sistema de recuperação de energia	30 - 40
Purificação de gases (*)	20 - 40
Tratamento dos resíduos finais	10 - 20
Sistema elétrico e de controle e monitoramento	10 - 20

(*) padrões normas Feema/RJ NT 574/1993, CETESB E1 5.011/1997 ou ABNT NB-1.265/1989

Fonte: Menezes (1999).

Tais percentuais tinham como base custos de investimento total situados na faixa de US\$ 60.000 a US\$ 130.000 por tonelada de capacidade instalada, para instalações de 150 t/dia a 1.200 t/dia de tratamento dos RSU, já computadas as receitas de venda de energia (valor não informado). Para o tratamento de resíduos especiais e perigosos, os investimentos sobem para a faixa de US\$ 100.000 a US\$ 200.000 por t/dia.

Quanto aos custos de Operação e Manutenção (O&M) apresentavam-se nas seguintes faixas médias: RSU – 50 US\$/t tratada a 110 US\$/t tratada; resíduos perigosos – 150 US\$/t tratada a 600 US\$/t tratada.

Apresentam-se, nas Tabelas 15 e 16, os resultados de um estudo, elaborado pela empresa ENGEBIO Engenharia S/S LTDA., em 2010, mediante contrato FEAM, sobre a viabilidade técnica e econômica de uma usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos (UAER) com geração de energia elétrica na região do Sul de Minas, em um raio de 100 km no entorno da cidade de Três Corações, totalizando uma população urbana de 645.137 hab. em 2007.

Os custos da usina hipotética, denominada de “Cenário UAER”, foram baseados em propostas comerciais das empresas Areva Koblitz e CNIM, tendo-se optado por um processo similar ao da CNIM, por se tratar de uma tecnologia já consolidada. Além disso, a proposta Areva Koblitz adota o atendimento aos padrões de emissão da Resolução CONAMA n. 316/2002, mas não especifica o sistema e destaca que no custo de investimento não está inclusa a aquisição de filtros de manga ou precipitadores eletrostáticos; as propostas da CNIM e do “Cenário UAER”, por sua vez, adotam padrões de emissão da Diretiva Europeia 2000/76/CE,

os quais são mais restritivos que os do CONAMA, e incluem os custos dos equipamentos a serem instalados para isso.

Tabela 15 - Resumo dos dados das usinas hipotéticas de incineração de RSU – estudo ENGEBIO.

Item	CNIM	Cenário UAER	Areva Koblitz	Unidade
Investimento total	332.000.000	232.400.000	192.991.080	R\$
Capacidade mínima	300	350	350	t/d
Capacidade máxima	600	640	640	t/d
Eficiência Líquida da Planta Térmica	25	26	22/24	%
Investimento Específico	33.200	17.877	12.866	R\$/kWe
Poder Calorífico do RSU	6155 (1.233)	6900 (1.651)	7745 (1.853)	kJ/kg (kcal/kg)
Potência instalada (Módulo I)	5	6,5	8	MWe
Potência instalada (Módulo II)	5	6,5	7	MWe
Potência instalada total	10	13	15	MWe
Disponibilidade da Planta	8000	8000	7800/8200	horas/ano

Fonte: ENGEBIO (2010a).

Tabela 16 - Simulação dos valores da implantação da UAER em duas etapas – estudo ENGEBIO.

Variáveis	CNIM		CENÁRIO UAER		Areva Koblitz	
	VE R\$170,00/MWh	VE R\$150,00/MWh	VE R\$170,00/MWh	VE R\$150,00/MWh	VE R\$170,00/MWh	VE R\$150,00/MWh
Investimento Módulo I (R\$)	190.000.000	190.000.000	133.000.000	133.000.000	98.995.540	98.995.540
Investimento Módulo II (R\$)	142.000.000	142.000.000	99.400.000	99.400.000	93.995.540	93.995.540
Investimento Total (R\$)	332.000.000	332.000.000	232.400.000	232.400.000	192.991.080	192.991.080
Receita de destruição térmica (R\$/t)	186,86	195,69	120,60	130,61	90,93	101,34

VE = valor de venda da energia

Fonte: ENGEBIO (2010a).

Os critérios estabelecidos na análise de investimento para o cálculo das taxas de destruição térmica (R\$/t), na simulação da UAER, foram uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 12,00% a.a. e um Valor Presente Líquido (VPL) de R\$ 0,00, considerando o valor de venda da energia elétrica a R\$ 150,00 e a R\$ 170,00 por MWh. A viabilidade do investimento foi calculada considerando uma taxa de atratividade de 12% a. a.

Premissas utilizadas pela ENGEBIO no estudo realizado:

- a geração *per capita* de RSU de 0,8 kg/hab.dia e a composição fixa ao longo dos anos, qual seja: 4,2% papel; 5,9% papelão; 2,2% vidro; 66,5% matéria orgânica; 3,8% metais; 2,3% plásticos duros; 6,7% plásticos outros; e 8,4% inertes;

- a UAER implantada em duas etapas (Módulos I e II) e dimensionada para a queima de resíduos brutos (sem nenhuma seleção de recicláveis e tratamento prévio), sendo 350 t/dia de resíduo nos primeiros 5 anos (início em dezembro/2011) e 640 t/dia depois de 5 anos de operação;
- a UAER composta das seguintes unidades: Recepção dos resíduos; Unidade de queima e recuperação de energia; Unidade de valorização de energia; Unidade de limpeza de gases de combustão; e Unidade de tratamento dos resíduos de combustão;
- toda a potência disponível convertida em energia elétrica;
- PCI dos RSU igual a 1.650 kcal/kg;
- disponibilidade de capacidade igual a 8.000 horas por ano;
- fator de conversão de energia de 26%;
- a UAER com 25 anos de vida útil;
- os orçamentos apresentados pelas empresas Areva Koblitz e CNIM na consulta a fornecedores de tecnologia para planta de combustão de RSU para geração de energia elétrica, tendo o escopo de suprimento para um contrato EPC (*engineering, procurement and construction*) desde a recepção dos resíduos até os silos de armazenamento de cinzas, e com projeto elétrico incluso;
- a alternativa desenvolvida para o “Cenário UAER” adota um processo similar ao da CNIM, visto que se trata de uma tecnologia já consolidada, contemplando um índice de nacionalização de 60% dos equipamentos e, com base na experiência de outros estudos realizados pela ENGEBIO, assume para esta opção um valor total igual a 70% do valor ofertado pela CNIM;
- as despesas de aquisição de terreno e de terraplanagem do mesmo não incluídas nos custos, admitindo que estarão a cargo do município onde a unidade será implantada;
- as “receitas operacionais” do projeto compostas pela venda de energia elétrica, a destruição térmica dos resíduos sólidos urbanos e a venda de créditos de carbono;
- o valor estimado dos créditos de carbono de 12 euros por toneladas equivalente de CO₂ (tCO₂eq);
- o custo de disposição de rejeito levando em conta o volume de cinzas volantes (ou leves) e pesadas, enquadrado como Classe I e o valor de R\$ 250,00 por tonelada de rejeito disposto em aterro;
- o investimento com financiamento tomado com base na linha Finem do BNDES: taxa de juros de 1,5% + 6% de TJLP (Taxa de Juros a Longo Prazo), contrapartida de 20% e prazo máximo de amortização de 14 anos.

b) Biogás de aterro

Os custos de capital para um sistema de coleta e controle de biogás dependerão em grande parte dos fluxos de biogás, do tamanho e da altura do maciço do aterro. Uma faixa típica para os custos de coleta,

incluindo o início da queima, teste de campo e os custos relacionados com a engenharia e a contingência, é de cerca de US\$70 mil a US\$120 mil por hectare de área de aterro. Os custos anuais de operação e manutenção variam em média de 7% a 10% dos custos totais, sem incluir os custos referentes ao consumo próprio de eletricidade ou de expansão do sistema (SCS ENGINEERS, 2011). Esses valores foram adotados nos estudos de avaliação preliminares dos aterros sanitários mineiros de Uberaba e Santana do Paraíso, realizados pela SCS Engineers para a FEAM.

Custos unitários estimados (SCS ENGINEERS, 2011):

- poços: US\$10.000/poço;
- tubulação principal, dutos laterais, válvulas: US\$9.000/poço;
- *flare* (1.000 m³/s em condições padrões de *flare* enclausurado) = US\$370.000.

Na Tabela 17 são apresentados valores estimados por Michelsen (2010) para os custos de investimento, referentes ao ano de 2008, de uma termelétrica a biogás.

Tabela 17 - Custos de investimentos em usina termelétrica a biogás de aterro com potência instalada de 3,2 MW (valores estimados para 2008).

Componente	Custo
Equipamentos instalados (tratamento/compressão do gás, motor/gerador, preparação do local, alojamento)	R\$ 9.216.000 (R\$ 2.880/kW _{instalado})
Equipamento de interconexão com a rede elétrica	R\$ 450.000/sistema
Custo total de investimento	R\$ 9.666.000
Custo anual de operação e manutenção do equipamento de tratamento/compressão de gás e motor/gerador (excluindo energia)	R\$ 793.336/ano (R\$ 0,036/kWh _{gerado})

Fonte: Michelsen (2010).

Em estudo de pré-viabilidade técnica e econômica a ENGEBIO (2009a) avaliou que os custos de implantação de uma unidade de geração de energia elétrica com aproveitamento de biogás de aterro estariam em torno de R\$ 3.500/kW instalado. Esse cálculo considerou os custos referentes à implantação de sistema de captação de biogás, dois módulos de geração de energia de 1,5 MW cada um e um *flare*, e, ainda, o somatório dos valores referentes aos projetos de MDL. O valor total estimado foi de, aproximadamente, 10 milhões e 400 mil reais. A implantação do sistema demandaria aproximadamente 12 meses.

Em usos diretos do biogás de aterro (venda a terceiros), as exigências para o tratamento do gás também são influenciadas pelo equipamento que o utilizará. Dependendo do nível de tratamento necessário, o sistema custa aproximadamente US\$400 a US\$500 por m³/h de biogás tratado. A construção de um gasoduto é o item de maior custo, ao redor de US\$150 mil a US\$175 mil por km (considerando trincheiras

abertas e não incluindo os custos de desapropriação/servidão de uso). Os custos de O&M anuais são de cerca de US\$100 a US\$150 por m³/h de biogás (SCS ENGINEERS, 2011).

Quais as vantagens e desvantagens na implantação/operação de tecnologias de aproveitamento energético?

As tecnologias de tratamento térmico trazem, em geral, como vantagens a redução do volume e quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários, menor ocupação de áreas, redução da emissão de gás metano, eliminação de percolados (chorume) nos resíduos processados implicando em menor probabilidade de contaminação de solos e águas subterrâneas.

Todas as tecnologias de aproveitamento energético apresentadas trazem como vantagem a possibilidade de obtenção de créditos de carbono pelo MDL, mas assim como os aterros sanitários, também trazem riscos de impactos ambientais negativos, caso não sejam devidamente operadas e mantidas.

Apresentam-se no Quadro 3 as vantagens e desvantagens de algumas tecnologias usuais de aproveitamento energético de resíduos.

Quadro 3 - Vantagens e desvantagens de algumas das tecnologias usuais de aproveitamento energético de resíduos.

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Incineração	<ul style="list-style-type: none"> - redução do volume e massa dos resíduos; - destruição completa da maioria dos resíduos orgânicos perigosos; - recuperação de energia (elétrica e/ou vapor d'água), que pode permitir a redução de custos operacionais. 	<ul style="list-style-type: none"> - custo elevado de implantação e operação, devido principalmente aos controles ambientais; - necessidade de mão de obra qualificada; - maiores receios da sociedade de riscos à saúde devido às emissões de dioxinas, em relação às outras tecnologias.
Pirólise	<ul style="list-style-type: none"> - possibilidade de modularidade das plantas industriais conforme demandas locais; - desvinculação da produção de eletricidade, pois combustíveis resultantes podem ser transportados até as centrais termelétricas; - menor emissão de poluentes atmosféricos, em relação à incineração; - redução do volume de resíduos a ser disposto (cerca de 95%)⁽¹⁾; - possibilidade de utilização de combustível auxiliar de baixo custo (como biomassa ou biogás); - sistema de alimentação automático (contínua) ou semiautomático (em batelada)⁽¹⁾; - presença de queimadores auxiliares⁽¹⁾. 	<ul style="list-style-type: none"> - heterogeneidade dos RSU dificulta o controle de variáveis operacionais; - tecnologia não consolidada em escala comercial; - processo mais lento que a incineração e com maior consumo de combustível auxiliar; - elevado custo operacional e de manutenção⁽¹⁾; - constante trabalho de limpeza no sistema de alimentação de combustível auxiliar (exceto para gás natural)⁽¹⁾; - elevado custo de tratamento dos efluentes gasosos e líquidos⁽¹⁾.

Quadro 3 - Vantagens e desvantagens de algumas das tecnologias usuais de aproveitamento energético de resíduos (continuação).

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Gaseificação	<ul style="list-style-type: none"> - as cinzas e o carbono residual permanecem no gaseificador, diminuindo assim a emissão de particulados; - alta eficiência térmica, variando de 60% a 90%, conforme o sistema implementado; - associada a catalisadores, como alumínio e zinco, a gaseificação aumenta a produção de H₂ e CO (gás combustível) e diminui a produção de CO₂; - a taxa de gaseificação pode ser facilmente monitorada e controlada. 	<ul style="list-style-type: none"> - o resíduo deve estar limpo, sem a presença, por exemplo, de terras; - potencial de fusão das cinzas a temperaturas acima de 900 °C, que pode aumentar corrosão no equipamento; - o alcatrão formado durante o processo de gaseificação, se não completamente queimado, pode limitar as aplicações do <i>syngas</i>.
Plasma	<ul style="list-style-type: none"> - a elevada temperatura do processo causa rápida e completa pirólise da substância orgânica, permitindo fundir e vitrificar certos resíduos inorgânicos, tornando-os similares a um mineral de alta dureza; - elevada redução de volume dos resíduos, podendo ser superior a 99%. 	<ul style="list-style-type: none"> - elevado custo de investimento; - elevado consumo energético; - como a incineração, exige sofisticados sistemas de controle das emissões atmosféricas.
Biogás de Aterro	<ul style="list-style-type: none"> - utilização de recurso energético de geração natural; - custos de implantação reduzidos se comparados às tecnologias de tratamento térmico e de biometanização; - modularidade das plantas industriais conforme acréscimo ou decréscimo da geração do biogás; - menor emissão de poluentes atmosféricos, em relação à incineração; - tecnologia consolidada em escala comercial. 	<ul style="list-style-type: none"> - os aterros sanitários ocupam áreas significativas, requerendo controle ambiental e restrições de uso após o encerramento de suas atividades (passivo ambiental); - o biogás é gerado apenas pela matéria orgânica biodegradável presente nos RSU; - a produção de biogás é variável em função do volume e idade dos RSU depositados; - menor produção de energia, em relação às tecnologias de tratamento térmico e da biometanização, por tonelada de RSU.

Fonte: Elaboração própria.

Quais são as orientações básicas quanto à escolha do local do empreendimento?

Na escolha do local de qualquer empreendimento devem ser observados os aspectos técnicos relativos à infraestrutura, logística de transporte dos RSU e respeito às áreas com impedimentos ambientais. Entre estes cabem destacar:

- zoneamento municipal e urbano;
- localização preferencial em área/distrito industrial (para aproveitamento direto do vapor residual ou mesmo do biogás gerado);
- vias de acesso e implicações no trânsito devido aos veículos de transporte, principalmente dos RSU;
- Implicações que seriam decorrentes caso necessária desapropriação de áreas;
- existência de subestação que atenda à energia elétrica a ser transmitida (para economia na implantação dos sistemas de transmissão);
- disponibilidade de água;
- facilidade de obtenção de mão de obra especializada;
- distâncias econômicas das sedes municipais às estações de transbordo e destas às plantas de incineração ou aterros sanitários;

- existência de aterro sanitário e industrial em distância econômica (para destinação final de rejeitos e RSU em eventuais paradas das unidades);
- não comprometimento ambiental quanto a unidades de conservação (UCs), áreas de proteção ambiental (APPs), espécies endêmicas da fauna e flora e ambientes de relevância ambiental.

Cabe ressaltar que, sendo a matéria-prima os RSU, haverá sempre a necessidade do planejamento de aterro sanitário para recebimento destes em ocasiões que não possam ser processados no empreendimento, como em manutenções preventivas ou corretivas da unidade de tratamento térmico que se estendam por períodos superiores à capacidade de armazenamento da área de recebimento de resíduos.

Quais são as orientações básicas quanto à escolha de uma das tecnologias de aproveitamento energético de biogás de aterros por parte das Prefeituras?

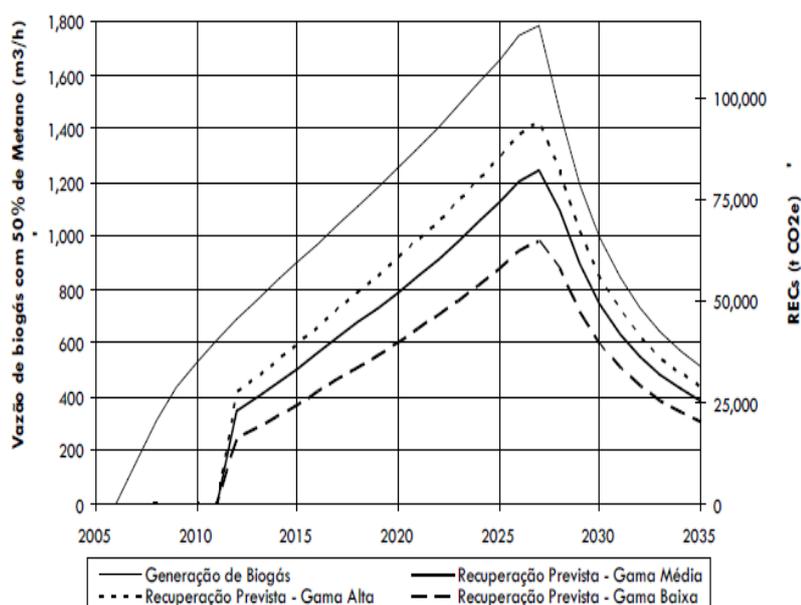
O aproveitamento energético do biogás, ou sua queima controlada visando à obtenção de créditos de carbono, requer a prévia identificação do potencial de geração de biogás no aterro sanitário.

Para a determinação do potencial de geração de gases de um aterro de RSU existem formulações teóricas e experimentais. As formulações experimentais consideram as medições reais dos gases gerados. Os resultados das formulações experimentais são mais precisos, porém de determinação muito mais difícil, demorada e custosa. As formulações teóricas são utilizadas para descrever a produtividade do biogás em função do tempo. No Brasil, não existe metodologia desenvolvida para este assunto levando-se em conta as peculiaridades locais, entre as quais: composição dos resíduos, clima e operação do aterro. As estimativas de geração de gases no Brasil ainda são feitas indiretamente, baseadas em modelos matemáticos e parâmetros obtidos de aterros sanitários europeus ou norte-americanos. Em geral, estes parâmetros não refletem adequadamente as condições de biodegradabilidade dos resíduos locais devido às diferenças climáticas e de projeto, operação e manutenção dos aterros. Portanto, tais estimativas podem estar sujeitas a grande variabilidade (JUCÁ, 2005).

Dados de testes de bombeamento de biogás podem ser usados em conjunto com a modelagem para demonstrar as atuais qualidade e quantidade de biogás, bem como para apoiar projeções futuras do recurso.

Dentre as diversas metodologias utilizadas para a identificação do potencial de geração de biogás de aterro destacam-se: IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change* ou Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas); UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change* ou Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática); e USEPA — modelo de Emissões de Gás de Aterros Sanitários - LandGEM.

Em estudo realizado no aterro sanitário de Uberaba utilizou-se o modelo de previsão de geração e recuperação de biogás desenvolvido por SCS Engineers. Este modelo é semelhante ao LandGEM.



Dados, referentes ao município e aterro de Uberaba, utilizados pelo modelo:

- População: 296.300 habitantes (estimativa);
- Taxa de geração de lixo: 0,8 kg/habitante/dia;
- Vida útil do aterro sanitário: 2005/2026;
- Volume anual de lixo depositado no aterro: 72.000 t (em 2010);
- Capacidade final do aterro: 2.071.000 t.

Figura 21 - Curvas de projeção de geração e recuperação de biogás do aterro sanitário de Uberaba/MG. Fonte: SCS Engineers (2011).

A curva superior da Figura 21 representa a vazão gerada de biogás prevista ao longo do tempo e as demais, na sequência decrescente, a recuperação do biogás considerando três cenários distintos de eficiência de coleta — recuperação alta (60% em 2012 e um máximo de 85% em 2028, após o encerramento e conclusão da cobertura final do aterro), média (50% e 75%, respectivamente) e baixa (35% e 60%).

6. CONSÓRCIOS INTERMUNICIPAIS PARA VIABILIDADE DE PROJETO

O que são consórcios intermunicipais de gestão de resíduos sólidos?

São associações entre municípios de um mesmo estado ou de mais de um estado para execução e gestão de programas e serviços comuns, regulamentadas em lei e respeitadas a autonomia de cada ente envolvido. Um dos objetivos dos consórcios é viabilizar a gestão pública nos espaços metropolitanos em que a solução de problemas comuns pode ser dada somente por meio de políticas e ações conjuntas. O consórcio também permite que pequenos municípios ajam em parceria e, com o ganho de escala, melhorem a capacidade técnica, gerencial e financeira.

Deverão ser constituídas e reguladas por contrato de programa, como condição de sua validade, as obrigações que um ente da Federação constituir para com outro ente da Federação ou para com consórcio público no âmbito de gestão associada em que haja a prestação de serviços públicos ou a transferência total ou parcial de encargos, serviços, pessoal ou de bens necessários à continuidade dos serviços transferidos. Dessa forma, pode-se afirmar que a gestão associada de serviços públicos não requer, necessariamente, a formação de um consórcio público.

Quais as exigências, vantagens e desvantagens de formação destes consórcios intermunicipais?

O consórcio público pode ser constituído por contrato, dependendo de prévia subscrição de protocolo de intenções, sendo necessárias para tal:

- a denominação, a finalidade, o prazo de duração e a sede do consórcio;
- a identificação dos entes consorciados;
- a indicação da área de atuação do consórcio;
- a previsão de que o consórcio é associação pública ou pessoa jurídica de direito privado sem fins econômicos;
- os critérios para, em assuntos de interesse comum, autorizar o consórcio a representar os entes consorciados perante outras esferas do governo;
- as normas de convocação e funcionamento da assembleia geral, inclusive para a elaboração, aprovação e modificação dos estatutos do consórcio;

- a previsão de que a assembleia geral é a instância máxima do consórcio público e o número de votos para as suas deliberações;
- a forma de eleição e a duração do mandato do representante legal do consórcio público que, obrigatoriamente, deverá ser chefe do poder executivo de ente da federação consorciado;
- o número, as formas de provimento e a remuneração dos empregados públicos, bem como os casos de contratação por tempo determinado para atender à necessidade temporária de excepcional interesse público;
- as condições para que o consórcio público celebre contrato de gestão ou termo de parceria;
- a autorização para a gestão associada de serviços públicos;
- o direito de qualquer dos contratantes, quando adimplente com suas obrigações, exigir o pleno cumprimento das cláusulas do contrato de consórcio público.

Entre as principais vantagens da formação de consórcios, tem-se:

- ganhos de escala, pois quanto maior a população atendida, menores são os custos de manutenção da estrutura que presta esses serviços;
- maior facilidade encontrada na captação de recursos, tendo em vista que os consórcios, por representarem sempre grupos de municípios, são vistos como prioridades pelas fontes de recurso; e
- ampliação das receitas, visto que, no caso de consórcios intermunicipais de gestão de resíduos sólidos, há possibilidade de obtenção de recursos a partir dos produtos resultantes da reciclagem e da compostagem, assim como do repasse de ICMS ecológico.

Como desvantagens, tem-se que os agentes públicos incumbidos da gestão de consórcio não respondem pessoalmente pelas obrigações contraídas pelo consórcio público, mas respondem pelos atos praticados em desconformidade com a lei ou com as disposições dos respectivos estatutos. Além disso, o representante legal do consórcio público obrigatoriamente deverá ser Chefe do Poder Executivo de ente da Federação consorciada.

De quem serão os direitos sobre os produtos gerados?

Os bens, direitos, encargos e obrigações decorrentes da gestão associada de serviços públicos custeados por tarifas ou outra espécie de preço público serão atribuídos aos titulares dos respectivos serviços.

Onde buscar orientação governamental?

A Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional e Política Urbana (SEDRU) tem prestado serviço gratuito de assessoria aos municípios mineiros no processo de constituição de consórcios intermunicipais conforme a Lei Federal n. 11.107/2005. O auxílio é dado em três fases de estruturação de consórcios: estruturação jurídica, assistência técnica e captação de recursos.

Cabe destacar que a estruturação jurídica compreende:

- a) estudo preliminar de viabilidade do consórcio;
- b) elaboração do protocolo de intenções;
- c) elaboração do contrato de programa;
- d) elaboração do contrato de rateio;
- e) registro em cartório (caso pessoa jurídica de direito privado) ou acompanhamento na câmara municipal (caso pessoa jurídica de direito público).

No Anexo 5 apresenta-se uma orientação complementar sobre as normas aplicáveis aos consórcios intermunicipais, licitações, contratos e outros assuntos correlatos.

7. PROCEDIMENTOS PARA REGULARIZAÇÃO AMBIENTAL

Como é o processo de licenciamento dessas atividades no estado de Minas Gerais?

A Deliberação Normativa COPAM n. 74/2004 é a norma legal que regulamenta o licenciamento ambiental no estado de Minas Gerais e estabelece critérios para a classificação dos empreendimentos e atividades em conformidade com o porte e potencial poluidor; a conjugação destas duas variáveis determina a classe do empreendimento, conforme esquematizado na Figura 22.

		PEQUENO	MÉDIO	GRANDE
P O R T E	PEQUENO	CLASSE 1	CLASSE 1	CLASSE 3
	MÉDIO	CLASSE 2	CLASSE 3	CLASSE 5
	GRANDE	CLASSE 4	CLASSE 5	CLASSE 6

→ POTENCIAL POLUIDOR

Figura 22 - Determinação da classe do empreendimento conforme Deliberação Normativa COPAM n. 74/2004.
Fonte: Adaptado de DN COPAM n. 74/2004.

A regularização ambiental das atividades e empreendimentos enquadrados nas classes 1 e 2 é realizada mediante a obtenção da Autorização Ambiental de Funcionamento (AAF), e para as classes 3 a 6 pelo processo de licenciamento ambiental, com o requerimento das licenças Prévia (LP), de Instalação (LI) e de Operação (LO). A AAF pode ser solicitada em qualquer fase, mas só é expedida quando o empreendimento já estiver instalado e apto a iniciar suas atividades. Para as classes 3 e 4 é permitida a obtenção concomitante da LP e LI.

O certificado de regularização ambiental deve ser periodicamente renovado, com antecedência de 90 dias do vencimento de sua validade (Quadro 4) e sua manutenção pressupõe o cumprimento permanente de diversas exigências legais e normativas, explícitas ou implícitas na licença ambiental ou na AAF.

Quadro 4 - Prazo de validade dos certificados de regularização ambiental.

Prazo de validade certificados de regularização ambiental	Anos
Licença Prévia (LP)	Até 4
Licença de Instalação (LI)	até 6
Licença de Operação (LO)	6 (classes 3 e 4)* 4 (classes 5 e 6)*
Autorização Ambiental de Funcionamento (AAF)	4*

(*) terá acréscimo de 1 ano caso apresente certificação de Sistema de Gestão Ambiental nos termos da ABNT NBR ISO 14001 ou redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) definido nos termos do Programa de Registro Público de Emissões de GEE de Minas Gerais.

Fonte: Adaptado de DN COPAM n. 17/1996, n. 77/2004, n. 121/2008 e n. 160/2010.

O Quadro 5 descreve algumas das atividades listadas neste Guia passíveis de licenciamento e sua respectiva classificação.

Quadro 5 - Porte e potencial poluidor na Deliberação Normativa COPAM n. 74/2004 aplicáveis às atividades apresentadas neste Guia.

Atividade	Código	Porte/Potencial poluidor	Potencial Poluidor Geral
Produção de biogás	C-04-05-7	600 < Capacidade de produção < 3.000 Nm ³ /dia: Pequeno 3.000 < Capacidade de produção <= 20.000 Nm ³ /dia: Médio Capacidade de produção > 20.000 Nm ³ /dia: Grande	Médio
Produção de energia termoelétrica	E-02-02-1	Capacidade instalada ≤ 10 MW: Pequeno Capacidade instalada > 100 MW: Grande Os demais: Médio	Grande
Tratamento e/ou disposição final de resíduos sólidos urbanos	E-03-07-7	Quantidade operada < 15 t/dia: Pequeno Quantidade operada > 250 t/dia: Grande Os demais: Médio	Grande
Incineração de resíduos	F-05-13-4	Capacidade instalada < 0,5 t/h: Pequeno Capacidade instalada > 2,0 t/h: Grande Os demais: Médio	Grande
Coprocessamento de resíduos em forno de clínquer	F-05-14-2	Capacidade do forno de clínquer < 200.000 t/ano: Pequeno Capacidade do forno de clínquer > 1.000.000 t/ano: Grande Os demais: Médio	Grande
Outras formas de tratamento ou de disposição de resíduos não listadas ou não classificadas	F-05-15-0	Área útil < 1 ha e Número de empregados < 20: Pequeno Área útil > 5 ha e Número de empregados > 100: Grande Os demais: Médio	Grande

Fonte: Adaptado de DN COPAM n. 74/2004.

Conforme a Deliberação Normativa COPAM n. 102/2006, os convênios do Estado com os municípios são realizados para o licenciamento ambiental ou a autorização ambiental de funcionamento de

empreendimentos e atividades classificadas nas classes 1 a 4, permanecendo sob a competência estadual quando os impactos ambientais diretos ultrapassem seus respectivos limites territoriais.

Atualmente, os seguintes municípios estão conveniados com o estado de Minas Gerais para procederem à regularização de empreendimentos e atividades de impacto ambiental local: Contagem, Betim, Juiz de Fora e Ibirité. Referente ao município de Belo Horizonte, a concessão é extensiva a todas as classes, uma vez que sua delegação de competência é anterior às Deliberações que regulamentaram a matéria.

As licenças concedidas pelos municípios são reconhecidas também, para efeito da concessão pelo Estado, de ICMS Ecológico.

No sitio eletrônico da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável — SEMAD (<http://www.semاد.mg.gov.br/regularizacao-ambiental>) encontram-se mais orientações sobre os passos a serem seguidos para se proceder à regularização ambiental de uma atividade ou empreendimento.

Existe legislação específica para alguma dessas tecnologias?

Existem normas específicas para as tecnologias de tratamento térmico e coprocessamento de resíduos, bem como normas gerais referentes a efluentes líquidos, qualidade de corpos d'água, águas subterrâneas, efluentes atmosféricos, odores, qualidade do ar, resíduos sólidos e ruído ambiental.

Em situações em que a norma estadual for menos restritiva deve-se adotar a norma nacional, podendo o Órgão Ambiental competente, mediante decisão fundamentada, estabelecer padrões ainda mais restritivos e adotar inclusive legislação internacional.

a) Tratamento térmico de resíduos

No Brasil, os procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, cuja operação seja realizada acima da temperatura mínima de 800 °C, são regulamentados pela Resolução CONAMA n. 316/2002.

Entre os procedimentos está o cronograma de implementação de um programa de segregação de resíduos (Quadro 6), inserido nos planos municipais de gerenciamento de resíduos, em ação integrada com os

responsáveis pelo sistema de coleta e de tratamento térmico, para fins de reciclagem ou reaproveitamento.

Quadro 6 - Cronograma de metas do programa de segregação de resíduos, a partir da concessão da licença de operação do sistema de coleta e de tratamento térmico.

Biênio	Percentual a ser segregado do resíduo gerado na área de abrangência do sistema (%)
primeiro	6
segundo	12
terceiro	18
quarto	24
quinto	30

Fonte: Adaptado de Resolução CONAMA n. 316/2002.

Assim, deverá(ão) existir unidade(s) de coleta seletiva ou de triagem, dentro ou fora da área da usina, sendo que o percentual de segregação indicado pela Resolução CONAMA n. 316/2002 se aplica sobre a quantidade de RSU a ser recebida do(s) respectivo(s) município(s).

Ressalta-se que as políticas estadual e nacional de resíduos sólidos incentivam a reciclagem e a reutilização de resíduos, entretanto, não especificam em que percentual como o faz a referida Resolução CONAMA.

Em Minas Gerais, os Termos de Referência para a regularização ambiental de “Sistema de Tratamento Térmico de Resíduos Sólidos Urbanos com Geração de Energia Elétrica” adotam os critérios e os padrões de emissão de efluentes atmosféricos da União Europeia, previstos na Diretiva 2000/76/CE, por serem mais restritivos e por atenderem às condições mínimas das instalações de tratamento térmico previstas na Resolução CONAMA n. 316/2002.

b) Coprocessamento em fornos de clínquer

O coprocessamento de resíduos no estado de Minas Gerais iniciou-se em 1990, tendo sido normatizado pela primeira vez em 1998, com a Deliberação Normativa COPAM n. 026. Em nível federal foi publicada, em 1999, a Resolução CONAMA n. 264, referente ao licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos, excetuando-se os resíduos domiciliares brutos, de serviços de saúde, radioativos, explosivos, organoclorados, agrotóxicos e afins, além de estabelecer limites de emissões para material particulado e poluentes. A Resolução CONAMA n. 316/2002, referente ao tratamento térmico de resíduos, complementa a Resolução CONAMA n. 264/1999, ao estabelecer limites de emissões de dioxinas e furanos no coprocessamento (FEAM, 2010).

Em 25 de agosto de 2010, foi publicada a Deliberação Normativa n. 154, que regulamenta o coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. Essa deliberação estabelece procedimentos, parâmetros e padrões para a realização do coprocessamento, e introduz a possibilidade de se coprocessar resíduos domiciliares após pré-tratamento ou tratamento e desde que seu poder calorífico inferior seja de, no mínimo, 1.500 kcal/kg (FEAM, 2010).

c) Efluentes líquidos e enquadramento de corpos d'água

Os padrões de lançamento de efluentes líquidos e de **enquadramento** da qualidade de corpos d'água estão contemplados na Resolução CONAMA n. 357/2005 (com alterações pela Resolução CONAMA n. 397/2008) e na Deliberação Normativa COPAM-CERH n. 01/2008.

Cabe destacar da Resolução CONAMA n. 357/2005 e da DN COPAM CERH n. 01/2008:

O **enquadramento** de um corpo de água expressa não necessariamente sua condição atual, mas metas finais a serem alcançadas para os níveis de qualidade desejados visando aos usos pretendidos pela sociedade. Este enquadramento visa ao estabelecimento da meta ou objetivo de qualidade da água (Classe) a ser, obrigatoriamente, alcançado ou mantido em um aquífero, conjunto de aquíferos ou porção desses, de acordo com os usos preponderantes pretendidos, ao longo do tempo.

- é vedado, nos efluentes, o lançamento dos Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) mencionados na Convenção de Estocolmo. Nos processos onde possa ocorrer a formação de dioxinas e furanos deverá ser utilizada a melhor tecnologia disponível para a sua redução, até a completa eliminação;
- a disposição de efluentes no solo, mesmo tratados, não poderá causar poluição ou contaminação das águas;
- na hipótese de fonte de poluição geradora de diferentes efluentes ou lançamentos individualizados, os limites constantes nestas normas aplicar-se-ão a cada um deles ou ao conjunto após a mistura, a critério do Órgão Ambiental competente;
- não se deve efetuar, em circunstância alguma, a diluição de águas residuais para efeito de observância dos valores-limite de lançamento.

A DN COPAM-CERH n. 01/2008, em relação à CONAMA, é mais restritiva para a faixa de variação de pH e os parâmetros inorgânicos de As, Cd, Pb e Ni, e menos restritiva para os parâmetros cromo hexavalente e cianeto total; além disso, estabelece parâmetros de lançamento para Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), substâncias tenso ativas e sólidos em suspensão totais.

Ressalta-se que em Minas Gerais, seguindo orientação da Resolução CONAMA n. 357/2005, a qualidade dos ambientes aquáticos futuramente também será avaliada por indicadores biológicos, utilizando-se comunidades aquáticas, com critérios a serem definidos por deliberação conjunta do COPAM e CERH-MG.

d) Águas subterrâneas

A Resolução CONAMA n. 396/2008 dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas dos aquíferos.

Não admitindo a alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, os aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, podem ser enquadrados como especial — destinados à preservação de ecossistemas em unidade de conservação de proteção integral e as que contribuam diretamente para os trechos de corpos d'água superficiais enquadrados como classe especial — ou nas classes 1 e 2, dependendo da necessidade de tratamento devido suas características hidrogeoquímicas naturais. E para aqueles com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, podem ser enquadrados nas classes 3 a 5.

Apesar de esta norma estar em vigor, ainda não existem estudos em Minas Gerais que estabeleçam tais enquadramentos.

e) Efluentes atmosféricos

Os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para **fontes fixas** estão estabelecidos na Resolução CONAMA n. 386/2002, por poluente e tipologias de fontes.

Referente às tecnologias apresentadas neste Guia, há padrões de emissão estabelecidos para:

- combustão externa (como caldeiras e fornos): óleos combustíveis (MP, NO_x e SO_x), gás natural (NO_x) e derivados de madeira (MP, NO_x e CO);
- combustão interna em turbinas a gás: gás natural (NO_x, CO, SO_x e MP).

Fonte fixa de emissão:

Qualquer instalação, equipamento ou processo, situado em local fixo, que libere ou emita matéria sólida, líquida ou gasosa para a atmosfera, por emissão pontual ou fugitiva.

Emissão fugitiva:

Lançamento difuso na atmosfera efetuado por uma fonte desprovida de dispositivo projetado para dirigir ou controlar seu fluxo.

Emissão pontual:

Fonte provida de dispositivo para dirigir ou controlar seu fluxo, como dutos e chaminés.

Para os motores de combustão interna ou turbinas a gás utilizando biogás, pode-se adotar, por similaridade ao gás natural, os padrões de emissão para turbinas a gás estabelecidos na Resolução CONAMA n. 382/2006 (CEMIG GT e FEAM, 2010) ou n. 436/2011.

Essas Resoluções CONAMA estabelecem, referente às indústrias de cimento Portland, padrões de emissão de MP e NO_x para os fornos de clínquer (que não realizam coprocessamento), resfriadores, moinhos de cimento, secadores de escória e areia e as ensacadeiras.

Permanecem ainda aplicáveis os critérios e limites estabelecidos na Resolução CONAMA n. 008/1990, para os processos de geração de calor, por combustão externa, não abrangidos pela Resolução CONAMA n. 382/2006 ou n. 436/2011, ou não contemplados em legislações específicas.

f) Qualidade do ar

Conforme Resolução CONAMA n. 005/1989, a estratégia básica do Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar - PRONAR é limitar, em nível nacional, as emissões por tipologia de fontes e poluentes prioritários, reservando o uso dos **padrões de qualidade do ar** como ação complementar de controle. Para a implementação de uma política de não deterioração significativa da qualidade do ar em todo o território nacional, suas áreas serão enquadradas de acordo com a seguinte classificação de usos pretendidos:

Padrões de qualidade do ar:

Primário: são as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população.

Secundário: são as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

- Classe I: Áreas de preservação, lazer e turismo, tais como Parques Nacionais e Estaduais, Reservas e Estações Ecológicas, Estâncias Hidrominerais e Hidrotermais. Nestas áreas deverá ser mantida a qualidade do ar em nível o mais próximo possível do verificado sem a intervenção antropogênica.
- Classe II: Áreas onde o nível de deterioração da qualidade do ar seja limitado pelo **padrão secundário de qualidade**.
- Classe III: Áreas de desenvolvimento onde o nível de deterioração da qualidade do ar seja limitado pelo **padrão primário de qualidade**.

No estado de Minas Gerais, como ainda não foram definidas as áreas de Classes I, II e III, são adotados os padrões primários de qualidade do ar estabelecidos na Resolução CONAMA n. 003/1990, conforme determinado por essa Resolução.

A Resolução CONAMA n. 008/1990, por sua vez, estabelece que cabe aos órgãos estaduais de meio ambiente propor aos governos de seus respectivos estados o enquadramento de suas áreas Classe I e III, conforme já previsto na Resolução CONAMA n. 005/1989 e Resolução CONAMA n. 003/1990. As demais áreas não definidas como Classes I e III são consideradas Classe II, conforme Resolução CONAMA n. 005/1989.

No estado de Minas Gerais a Deliberação Normativa COPAM n. 01/1981 fixa normas e padrões para a qualidade do ar. Como ainda não foram definidas as classes das áreas, adotam-se os padrões primários de qualidade do ar estabelecidos na Resolução CONAMA n. 003/1990, conforme já enfatizado.

g) Emissões odoríferas

No estado de Minas Gerais, o artigo 6º da Deliberação Normativa COPAM n. 11/1986 especifica as fontes que deverão ter suas substâncias odoríferas incineradas em pós-queimadores, operando a uma temperatura mínima de 750 °C, em tempo de residência mínimo de 0,5 segundos, ou por outro sistema de controle de poluentes, de eficiência igual ou superior; porém, entre elas não estão listadas as fontes das tecnologias em estudo.

A intensidade percebida de um odor é relativa à força do odor acima do limite de reconhecimento (supralimite). Entretanto, não há padrões na legislação ambiental nacional que estabeleça esse limite. A percepção dos odores pela comunidade de entorno deve ser considerada pelo Órgão Ambiental como um instrumento de avaliação da eficiência dos sistemas de controle implantados.

Ainda não tem sido uma prática no estado de Minas Gerais a utilização da norma ASTM E544-75, “Prática padrão para referência supralimite de intensidade de odor”, que apresenta dois métodos referenciando a intensidade de ambientes com odor: Procedimento A - Método da escala dinâmica e Procedimento B - Método da escala estática. Em resumo, tais métodos podem ser assim descritos (SCHIRMER, 2007):

- o método da escala dinâmica utiliza um olfatômetro, dispositivo com fluxo contínuo de um odorante contínuo padrão (butanol) para apresentação a um júri. O júri compara a intensidade observada de uma amostra de odor a um nível de concentração específico do odor padrão do dispositivo do olfatômetro. A intensidade é usualmente representada usando uma categoria de escala subjetiva (como fraca/moderada/forte) por magnitude estimada subjetiva (exemplo: odor a é duas vezes tão forte quanto o odor b) ou por referência a um odor específico, do qual a concentração é ajustada até que os odores de referência e do teste tiverem a mesma intensidade percebida;

- o método da escala estática (método do butanol) permite comparar a amostra a ser analisada com amostras de referenciais de odores. Utiliza uma escala de referência, com concentrações diferentes e conhecidas de soluções em água ou diluídas em ar inodoro. Essa prática compara a intensidade de odor da fonte com a intensidade de uma série de concentrações de referência odorante, que neste caso é o n-butanol.

h) Resíduos sólidos

No estado de Minas Gerais, a Deliberação Normativa COPAM n. 07/1981 proíbe:

- depositar, dispor, descarregar, enterrar, infiltrar ou acumular no solo resíduos de qualquer natureza, salvo se houver projeto específico de transporte e de disposição final aprovados pelo Órgão Ambiental do Estado;
- a acumulação temporária de resíduos de qualquer natureza, na área de propriedade da fonte de poluição ou em outros locais, desde que ofereça riscos de poluição ambiental.

A Lei n. 18.031/2009, vigente no estado de Minas, reitera as proibições de disposição inadequada de resíduos e a responsabilidade dos geradores pela gestão dos mesmos.

Antes da determinação das vias de eliminação ou reciclagem dos produtos residuais devem ser efetuados ensaios adequados para definir as características físicas e químicas e o potencial poluente dos diferentes produtos residuais.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas define como resíduos sólidos os resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004).

Essa definição é regulamentada pela norma ABNT NBR 10.004, que ainda classifica os resíduos sólidos nos seguintes grupos (ABNT, 2004):

- Resíduos perigosos (classe I) – são aqueles que apresentam periculosidade ou constem nos anexos A e B desta norma ou apresentem uma das seguintes características: inflamabilidade; corrosividade; reatividade; toxicidade e patogenicidade.
- Resíduos não perigosos, não inertes (classe IIA) – são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I ou de resíduos classe IIB, nos termos dessa norma. Os resíduos classe IIA podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- Resíduos não perigosos, inertes (classe IIB) – são quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo norma ABNT NBR 10.007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme norma ABNT NBR 10.006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G dessa norma.

i) Uso de resíduos como fertilizantes e/ou corretivos de solo

Conforme o Decreto Federal n. 4.954/2004 compete ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) a inspeção e fiscalização da produção, importação, exportação e comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes, bem como estabelecer critérios, limites mínimos de garantias e demais especificações para registro dos produtos.

A nova Instrução Normativa SDA n. 25/2009 especifica as “Normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura”. Nesta redefine como Classe C os fertilizantes orgânicos que, em sua produção, utilizam qualquer quantidade de matéria-prima oriunda de lixo domiciliar, resultando em produto de utilização segura na agricultura.

Essa Instrução Normativa estabelece ainda que esses fertilizantes orgânicos somente poderão ser comercializados, para consumidores finais, mediante recomendação técnica firmada por engenheiro agrônomo ou engenheiro florestal, respeitada a área de competência.

Na Instrução Normativa SDA n. 27/2006 estão estabelecidos os “limites de agentes fitotóxicos, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas admitidas nos fertilizantes, corretivos, condicionadores de solo e substrato para plantas”. Caso o produto não atenda aos parâmetros agronômicos definidos para registro ou

aos limites estabelecidos nessa Instrução Normativa para contaminantes, poderá ser autorizado pelo MAPA o seu uso, desde que haja:

- a comprovação de eficiência agronômica;
- a manifestação do Órgão Ambiental;
- o atendimento aos limites máximos de contaminantes e às demais disposições previstas na Resolução CONAMA n. 375/2006 (lodo de esgoto).

Os lotes de lodo de esgoto e de produtos derivados, para o uso agrícola, devem respeitar os limites máximos de concentração especificados na Resolução CONAMA n. 375/2006.

Quanto aos processos para redução de **agentes patogênicos** e **atratividade de vetores**, deve-se obedecer à Resolução CONAMA n. 380/2006, que retifica o anexo I da Resolução CONAMA n. 375/2006.

Agentes patogênicos: agentes biológicos causadores de doenças aos seres humanos e animais. Incluem alguns grupos de vírus, bactérias, fungos, protozoários e helmintos.

Atratividade de vetores: característica de atrair roedores, insetos ou outros vetores de agentes patogênicos.

(CONAM, 2009)

j) Ruído ambiental

No estado de Minas Gerais, a Lei n. 10.100, de 17 de janeiro 1990, que dá nova redação ao artigo 2º da Lei Estadual n. 7.302/1978, dispõe sobre a proteção contra a poluição sonora, podendo ainda ser adotados critérios mais restritivos que estejam preconizados na legislação municipal.

Atendendo à Resolução CONAMA n. 001/1990, posterior à Lei Estadual n. 10.100, as medições de ruído deverão ser efetuadas de acordo com a NBR 10.151 da ABNT, a qual especifica inclusive os itens a serem apresentados no Relatório do ensaio.

A norma ABNT NBR 10.151:2000 Versão Corrigida: 2003 (Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento) fixa as condições exigíveis para avaliação da aceitabilidade do ruído em comunidades, independente da existência de reclamações.

8. OPORTUNIDADES DE IMPLEMENTAÇÃO DE MDL

O que é MDL?

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, definido pelo artigo 12 do Protocolo de Quioto, possui objetivo de auxiliar os países desenvolvidos, partes do anexo I do Protocolo, a atingirem suas metas de redução de emissões de GEE por meio de parcerias com países em desenvolvimento, partes não-anexo I. Através do MDL, projetos implantados em países em desenvolvimento que resultam em **reduções adicionais de emissões** de GEE e/ou aumento da remoção de CO₂ recebem certificados chamados de Reduções Certificadas de Emissões, também conhecidos como “créditos de carbono”. As reduções certificadas são vendidas para países desenvolvidos e utilizadas para cumprir parte de suas metas de redução.

As **reduções adicionais de emissões** são aquelas onde as emissões de gases de GEE resultantes de atividades antrópicas são reduzidas a níveis inferiores aos que teriam ocorrido na ausência do projeto de MDL, com a garantia da obtenção de resultado mensurável, real e de longo prazo.

O MDL é o único mecanismo do Protocolo de Quioto que admite participação voluntária de países em desenvolvimento, também chamados países anfitriões. Ele permite que países em desenvolvimento auxiliem os países desenvolvidos a atingirem suas metas de redução de emissões.

O cumprimento dos compromissos quantificados de redução ou limitação de emissões antrópicas de GEE firmados pelos países desenvolvidos (partes do anexo I) será verificado após o término do primeiro período de compromisso (2008 a 2012). Caso as metas estabelecidas por cada país para este período não sejam cumpridas, a diferença deverá ser compensada com a compra de créditos de carbono que poderão ser gerados por mecanismos especificados no Protocolo de Quioto, dentre os quais o MDL.

Como obter créditos de carbono com projetos de aproveitamento energético de RSU?

O aproveitamento energético de RSU é uma alternativa para obter créditos de carbono através da redução das emissões de GEE que seriam originadas na decomposição do lixo disposto em lixões ou aterros sem recuperação de metano e também por substituir a necessidade de geração de energia a partir de fontes fósseis. A localização da planta de aproveitamento energético também poderá influenciar na quantidade de

créditos de carbono gerada. Aquelas que apresentarem maior proximidade com os centros geradores de resíduos reduzirão as emissões do transporte de RSU.

As alternativas de geração de energia através de RSU que resultam em reduções adicionais de emissões de GEE são passíveis de gerar créditos de carbono, uma vez que aprovadas no âmbito do MDL. Cada uma das rotas tecnológicas apresenta eficiências individuais, portanto, em cada tecnologia a quantidade de lixo consumida evita certa quantidade de emissões (Tabela 18). No Brasil, a grande maioria dos projetos implantados utiliza o biogás de aterro como fonte geradora de energia.

Tabela 18 - Emissões evitadas por tecnologia.

	Gás do Lixo (GDL)	Incineração	Digestão acelerada (DRANCO)	Biomassa-energia-materiais (BEM)
t lixo / MWh	4,2	1,3	2,8	2,1
Emissão evitada pelo consumo do lixo (tCO ₂ eq/MWh)	5,41	1,50	3,61	0,55*
Emissão evitada pela substituição do gás natural (tCO ₂ eq/MWh)	0,449	0,449	0,449	0,449
Emissão evitada (tCO ₂ eq/MWh) total	5,87	1,95	4,06	1,0

* Só 20% da matéria-prima é transformada em celulignina.

Fonte: Tolmasquim (2003).

Os créditos de carbono originados no aproveitamento energético de RSU geram receitas que podem, muitas vezes, tornar o projeto de geração de energia economicamente viável. A receita gerada pela implementação do MDL é um incentivo para melhoria de tecnologias e para avançar na questão da gestão adequada de RSU em municípios brasileiros.

O processo de certificação de um projeto como MDL passa por uma série de etapas, que têm início na elaboração do Documento de Concepção de Projeto – DCP. Uma vez que o projeto é aprovado pela Autoridade Nacional Designada - AND¹⁰, e formalmente aceito pelo Conselho Executivo do MDL¹¹, inicia-se o monitoramento das emissões do projeto e posteriormente é feita a verificação e a certificação pela Entidade Operacional Designada - EOD¹². Após o cumprimento de todas as etapas, o Conselho Executivo emite os créditos de carbono.

¹⁰ **Autoridade Nacional Designada:** parte representativa do governo responsável por aprovar e autorizar os projetos de MDL verificando o caráter voluntário da participação das partes envolvidas e, no caso da parte anfitriã, que o projeto contribui para o desenvolvimento sustentável do país. No Brasil, a AND é a Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima (CIMGC). Site AND Brasileira: www.mdic.gov.br

¹¹ **Conselho Executivo do MDL:** órgão internacional independente ligado à ONU, composto por representantes de diversos países, seguindo uma proporção previamente combinada, que tem como função supervisionar o funcionamento do MDL incluindo a análise técnica dos projetos. Site Conselho Executivo do MDL: <http://cdm.unfccc.int/>

¹² **Entidade Operacional Designada:** entidade jurídica ou organização internacional creditada pela Organização das Nações Unidas - ONU - responsável pela realização de auditorias para comprovação de adequação da concepção do projeto de MDL com as diretrizes internacionais aplicadas.

Apresentam-se na Figura 23 as etapas que compõem o ciclo do projeto de MDL.

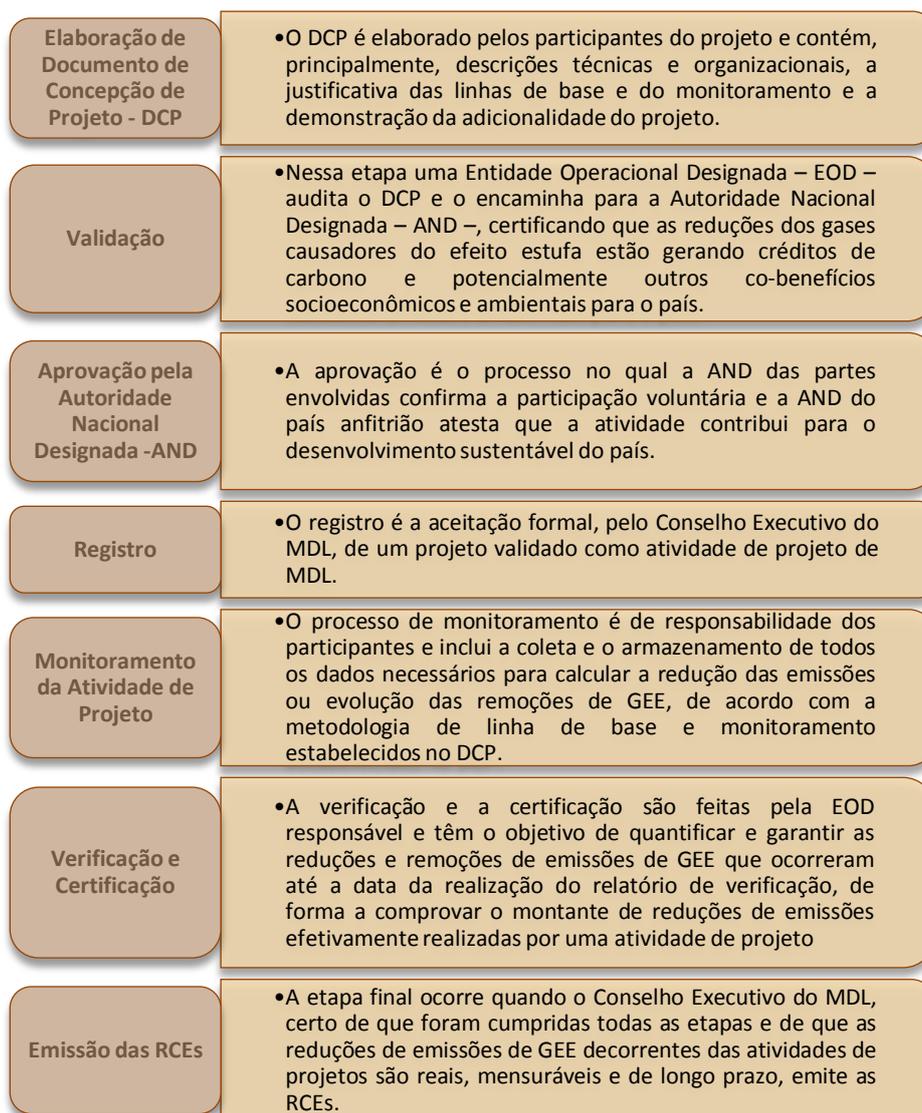


Figura 23 - Ciclo do projeto de MDL.

Fonte: Elaboração própria.

Os créditos de carbono gerados podem ser comercializados em mercados em linha com o Protocolo de Quioto ou em mercados “voluntários” (ou “Não-Quoto”). No primeiro caso, os créditos são negociados com o objetivo principal de facilitar o alcance das metas de redução de emissões estabelecidas no âmbito do Protocolo de Quioto. Já no segundo tipo de mercado, a negociação relaciona-se fundamentalmente ao alcance de metas estabelecidas voluntariamente por empresas ou governos locais, fora do Protocolo (FEAM, 2011).

Quais as metodologias de MDL existentes?

Existem metodologias de linhas de base e de monitoramento aprovadas no âmbito do MDL pelo Conselho Executivo para aproveitamento energético de RSU. Ao iniciar a elaboração de um projeto é importante identificar metodologias aplicáveis já existentes, com o objetivo de reduzir os custos e o tempo de elaboração do DCP. Nos casos em que nenhuma metodologia é aplicável para a atividade de projeto, pode-se solicitar ao Conselho Executivo o desvio de uma metodologia existente ou propor uma nova metodologia.

O desvio de metodologia de linha de base¹³ e/ou de monitoramento é uma pequena modificação de uma metodologia já aprovada, que ocorre em casos nos quais a aplicabilidade ou as características específicas não se encaixam na metodologia, mas conservam sua essência. A EOD deve buscar orientação junto ao Conselho Executivo sobre a possibilidade de aceitação do desvio. Nos casos em que nenhuma metodologia aprovada puder ser aplicada à atividade de projeto proposta, os participantes devem propor uma nova metodologia, que será submetida à análise do Painel de Metodologias¹⁴ e à aprovação do Conselho Executivo.

No Anexo 6 apresenta-se um resumo sobre as metodologias aplicáveis às atividades de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos.

¹³ **Linha de base:** cenário de emissões de gases de efeito estufa sem o projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL proposto.

¹⁴ **Painel de Metodologias:** responsável por desenvolver recomendações ao Conselho Executivo sobre diretrizes para metodologias de linha de base e de monitoramento já existentes e elaborar recomendações sobre propostas de novas.

9. LEVANTAMENTO DE DADOS MUNICIPAIS PARA SUBSÍDIO AOS ESTUDOS DE VIABILIDADE DE PROJETO

O que são estes estudos de viabilidade de projeto?

Os estudos de viabilidade de projetos de aproveitamento energético de RSU são Estudos de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA), com o objetivo de analisar, sob vários aspectos, se um projeto é realizável e qual é a melhor alternativa para executá-lo. Por meio do EVTEA realiza-se a análise técnica do projeto com o levantamento, coleta, observação, tratamento e análise de dados de natureza técnica, necessários à sua execução. Os processos são analisados para a definição de quais serão as alternativas tecnológicas mais adequadas para o projeto. Deve-se elaborar o anteprojeto, para reunir os estudos técnicos prévios (sondagem do terreno, cálculos, desenhos, disponibilidade de matéria-prima e mão de obra, estimativa de consumo de água e energia, entre outros) da alternativa escolhida.

Após os estudos técnicos, realiza-se a análise econômica das alternativas apresentadas. Ela estima o custo médio do projeto, através de um pré-orçamento, que tem como base para estimativa os anteprojeto e os estudos técnicos realizados. O nível de detalhamento das informações técnicas coletadas determinará a precisão do pré-orçamento. Porém, como os dados técnicos ainda não estão totalmente definidos, o pré-orçamento será diferenciado do orçamento definitivo. Com as informações técnicas e o custo médio do projeto estimado, o empreendedor poderá analisar qual é a alternativa mais viável econômica e tecnologicamente, que trará melhor custo-benefício para aquela atividade.

O estudo de viabilidade ambiental analisará as particularidades do projeto, avaliando os **impactos ambientais** e sociais que podem ocorrer com sua instalação, evitando futuros prejuízos. São identificadas limitações técnicas e restrições legais impostas pela legislação ambiental, prevendo se o processo resultará em impactos capazes de inviabilizar a aplicação do mesmo e evitando problemas com o licenciamento ambiental.

Impacto ambiental: qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: a saúde, a segurança e o bem-estar da população, as atividades sociais e econômicas, a biota, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos ambientais. (Resolução CONAMA n. 001/86)

A partir do fluxo de caixa, calculam-se indicadores de viabilidade, tais como: Taxa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Líquido (VPL) e relação entre o Benefício e o Custo (B/C), bem como se apresenta análise de

sensibilidade, na qual são trabalhados cenários distintos por meio da majoração dos custos estimados simultaneamente com a minoração dos benefícios esperados. O EVTEA identifica a alternativa técnica, ambiental e econômica mais viável, de modo justificado.

Será uma análise de **viabilidade econômica** quando a decisão de investir está baseada apenas na análise comparativa da quantidade de recursos entrantes e de saídas referentes ao custeio do empreendimento, resultando em um lucro. Será uma análise de **viabilidade financeira** quando a decisão de investir está baseada na disponibilização de recurso, com objetivo de se obter o equilíbrio das entradas e saídas, levando-se em conta os saldos a cada momento (fluxo de caixa). Caso o estudo contemple ambos, será uma análise de viabilidade econômico-financeira (BEZERRA DA SILVA, 1995 apud COSTA NETO, BRIM JÚNOR e AMORIM, 2003).

Está disponível no sitio eletrônico do Ministério de Planejamento, Orçamento e Gestão o roteiro de um modelo básico que este adota para a apresentação de **estudos de viabilidade técnica e socioeconômica** de projetos considerados de grande vulto.

Quais as principais informações que são afetas aos municípios que pretendem destinar RSU ao aproveitamento energético?

A seleção dos métodos de disposição/tratamento dos resíduos deve se basear na proteção do meio ambiente e custos relativos. A disposição/tratamento pode ser feita utilizando um método ou a combinação desses.

O estudo de viabilidade do projeto de uma usina de aproveitamento energético de resíduos necessitará de algumas informações específicas afetas aos prováveis municípios fornecedores da matéria-prima a ser processada (RSU):

- A população, o PIB, a renda *per capita* etc., e as respectivas projeções de crescimento no horizonte do projeto;
- a caracterização dos RSU gerados quanto à quantidade e características físicas e químicas.

De acordo com a norma ABNT NBR 10.004, os resíduos sólidos podem ser classificados fisicamente quanto à geração *per capita*, composição gravimétrica, peso específico aparente, teor de umidade e compressibilidade. Quanto às características químicas, devem ser avaliados composição química, poder

calorífico, pH e relação C/N. Já as características biológicas são determinadas pela população microbiana e dos agentes patogênicos presentes no lixo, de forma a permitir os adequados métodos de tratamento e disposição final. Apresenta-se no Anexo 7 maior detalhamento quanto às determinações físicas e químicas geralmente realizadas para a caracterização de RSU:

- definição se as Prefeituras arcarão com as despesas operacionais dos sistemas de coleta, estações de transbordo e o transporte dos RSU até a usina;
- definição se a área pretendida para instalação da usina e os serviços de terraplenagem serão doados pela Prefeitura Municipal;
- definição pelas prefeituras dos serviços públicos de tratamento de RSU e da duração de sua concessão que constarão no edital de licitação;
- definição pelas prefeituras da taxa máxima que está disposta a pagar para os serviços de aproveitamento energético de RSU;
- definição pelas prefeituras se constará em edital sua participação no percentual das receitas de venda de créditos de carbono e de subprodutos;
- definição dos tributos municipais a serem cobrados da usina e possíveis isenções ou reduções (como o ISSQN);
- “modelo de negócio” a ser acordado com a(s) prefeitura(s) para atendimento ao especificado na Resolução CONAMA n. 316/2002: “cronograma de implementação de um programa de segregação de resíduos, inserido nos planos municipais de gerenciamento de resíduos, em ação integrada com os responsáveis pelo sistema de coleta e de tratamento térmico, para fins de reciclagem ou reaproveitamento”;
- planos municipais de saneamento e de gestão de resíduos;
- Lei Orgânica;
- Lei de Uso e Ocupação do Solo.

No estudo de viabilidade para o aproveitamento energético de um aterro sanitário, a definição dos valores dos parâmetros que alimentam a modelagem de previsão de geração de biogás e a avaliação, inclusive de custos, dos possíveis usos desse recurso, necessita do aporte de informações relativas:

- aos aterros sanitários — aspectos construtivos e operacionais: marcos inicial e final de funcionamento, tamanho das áreas usadas para a disposição e total do aterro, profundidades máximas atuais e projetadas dos maciços, capacidade do aterro, taxas médias de disposição de resíduos no período de interesse, taxa de compactação dos resíduos depositados, impermeabilização da base, drenagem das águas pluviais, práticas para a coleta, o tratamento e controle de chorume, reciclagem de resíduos e compostagem;

- ao teor de umidade e a composição dos RSU — fator mais importante na determinação do potencial de geração de biogás;
- ao clima local.

10. INCENTIVOS PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Quais as instituições financeiras e programas (linhas de crédito)?

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento

BNDES Finem – Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos: projetos de investimentos, públicos ou privados, que contribuam para a universalização do acesso aos serviços de saneamento básico e à recuperação de áreas ambientalmente degradadas, a partir da gestão integrada dos recursos hídricos e da adoção de bacias hidrográficas como unidade básica de planejamento. A linha financia investimentos relacionados a: abastecimento de água, esgotamento sanitário, efluentes e resíduos industriais, resíduos sólidos, gestão e recursos hídricos, recuperação de áreas ambientalmente degradadas, desenvolvimento institucional, despoluição de bacias e macrodrenagem. O valor mínimo de investimento é de R\$ 10 milhões, com prazo determinado em função da capacidade de pagamento do empreendimento, empresa ou grupo econômico. Taxa de juros para apoio direto: custo financeiro (TJLP) + remuneração básica do BNDES (0,9% a.a.) + taxa de risco de crédito (3,7% a.a.). Taxa de juros para apoio indireto: custo financeiro (TJLP) + remuneração básica do BNDES (0,9% a.a.) + taxa de intermediação financeira (0,5% a.a.) + remuneração da instituição financeira credenciada. Sítio eletrônico: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/poio_Financeiro/Produtos/FINEM/saneamento.html>.

BNDES Finem – Linha Inovação Produção: apoio a investimentos que visem à implantação, expansão e modernização da capacidade produtiva, necessárias à absorção dos resultados do processo de pesquisa e desenvolvimento ou inovação; apoio à pesquisa e desenvolvimento ou inovação que apresentem oportunidade comprovada de mercado, inclusive o desenvolvimento de inovações de produtos e/ou processos. Podem ser financiados os seguintes itens: aquisição de máquinas e equipamentos nacionais novos, credenciados pelo BNDES; despesas com mão de obra direta relacionada ao projeto; aquisição de material de consumo e permanente utilizado no projeto; contratação de ensaios, testes, certificações, dentre outros, no país e no exterior, relacionados ao projeto; obras civis, montagens e instalações; softwares desenvolvidos no país e serviços correlatos; importação de equipamentos novos sem similar nacional necessários à realização do projeto; aquisição, transferência e absorção de tecnologia, desde que incorporadas ao projeto e exceto de empresas que integrem o mesmo grupo econômico a que o beneficiário pertença. Processo de trabalho que permite passar de uma escala de laboratório ou piloto de desenvolvimento, para uma escala ampliada de produção; despesas pré-operacionais e outras necessárias à introdução da inovação no mercado, limitadas a 30% do valor do apoio ao projeto; e despesas de internalização de máquinas e equipamentos importados. O valor mínimo de investimento é de R\$ 3 milhões, com prazo determinado em função da capacidade de pagamento do empreendimento, da empresa e do grupo econômico. Taxa de juros: custo financeiro (TJLP) + remuneração básica do BNDES (0,9% a.a.) + taxa de risco de crédito (até 3,57% a.a.). Sítio eletrônico: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Areas_de_Atualizacao/Inovacao/inovacao_producao.html>. **OBS:** Esta linha está sujeita prévia a avaliação por comitê técnico para confirmação da inovação proposta.

CEF - Caixa Econômica Federal

Programa de Desenvolvimento Urbano/Saneamento Ambiental - Resíduos sólidos urbanos: ação de apoio a sistemas públicos de manejo de resíduos sólidos em municípios com população superior a 50.000 habitantes (Censo 2000) ou municípios integrantes de regiões metropolitanas e Região Integrada de Desenvolvimento - RIDE, independente do porte populacional. Contempla intervenções que visam contribuir para proporcionar à população acesso aos serviços de limpeza urbana e destinação final adequada dos RSU, visando à salubridade ambiental, à eliminação de lixões e à inserção socioeconômica de catadores. Em qualquer modalidade, os projetos no âmbito desta ação deverão observar: compatibilidade com o Plano Municipal de Saneamento, com o Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, com o Plano Diretor Municipal ou equivalente ou com o Plano de Ação Estadual ou Regional, quando existentes; plena funcionalidade das obras/serviços propostos, trazendo benefícios à população; atendimento às normas de preservação ambiental nas áreas do projeto e entorno. Site eletrônico: <http://www1.caixa.gov.br/gov/gov_social/municipal/assistencia_tecnica/produtos/repasses/residuos_solidos_urbanos/saiba_mais.asp>.

Acordo para comercialização de Créditos de Carbono: a Caixa Econômica Federal e o Banco Mundial assinaram, em 5-12-2011, acordo de compra e venda de Emissões Reduzidas, junto ao fundo *Carbon Partnership Facility* (CPF), para negociar créditos de carbono no mercado global. Nessa ocasião, também foi assinado acordo de empréstimo de US\$ 50 milhões para aplicação em projetos de resíduos sólidos urbanos e financiamento de carbono. Pela parceria, além de disponibilizar recursos para redução dos principais impactos sociais e ambientais, a Caixa passa também a fomentar operações de financiamento, por meio das receitas de crédito de carbono, e estimular o segmento de Resíduos Sólidos Urbanos, já que, para se obter a garantia do crédito, será necessária a preparação e entrega de projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Site eletrônico: <http://www1.caixa.gov.br/imprensa/noticias/asp/popup_box.asp?codigo=6611292>.

BID – Banco Interamericano de Desenvolvimento

Cooperação Técnica (CT): tem por objetivo apoiar o governo brasileiro, por intermédio da SRHU/MMA, no processo de consolidação do marco legal e institucional necessário à implantação de consórcios públicos para a gestão de resíduos sólidos urbanos no país. Especificamente a CT apoiará a implementação de um projeto piloto de consórcio público visando à gestão integrada dos resíduos sólidos nos moldes da Lei de Consórcios e seu Decreto regulamentador, bem como na Lei de Saneamento Básico. Para alcançar este objetivo a CT está estruturada em dois componentes: **(a) Consolidação do marco legal e institucional dos consórcios públicos para a gestão de RSU** – este componente financiará consultorias para realizar estudos jurídicos, econômicos e administrativos necessários para apoiar a SRHU em sua estratégia de implementação da PNRS no tocante ao estabelecimento de uma ambiência adequada e favorável à implantação dos consórcios públicos; **(b) Capacitação dos agentes vinculados aos consórcios públicos para a gestão RSU** – este componente financiará a contratação de consultorias para disseminar as informações técnicas para gestão de RSU no Brasil e, em especial, para aqueles agentes que estejam envolvidos na constituição de consórcios públicos ou vinculados, direta ou indiretamente, com a gestão de RSU, além de atender aos agentes públicos envolvidos na gestão dos resíduos, de forma a potencializar o conhecimento e otimizar as informações entre os diversos atores vinculados ao tema; **(c) Projeto piloto para a implementação de consórcio público de resíduos sólidos** – com recursos desse componente serão contratados consultores que apoiarão a implantação de um consórcio público selecionado. Site eletrônico: <<http://www.iadb.org/pt/sobre-o-bid/financiamento-do-bid/cooperacao-tecnica,6042.html>>.

BDMG – Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais

Novo Somma Eco: programa voltado para a gestão sustentável de resíduos sólidos, que tem por finalidade apoiar projetos para a sua disposição adequada. Fornecem investimentos para implantação, ampliação, modernização ou recuperação, que contemplem: aquisição de veículos específicos para o acondicionamento, coleta, tratamento e destinação dos resíduos sólidos urbanos, condicionados à implantação do empreendimento financiado; sistemas de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos, incluindo unidades de triagem e compostagem (UTC); desativação, encerramento e recuperação ambiental de lixões e aterros controlados; unidades de transbordo e suas instalações complementares, não integrantes do sistema de coleta domiciliar de resíduos sólidos; urbanização do entorno e instalações de tratamento, destinação ou transbordo, quando incluídas como medidas mitigadoras de impactos; sistema de captura, coleta e incineração de gases de aterros sanitários, incluindo a biogeração de energia elétrica, no âmbito do MDL; aquisição de equipamentos novos destinados à operação de aterros sanitários e unidades de transbordo; elaboração de estudos, planos e projetos, particularmente o plano de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos, condicionado à implantação do empreendimento financiado. O prazo de financiamento é de até 15 anos, com juros de 4% a.a. + TJLP, sendo disponibilizados até R\$ 15 milhões por município. Sítio eletrônico: <<http://municipios.bdmg.mg.gov.br/apoiofinanceiro/financiamentos/Paginas/novosommaeco.aspx>>

Quais as exigências das instituições financeiras para viabilização do financiamento?

Para a aprovação do financiamento, o empreendedor e o projeto deverão atender aos critérios de análise estabelecidos pelas instituições financeiras, tais como:

- capacidade de pagamento; a avaliação pelo agente financeiro de que o empreendimento será capaz de manter a operação e manutenção adequados das plantas de tratamento/destinação final dos RSU, que garante sua capacidade de pagamento do empréstimo;
- cadastro comercial satisfatório;
- em dia com as obrigações fiscais e previdenciárias;
- não estar em regime de recuperação de crédito (antigas falência e concordata);
- dispor de garantias para cobrir o risco da operação;
- cumprir a legislação ambiental.

Conforme orientação verbal da Caixa Econômica Federal, uma forma para facilitar a obtenção do financiamento bancário, para o caso de consórcios públicos, é a constituição de uma sociedade de propósito específico (SPE) (TRINDADE, 2011).

A SPE é um modelo de organização empresarial com um objetivo específico, que possui personalidade jurídica e pode adquirir bens móveis, imóveis e participações, ao contrário dos consórcios públicos que possuem apenas CNPJ. Possuem escrituração contábil própria e demais características comuns às empresas limitadas ou sociedades anônimas. Para sua constituição devem-se observar principalmente os artigos 966 e 1.052 da Lei n. 10.406/2002 do Código Civil Brasileiro.

No embasamento legal há inclusive situações em que se faz necessária a constituição de uma SPE:

- Lei Federal n. 8.666/1993, modificada pela Lei n. 9.074/1995, conhecida como Lei das Licitações Públicas, determina a constituição de uma SPE especialmente constituída pelos vencedores para levar adiante o objeto da licitação;
- Lei Federal n. 8.987/1993, conhecida como Lei das Concessões, determina a necessidade da formação de uma SPE para a prestação de serviços públicos;
- Lei Federal n. 11.079/2004, Lei das Parcerias Público-Privadas, prevê a constituição de SPE para realização dos convênios com o Estado.

No entanto, para os consórcios públicos intermunicipais, ainda existem alternativas para a obtenção de financiamentos, tais como a contratação de empresa privada – responsável pela execução do projeto -, que será diretamente beneficiada pelo crédito, ou mesmo o financiamento tratado com cada membro do consórcio.

Quais os fomentos governamentais de incentivo ao aproveitamento energético?

Governo Federal

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia

Instituído pela Lei n. 10.438/2002 (revisado pela Lei n. 10.762/2003) e suas alterações- representou um grande marco regulatório para as energias renováveis.
 Sítio eletrônico: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/blei200210438.pdf>>

Objetivo: aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos de Produtores Independentes Autônomos, concebidos com base em fontes eólica, pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e biomassa, no Sistema Elétrico Interligado Nacional, mediante contratos celebrados com a Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – ELETROBRÁS e procedimentos a serem implantados em duas etapas.

Meta primeira etapa: contratos celebrados mediante Chamada Pública, para a implantação de 3.300 MW de capacidade, divididos em 1.100 MW para cada fonte participante do Programa, até 30-12-2006, assegurando a compra da energia a ser produzida no prazo de 20 anos, a partir da data de entrada em operação definida no contrato, e a aquisição da energia pelo valor econômico correspondente à tecnologia específica de cada fonte.

Sobre o critério de contratação das instalações dos projetos participantes, estabeleceu a disponibilidade da Licença Ambiental de Instalação – LI e posteriormente a Licença Prévia Ambiental – LP.

A Lei n. 11.075/2004 alterou os prazos de celebração de contratos e de início de funcionamento de empreendimentos até o final de 2008, para contratos até 30-6-2004; após esta data, a diferença entre os 1.100 MW e a capacidade contratada por fonte seria em contratos por fonte até 28-12-2004.

Meta segunda etapa: atingida a meta de 3.300 MW, o desenvolvimento do Programa seria realizado de forma que as fontes eólica, PCHs e biomassa atendessem a 10% do consumo anual de energia elétrica no País, em até 20 anos, aí incorporados o prazo e os resultados da primeira etapa. Os contratos seriam celebrados com prazo de duração de 20 anos e preço equivalente ao valor econômico correspondente à geração de energia competitiva, além de um crédito complementar proveniente do fundo denominado Conta de Desenvolvimento Energético – CDE.

Em substituição a segunda fase do PROINFA, considerando que os objetivos originais não foram atingidos, foi criado pelo MME o mecanismo de Leilão de Fontes Renováveis – LFA (CASTRO e DANTAS, 2008).

A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE divulga regularmente o montante de energia gerada em todas as centrais participantes da primeira fase do PROINFA. Em setembro/2011, o total de energia gerada foi de 1.180 MW médios, enquanto a previsão de geração foi de 1.277 MW médios (CCEE, 2011a).

Leilão de energia elétrica de fontes alternativas

Regulamento pelo Decreto n. 6.048/2007 (que alterou a redação do Decreto n. 5.163/2004)

Sítio eletrônico: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Decreto/D6048.htm>

Objetivo: ser um dos mecanismos para atendimento do mercado consumidor das concessionárias de distribuição.

Pelas regras de comercialização estabelecidas na Lei n. 10.848/2004, as concessionárias, as permissionárias e as autorizadas de serviço público de Distribuição de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional - SIN, por meio de licitação na modalidade de leilões, devem garantir o atendimento à totalidade de seu mercado no **Ambiente de Contratação Regulada (ACR)**. À ANEEL cabe a regulação das licitações para contratação regulada de energia elétrica e a realização do leilão diretamente ou por intermédio da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE. O critério de menor tarifa (preço por Mega-Watt hora) é utilizado para definir os vencedores de um leilão. (CCEE, 2011b)

Considerando "A" como o ano previsto para o início do suprimento de energia elétrica adquirida pelos Agentes de Distribuição nos leilões de energia, foi estabelecido o seguinte cronograma para a realização dos leilões de compra de energia (CCEE, 2011):

- No quinto ano anterior ao ano "A" (chamado ano "A-5") e no terceiro ano anterior ao ano "A" (chamado ano "A-3"), proveniente de novo empreendimento de geração;
- No ano anterior ao ano "A" (chamado ano "A-1"), proveniente de empreendimento de geração existente.

Poderão ser promovidos Leilões de Ajuste tendo por objetivo complementar a carga de energia necessária ao atendimento do mercado consumidor das concessionárias de distribuição, até o limite de 1% dessa carga (CCEE, 2011).

A energia elétrica decorrente de importação e a gerada por meio de fontes alternativas são consideradas como provenientes de empreendimentos de geração novos ou existentes; entretanto, excepcionalmente, para cumprimento à obrigação de atendimento de 100% da demanda dos agentes de distribuição, a ANEEL poderá, de acordo com as diretrizes do Ministério de Minas de Energia, promover direta ou indiretamente leilões de compra de energia proveniente de fontes alternativas, independentemente da data de outorga.

Os leilões de energia elétrica, entre os anos "A-1" e "A-5", serão para energia proveniente dos leilões de compra exclusiva de fontes alternativas.

O primeiro leilão de fontes renováveis foi realizado em 18-6-2007 e adotou a mesma estrutura dos leilões de energia nova A-3: negociação de contratos de quantidade com a duração de 30 anos para PCHs e contratos de disponibilidade com a duração de 15 anos para as demais fontes (CASTRO e DANTAS, 2008).

No segundo leilão, realizado em 26-8-2010, para início de suprimento em 1-1-2013, a duração dos contratos para a energia de usinas de biomassa e eólicas passou para 20 anos (ANEEL, 2010).

Os empreendimentos termelétricos que utilizem biomassa ou resíduos de processo como combustível são considerados como geração distribuída, independente de seu percentual de eficiência energética.

Tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição

Resolução ANEEL n. 271/2007

Sítio eletrônico: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2007271.pdf>>

Objetivo: isenção de tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição aos empreendimentos caracterizados como pequena central hidrelétrica e àqueles com base em fontes solar, eólica, **biomassa ou cogeração qualificada**, cuja potência injetada nos sistemas de transmissão ou distribuição seja menor ou igual a 30 MW.

Esta Resolução **ANEEL** estabelece o seguinte incentivo:

- direito a 100% de redução, a ser aplicado às tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão (TUST) e de distribuição (TUSD), a "tarifa-fio", incidindo na produção e no consumo da energia comercializada, desde que utilizem como insumo energético, no mínimo, 50% (cinquenta por cento) de biomassa composta de resíduos sólidos urbanos e/ou de biogás de aterro sanitário ou biodigestores de resíduos vegetais ou animais, assim como lodos de estações de tratamento de esgoto.

A central termelétrica cogeneradora, para fins de enquadramento na modalidade de "cogeração qualificada", deverá atender os requisitos de qualificação especificados na Resolução ANEEL n. 235/2006. A ANEEL concede este incentivo porque reconhece que a atividade de cogeração de energia em uma central termelétrica contribui para a racionalidade energética, possibilitando melhor aproveitamento e menor consumo de fontes de energia, quando comparada à geração individual de calor e energia elétrica.

Ministério do Planejamento

Plano Mais Brasil – Plano Plurianual 2012-2015

Programa 2067 - Resíduos Sólidos

Sítio eletrônico: <http://www.planejamento.gov.br/secretarias/upload/Arquivos/spi/PPA/2012/Anexo_I.pdf>

Objetivo 0319: Ampliar o acesso aos serviços de manejo de resíduos sólidos urbanos de forma ambientalmente adequada, induzindo a gestão consorciada dos serviços e a inclusão socioeconômica de catadores de materiais recicláveis.

Metas 2012-2015: apoio a 100 municípios para implantação de programas de coleta seletiva; capacitar e fortalecer a participação na coleta seletiva de 60 mil catadores; fomento a constituição e implementação de 120 consórcios públicos com a atuação em resíduos sólidos; fomento e fortalecimento de 500 cooperativas/associações e redes de cooperação de catadores de materiais recicláveis para atuação na coleta seletiva e nas cadeias de reciclagem; incrementar 100 redes de comercialização de materiais recicláveis coletados pelas associações de catadores; viabilizar infraestrutura para 280 mil catadores.

Iniciativas: Apoio e fomento às associações, cooperativas e redes de cooperação de catadores de materiais recicláveis por meio de formação, assessoria técnica, infraestrutura e logística em unidades de coleta, triagem, processamento e comercialização de resíduos; fortalecimento do poder público para a gestão regionalizada dos serviços de resíduos sólidos urbanos; implementação de sistemas de coleta seletiva de resíduos sólidos urbanos.

Objetivo 0342: Promover a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos com ênfase na reestruturação das cadeias produtivas, na integração das associações, cooperativas e redes de cooperação de catadores, na estruturação do planejamento do setor, no gerenciamento de áreas contaminadas e na inovação tecnológica respeitando as peculiaridades regionais.

Metas 2012-2015: 8 Acordos Setoriais de cadeias produtivas implementados; 20 estados com inventário de áreas contaminadas disponibilizado; elaborar 27 Planos de Resíduos Sólidos em todos os estados e no Distrito Federal; elaborar o Plano Nacional de Resíduos Sólidos; elevar para 20% o percentual de municípios brasileiros com reciclagem de resíduos sólidos implantada; implantar Planos de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PGIRS) em 35% dos municípios do país; Sistema de Informação de Resíduos Sólidos implantado.

Iniciativas: Desenvolver novas tecnologias voltadas para atender os princípios da não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos; elaboração, implementação e monitoramento da Política Nacional de Resíduos Sólidos; fortalecimento da gestão local dos resíduos sólidos; implementação de práticas de produção e consumo sustentável; promoção de monitoramento de áreas contaminadas por resíduos e recuperação de áreas órfãs contaminadas.

Governo do Estado de Minas Gerais

SEDRO – Secretaria Estadual de Desenvolvimento Regional e Política Urbana

Ação Resíduos Sólidos: tem por objetivo ampliar o número de municípios servidos com sistemas de disposição final de resíduos sólidos urbanos com a desativação de lixões. Os projetos técnicos abrangem a implantação de: Usina de Triagem e Compostagem de lixo (UTC); aterro sanitário através de consórcio intermunicipal (projeto licenciado – LP e LI). Sítio eletrônico: <<http://www.urbano.mg.gov.br/municipios/saneamento>>.

Imposto sobre Operações Relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação - ICMS Ecológico

Contemplado atualmente pela Lei Estadual n. 18.030/2009

Sítio eletrônico: <http://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=LEI&num=18030&comp=&ano=2009&aba=js_textoAtualizado#texto>

Objetivo: beneficiar os municípios que priorizam Saneamento Básico e Unidades de Conservação

Conforme a Constituição Federal de 1988, na divisão de todo ICMS arrecadado pelo Estado, 25% do montante deve ser destinado aos municípios.

A Lei n. 12.040/1995 (**revogada pela Lei n. 13.803/2000 e aprimorada pela Lei n. 18.030/2009**), conhecida como Lei Robin Hood, estabeleceu os critérios da distribuição da parcela da receita do ICMS pertencente aos municípios, com o objetivo de reduzir as diferenças econômicas e sociais entre eles; incentivar a aplicação de recursos em áreas de prioridade social e utilizar as receitas próprias e descentralizar a distribuição do ICMS. Deste percentual uma fração é destinada ao critério “Meio Ambiente”, a qual passou de 1,0% para 1,10%, a partir de 2011.

O critério “Meio Ambiente” está dividido em três subcritérios: Índice de Saneamento Ambiental, referente a Aterros Sanitários, Estações de Tratamento de Esgotos e Usinas de Compostagem; Índice de Conservação, voltado às Unidades de Conservação e outras áreas protegidas; e, o último, introduzido pela lei de 2009, está baseado na relação percentual entre a área de ocorrência de mata seca em cada município e sua área total.

Na nova composição de percentuais, os índices de saneamento e conservação passaram de 50% para 45,45%, possibilitando 9,1% ao novo critério (relação entre mata seca e área total dos municípios).

O Índice de Saneamento Ambiental de responsabilidade da FEAM considera em seu cálculo o número total de sistemas habilitados, tipo de empreendimento, porcentagem da população atendida e um fator de qualidade variável de 0,1 a 1, com observância de pressupostos de desempenho operacional, gestão multimunicipal e localização compartilhada do sistema, tipo e peso de material reciclável selecionado e comercializado no município por associação ou cooperativa de coletores de resíduos e energia gerada pelo sistema. Os sistemas de tratamento ou disposição final de lixo ou esgoto sanitário devem atender, respectivamente, no mínimo, a 70% e 50% da população urbana, e estar em operação licenciada ou autorizada pelo órgão estadual.

O Índice de Conservação, calculado pelo Instituto Estadual de Florestas (IEF), considera a área da Unidade de Conservação da Natureza e/ou área protegida, a área do município, o fator de conservação e o fator de qualidade, que varia de 0,1 a 1, com procedimentos de cálculo estabelecidos pela Deliberação Normativa COPAM n. 86/2005.

Até o último dia do trimestre civil, a SEMAD publica os dados constitutivos dos índices a que se refere o critério ambiental relativos ao trimestre imediatamente anterior, com a relação de municípios habilitados segundo cada um dos critérios apresentados.

Para que o município participe do critério ecológico da lei, é imprescindível sua inscrição no Cadastro Estadual de Unidades de Conservação e Saneamento Ambiental, que possui a atualização trimestral e normatização fixada pela Resolução SEMAD n. 318/2005.

Os valores repassados aos municípios são disponibilizados para consulta no *site* da Fundação João Pinheiro.

Recursos para investimentos em serviços públicos de limpeza e manejo de resíduos

Lei Federal n. 11.445/2007 (Política Nacional de Saneamento Básico)

Sítio eletrônico: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Lei/L11445.htm >

Iniciativa: Estabelece que os recursos de fundos instituídos por entes da Federação, isoladamente ou reunidos em consórcios públicos, poderão ser utilizados como fontes ou garantias em operações de crédito para financiamento dos investimentos necessários à universalização dos serviços públicos de saneamento básico, como a limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos.

O conjunto de serviços, infra-estruturas e instalações operacionais de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos são compostos pelas seguintes atividades: coleta, transporte, transbordo, triagem para fins de reuso ou reciclagem, de tratamento, inclusive por compostagem, e de disposição final do lixo doméstico e do lixo originário da varrição, capina e poda de árvores em vias e logradouros públicos e outros eventuais serviços pertinentes à limpeza pública urbana.

SEPLAG - Secretaria de Estado de Planejamento e Gestão de Minas Gerais

Plano Plurianual de Ação Governamental 2012-2015 (projeto de lei)

Programa 046 – Qualidade Ambiental

Sítio eletrônico: <http://www.planejamento.mg.gov.br/governo/planejamento/ppag/arquivos/20122015/Proposta_PPA_G_2012-2015_vol_I_final.pdf>

2431 – Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte

1261 – Redução e valorização de resíduos – RMBH

Finalidade: promover a redução na geração e a valorização dos resíduos e efluentes, por meio da reutilização, reciclagem e recuperação energética, visando à redução dos custos de coleta, transporte e disposição final, poupando energia e recursos naturais e otimizando a infraestrutura existente, com inclusão social. Promover o consumo sustentável de matérias-primas e insumos, a produção sustentável, a melhoria das práticas de gestão de resíduos e efluentes e a reabilitação de áreas degradadas e contaminadas.

2091 – Fundação Estadual de Meio Ambiente

1216 – Mitigação e adaptação às Mudanças Climáticas

Finalidade: Contribuir para o esforço global de combate às mudanças climáticas e preparar o Estado para lidar com seus problemas resultantes por meio da identificação, desenvolvimento e implantação de ações e projetos e da definição e implementação de políticas públicas que promovam a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e a adaptação da economia estadual aos seus efeitos adversos.

1231 – Redução e valorização de resíduos

Finalidade: Promover a redução na geração e a valorização dos resíduos e efluentes, por meio da reutilização, reciclagem e recuperação energética, visando à redução dos custos de coleta, transporte e disposição final, poupando energia e recursos naturais e otimizando a infraestrutura existente, com inclusão social. Promover o consumo sustentável de matérias-primas e insumos, a produção sustentável, a melhoria das práticas de gestão de resíduos e efluentes e a reabilitação de áreas degradadas e contaminadas.

Plano Plurianual de Ação Governamental 2012-2015 (projeto de lei)

Programa 110 – Melhoria da qualidade ambiental

Sítio eletrônico: <http://www.planejamento.mg.gov.br/governo/planejamento/ppag/arquivos/20122015/Proposta_PPA_G_2012_2015_vol-II_final.pdf>

2091 – Fundação Estadual de Meio Ambiente

4090 – Gestão ambiental de resíduos

Finalidade: Promover ações sustentáveis visando à prevenção e a redução de resíduos gerados pelos diversos segmentos da sociedade.

Plano Plurianual de Ação Governamental 2012-2015 (projeto de lei)

Programa 148 – Programa de Desenvolvimento Turístico do Nordeste – Fase dois – PRODETUR/NE-II

Sítio eletrônico: <http://www.planejamento.mg.gov.br/governo/planejamento/ppag/arquivos/20122015/Proposta_PPA_G_2012_2015_vol-II_final.pdf>

1411 – Secretaria de Estado de Turismo

4622 – Fortalecimento da gestão de resíduos sólidos

Finalidade: Preparar planos integrados de gestão de resíduos sólidos, de estudos de viabilidade e projetos de estações de tratamento, de reciclagem e de compostagem, de locais para a disposição de resíduos; preparar estudos institucionais e de propostas de melhoramento das funções reguladoras.

Plano Plurianual de Ação Governamental 2012-2015 (projeto de lei)

Programa 222 – Resíduos Sólidos

Sítio eletrônico: <http://www.planejamento.mg.gov.br/governo/planejamento/ppag/arquivos/20122015/Proposta_PPA_G_2012_2015_vol-II_final.pdf>

1371 – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

1067 – Implantação de sistemas e gestão compartilhada da destinação final e tratamento de resíduos sólidos urbanos

Finalidade: Apoiar as administrações municipais na implementação de medidas tecnicamente adequadas para disposição final de resíduos urbanos.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Glossário**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/glossario.cfm?att=U>>. Acesso em: 4 ago. 2011a.

_____. Leilões de fontes alternativas e de reserva comercializam 1159,4 MW médios de 89 usinas. **ANEEL**, 27 ago. 2010. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=3541&id_area=>>. Acesso em: 29 nov. 2011.

AMARAL, Fernando Luciano Meli do. **Biodigestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos: um panorama tecnológico atual**. São Paulo: IPT, 2004. 108 p. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado em Tecnologia Ambiental, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2004. Disponível em: <http://homologa.ambiente.sp.gov.br/biogas/docs/artigos_dissertacoes/amaral.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2011.

AMBIENTAL COOP. **Pneus**: Materiais Recicláveis. Disponível em: <<http://ambientalcoop.blogspot.com/2011/02/pneus-materiais-reciclaveis.html>>. Acesso em: 9 ago. 2011.

ANVISA – AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Manual de gerenciamento de resíduos de serviços de saúde**. Brasília: Ministério da Saúde, 2006. 182p.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 544-75 - Standard practices for referencing suprathreshold odor intensity**. Philadelphia: American National Standard, 1997.

_____. **The world bank handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and the Caribbean**. Waterloo: Canadá, 2004. Disponível em: <http://www.bancomundial.org/lfg/gas_access_008.htm>. Acesso: 29 ago. 2011.

BDMG – BANCO DE DESENVOLVIMENTO DE MINAS GERAIS S.A. Disponível em: <<http://municipios.bdmg.mg.gov.br/apoiofinanceiro/financiamentos/Paginas/novosommaeco.aspx>>. Acesso em: 17 out. 2011.

BID – BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO. **Empréstimos e doações**: cooperação técnica. Disponível em: <<http://www.iadb.org/pt/sobre-o-bid/financiamento-do-bid/cooperacao-tecnica,6042.html>>. Acesso em: 10 nov. 2011.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO. **Apoio a projetos de eficiência energética - PROESCO**. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Apoio_Financeiro/Produtos/FINEM/proesco.html>. Acesso em: 19 out. 2011.

BRAIN, Marshall. **Como funcionam as turbinas a gás**. Disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/turbina-a-gas3.htm>>. Acesso em: 12 dez. 2011.

BRAND, Martha Andréia. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131p.

BRASIL. Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br>>. Acesso em: 17 nov. 2011a.

_____. Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação. **Atividades de projetos MDL aprovados nos termos da Resolução n. 1.** Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/57967.html>>. Acesso em: 18 nov. 2011b.

_____. Ministério De Ciência, Tecnologia e Inovação. **O mecanismo de desenvolvimento limpo:** guia de orientações. Brasília, 2009. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0205/205947.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2011.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de resíduos sólidos:** versão preliminar para consulta pública. Brasília: MME, 2011c. 137p.

_____. Ministério de Minas e Energia. **Modelo institucional do setor elétrico.** 2003. Disponível em: <http://ucel.eln.gov.br/gse_doc/Modelo_Energia.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2011d.

BURGOSELETRONICA. **Curso de forno microondas.** Disponível em: <http://www.burgoseletronica.net/microondas_magnetron.html>. Acesso em: 2 set. 2011.

CABRAL, Flavia Andréa da Silva; BELLI FILHO, Paulo. Tratamento de odores em digestor anaeróbio utilizando o processo de biofiltração. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 28, 2002, Cancún. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/vi-004.pdf>>. Acesso em: 9 dez. 2011.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Resíduos sólidos urbanos:** saiba mais. Disponível em: <http://www1.caixa.gov.br/gov/gov_social/municipal/assistencia_tecnica/produtos/repasses/residuos_solidos_urbanos/saiba_mais.asp>. Acesso em: 8 ago. 2011.

_____. **Caixa assina acordo para comercializar Créditos de Carbono.** Disponível em: <http://www1.caixa.gov.br/imprensa/noticias/asp/popup_box.asp?codigo=6611292>. Acesso em 7 dez. 2011.

CAIXETA, Dalma Maria. **Geração de energia elétrica a partir da incineração de lixo urbano: o caso de Campo Grande/MS.** Brasília: Universidade de Brasília, Centro de Desenvolvimento Sustentável, 2005. 86 p. Originalmente apresentada como monografia do curso de especialização em Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável, Centro de Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Brasília, Brasília, 2005. Disponível em: <http://4ccr.pgr.mpf.gov.br/documentos-e-publicacoes/trabalhos-cientificos/dissertacao_dalma.pdf>. Acesso em: 7 dez. 2011

CAMPOS, Ângela Diniz. Técnicas para produção de extrato pirolenhoso para uso agrícola. **Circular Técnica**, Pelotas, n. 65, dez. 2007. Disponível em: <http://www.cpact.embrapa.br/publicacoes/download/circulares/Circular_65.pdf>. Acesso em: 5 set. 2011.

CAPUTO, Paula Diniz. **Utilização de syngas em substituição a combustíveis gasosos em processos siderúrgicos.** Guratinguetá: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia do Campus de Guratinguetá, 2009. 72 f. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia do Campus de Guratinguetá da Universidade Estadual Paulista, Guratinguetá, 2009. Disponível em: <http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/beg/33004080027P6/2009/caputo_pd_me_guara.pdf>. Acesso em: 7 dez. 2011

CASTRO, Nivaldo José de; DANTAS, Guilherme de Azevedo. Lições do PROINFA e do leilão de fontes alternativas para a inserção da bioeletricidade sucroalcooleira na matriz elétrica Brasileira. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA, 30, 2008, Curitiba. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: UFRJ. Disponível em: <http://www.nuca.ie.ufrj.br/gesel/artigos/0808XX_CastroDantas_ProinfaAlternativasBioeletricidade.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2011.

CCEE – CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Entenda os leilões.** Disponível em: <<http://www.ccee.org.br/cceeinterdsm/v/index.jsp?vgnextoid=57ca9f733d60b010VgnVCM1000005e01010aRCRD>>. Acesso em 30 nov. 2011a.

_____. **Tratamento da energia do PROINFA na CCEE.** n. 68, 2011. 16 p. Disponível em: <http://www.ccee.org.br/StaticFile/Arquivo/biblioteca_virtual/Relatorios_Publico/Proinfa/proinfa_outubro2011_W97_03Def.doc>. Acesso em: 30 nov. 2011b.

CEMIG GT – GERAÇÃO E TRANSMISSÃO S/A; FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Relatório Técnico CEMIG – FEAM 001/2009.** Belo Horizonte, Relatório de 4 de agosto 2009. Termo de Cooperação Técnica e Operacional CEMIG – SEMAD – FEAM. (trabalho não publicado)

_____. **Relatório Técnico CEMIG – FEAM 002/2010.** Belo Horizonte, Relatório de 15 de dezembro 2010. Termo de Cooperação Técnica e Operacional CEMIG – SEMAD – FEAM. (trabalho não publicado)

_____. **Relatório Técnico CEMIG – FEAM 003/2011.** Belo Horizonte, Relatório de 16 de Setembro 2011. Termo de Cooperação Técnica e Operacional CEMIG – SEMAD – FEAM. (trabalho em revisão)

CEMPRE – COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM. **Lixo municipal:** manual de gerenciamento integrado. São Paulo: CEMPRE, 2010. 350p.

CENBIO - CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA. **Comparação entre tecnologias de gaseificação de biomassa existentes no Brasil e no exterior e formação de recursos humanos na região norte:** estado da arte da gaseificação. 2002. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/download/publicacoes/Estado_da_Arte.pdf>. Acesso em: 18 abr.2011.

CEPSRM – CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA. **Radiação eletromagnética.** Disponível em: <<http://www6.ufrgs.br/engcart/PDASR/rem.html>>. Acesso em: 22 set. 2011.

CERON, Luciano Peske. Manga filtrante de teflon. **Revista e Portal Meio Filtrante**, ano 5, ed. 51, jul./ago. 2011. Disponível em: <http://www.meiofiltrante.com.br/materias_ver.asp?action=detalhe&id=710&revista=n51>. Acesso em: 26 set. 2011.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Biogás:** pesquisas e projetos no Brasil. São Paulo: SMA, 2006. 184 p. Disponível em: <http://homologa.ambiente.sp.gov.br/biogas/docs/livro_biogas/livrobiogas.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2011.

_____. **Biogás:** reatores. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Biogás/20-Reatores>>. Acesso em: 2 set. 2011.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Reatores anaeróbios.** Belo Horizonte: DESA – UFMG, 1997. 246 p.

COELHO, Suani Teixeira et al. A conversão da fonte renovável biogás em energia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, V., 2006, Brasília. **Anais eletrônicos...** Brasília: Sociedade Brasileira de Planejamento Energético, 2006. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/download/projetos/8_energ-biog.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2011.

COMBUSTEC Indústria e Comércio de Queimadores Ltda. Disponível em: <<http://www.combustecqueimadores.com.br/servico.php?id=13>>. Acesso em: 10 out. 2011.

CONAM - CONSELHO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE do DISTRITO FEDERAL. Resolução n. 01, de 15 de dezembro de 2009. Regulamentação da produção, distribuição e aplicação do composto orgânico de lixo na agricultura. Disponível em: <<http://www.sedhab.df.gov.br/sites/300/379/00002135.pdf>>. Acesso em: 7 dez. 2011.

CONER – CONSELHO ESTADUAL DE ENERGIA. **Matriz energética de Minas Gerais 2007 – 2030.** Belo Horizonte: UFRJ/UNIFEI, 2007. Disponível em: <<http://www.conselhos.mg.gov.br/coner/page/publicacoes/matriz-energtica-de-mg>>. Acesso em: 16 ago. 2011.

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva e GÓMEZ, Edgardo Olivares. (Organizadores). **Biomassa para energia.** São Paulo: Editora da Unicamp, 2009. 732p.

COSTA NETO, José Anísio Leal; BRIM JÚNIOR, José Viana; AMORIM, Paulo Henrique Melo de. **Estudo de um modelo para análise prévia de viabilidade econômico-financeira de empreendimentos imobiliários em Salvador - BA.** Salvador: UFBA, 2003. 47 p. Originalmente apresentada como monografia de especialização em Gerenciamento de Obras, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, 2003. Disponível em: <<http://www.gerenciamento.ufba.br/Monografias%202002-2004/An%C3%A1lise%20Pr%C3%A9via%20de%20Viabilidade.pdf>>. Acesso em: 9 ago. 2011.

DNIT – DEPARTAMENTO DE NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental – EVTEA.** Disponível em: <<http://br3projetos.files.wordpress.com/2010/06/evtea-097-2010-dnit.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2011a.

_____. **Termo de referência para elaboração do estudo de viabilidade técnico-econômica e ambiental – EVTEA.**

Disponível em:

<http://www1.dnit.gov.br/anexo/Termo%20de%20Refer%C3%Aancia/Termo%20de%20Refer%C3%Aancia_ edital0327_08-18_0.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2011b.

ELK, Ana Ghislane Henriques Pereira van. **Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos: redução de emissões na disposição final.** Rio de Janeiro: IBAM, 2007. Disponível em: <http://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/03-aterro_mdl_1.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2011.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Avaliação preliminar do aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos de Campo Grande, MS.** Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20081208_1.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2011.

ENGEBIO ENGENHARIA S/S LTDA. **Análise da pré-viabilidade técnica, econômica e ambiental do aproveitamento energético de biogás do aterro sanitário de Contagem: estudo de caso.** Porto Alegre: ENGEBIO, 2009a.

_____. **Avaliação técnica, econômica e ambiental da implantação de uma usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais.** Porto Alegre: ENGEBIO, 2010a.

_____. **Estado da arte do tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica.** 2. ed. Porto Alegre: ENGEBIO, 2010b

_____. **Identificação do potencial de geração de metano e energético e definição do melhor tipo de aproveitamento para os aterros sanitários de Betim, Contagem e Uberlândia .** Porto Alegre: ENGEBIO, 2009b.

ENVIROPARKS. **Energy creation through innovation.** Disponível em: <<http://www.enviroparks.co.uk/how-we-operate>>. Acesso em: 20 out. 2011a.

_____. **Frequently asked questions.** Disponível em: <<http://www.enviroparks.co.uk/frequently-asked-questions>>. Acesso em: 31 ago. 2011b.

ERG – ENERGY RESOURCES GROUP, INC. **Selected to be the project development manager for the GeoPlasma-St. Lucie Waste to Energy: Plasma Gasification Project.** Disponível em: <<http://energyresourcesgrp.com/5.html>>. Acesso em: 20 out. 2011.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. **Relatório Técnico 002/2010.** Belo Horizonte, Relatório de 10 de dezembro de 2010.

_____. **Comunicado técnico n. 1 – utilização do mecanismo de desenvolvimento limpo: procedimentos para implementação e análise da evolução dos projetos.** Belo Horizonte: FEAM, 2011. 23 p. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/mecanismo_des_limpo/comunicado_tecnico_gemuc.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2011.

FELIPETTO, Adriana Vilela Montenegro. **Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos: conceito, planejamento e oportunidades.** Rio de Janeiro: IBAM, 2007. Disponível em: <http://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/02-mdl_1.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2011.

FIGUEIREDO, Cristiano Kléber de. **Análise estatística do efeito da pressão na carbonização da madeira de eucaliptus.** Brasília: UnB, 2009. 104 p. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado em Ciências Florestais, Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em: <http://efl.unb.br/arq_pdf/TTP_rtação/2009/Cristiano_Kleber_Figueiredo.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2011.

FIGUEIREDO, Natalie Jimerez Vérdi. **Utilização do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás:** Estudo de caso. São Paulo: 2007. 89 f. Originalmente apresentada como trabalho de graduação do curso Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2007. Disponível em: <<http://cenbio.iee.usp.br/download/publicacoes/Natalie.pdf>>. Acesso em: 6 set. 2011.

FRICHE, Guilherme Passos. (<guilherme.passos@meioambiente.mg.gov.br>). **Versão eletrônica de relatório de situação:** projeto estruturador resíduo sólido. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <consuelo.ribeiro@meioambiente.mg.gov.br> em 28 dez. 2010.

GASNET. Biogás para Reduc em 2011. **Agência Minas e Energia Hoje/Sindcomb Notícias**, out. 2010. Disponível em: <<http://www.gasnet.com.br/conteudo/10233>>. Acesso em: 7 set. 2011a.

_____. **Gás Natural.** Disponível em: <http://www.gasnet.com.br/novo_gasnatural/combust_completo.asp>. Acesso em: 2 ago. 2011b.

_____. Grupo Solvi inaugura térmica a biogás de aterro na Bahia. **Agência CanalEnergia**, abr. 2011. Disponível em: <<http://www.gasnet.com.br/conteudo/11291>>. Acesso em: 6 dez. 2011c.

_____. **Termelétricas:** ciclo combinado. Disponível em: <http://www.gasnet.com.br/novo_termeletricas/ciclo.asp>. Acesso em: 2 ago. 2011d.

GOMES, Marcel dos Santos. **Produção de bio-óleo através do processo termoquímico de pirólise.** 2010. 52 p. Originalmente apresentada como trabalho de graduação do curso de Tecnologia de Biocombustíveis, Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, 2010. Disponível em: <<http://www.fatecaracatuba.edu.br/suporte/upload/Biblioteca/BIO%2017701020010.pdf>>. Acesso em: 9 ago. 2011

GUEDES, Leonardo Guerra de Rezende. **Bio-efeitos da radiofrequência.** Disponível em: <http://www.eeec.ufg.br/~lguedes/moodle/scm/smc_cap_14.swf>. Acesso em: 22 set. 2011.

HENRIQUES, Rachel Martins. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos:** uma abordagem tecnológica. Rio de Janeiro: UFRJ, 2004, 204 p. Originalmente apresentada como tese de mestrado em Ciências em Planejamento Energético, Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <<<http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/rachelh.pdf>>>. Acesso em 17 nov. 2011.

HOFFMANN, Bettina Susanne. **O ciclo combinado com gaseificação integrada e a captura de CO₂:** uma solução para mitigar as emissões de CO₂ em termelétricas a carvão em larga escala no curto prazo? Rio de Janeiro: UFRJ, 2010, 143 p. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado em Planejamento Energético, COOPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/bettina_susane.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2011.

HPS – HEALTH PHYSICS SOCIETY. **A practical approach to microwave oven safety.** Disponível em: <<http://www.hps.org/hpspublications/articles/microwaveoven.html>>. Acesso em: 22 set. 2011.

IBAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2001. 200p.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2010**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/populacao_por_municipio_zip.shtm>. Acesso em: 13 jan. 2011a.

_____. **Estados@: Minas Gerais**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=mg>>. Acesso em: 13 jan. 2011b.

_____. **Pesquisa Nacional de saneamento básico 2008**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/temas.php?sigla=mg&tema=saneamentobasico2008>>. Acesso em: 13 jan. 2011c.

ICLEI – Brasil – Governos Locais Pela Sustentabilidade. **Manual para aproveitamento do biogás**: volume um, aterros sanitários. São Paulo: ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade, secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, 2009.

ICMS ECOLÓGICO. **Minas Gerais: histórico e perspectivas**. Disponível em: <http://www.icmsecológico.org.br/index.php?option=com_content&view=article&id=72&Itemid=77>. Acesso em: 17 nov. 2011

IEA Bioenergy. **Biogas flares: state of the art and market review**. Culham, Abingdon, Oxfordshire, UK: AEA Technology Environment, 2000. 9 p. Disponível em: <http://www.iea-biogas.net/_download/publi-task37/Flaring_4-4.PDF>. Acesso em: 6 out. 2011.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Forno de microondas**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/microondas.asp?iacao=imprimir>>. Acesso em: 8 set. 2011.

JIANGSU HUALONG ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGY CO., LTD. **Saco de filtro de Ryton/PPS**. Disponível em: <<http://portuguese.alibaba.com/product-gs/ryton-pps-filter-bag-429819212.html>>. Acesso em: 27 set. 2011.

JOHANNESSEN, Lars Mikkel. **Working paper series – Guidance note on recuperation of landfill gas from municipal solid waste landfills**. n. 4. Washington, D.C: Banco Mundial, 1999. 23 p. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsars/fulltext//landfi.pdf>>. Acesso em: 31 ago. 2011.

JUCÁ, J. F. Thome et al. Disponibilidade do biogás em célula do aterro de resíduos sólidos da Muribeca. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23, 2005, Campo Grande. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/2364279/disponibilidade-do-biogas-em-uma-celula-do-aterro-de-residuos-solidos-da-muribeca>>. Acesso: 26 ago. 2011.

LANDIM, Ana Luiza Pinto Ferreira; AZEVEDO, Lizandra Prado de. O aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários: unindo o inútil ao sustentável. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 27, p. 59-100, mar.2008. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set2704.pdf>. Acesso em: 16 maio 2012.

LANGHE, Liséte Celina et al. **Estudo comparativo de metodologias para análises físico-químicas de resíduos sólidos urbanos**. In: Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades (coletânea de trabalhos técnicos). Armando Borges de Castilhos et al. (organizadores). Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2002. 104 p. Disponível em: <<http://www.finep.gov.br/prosab/livros/livrocompletfinal.pdf>>. Acesso em 7 dez. 2011

LEADER+ELOZ. **Índice indicativo de estudo técnico-econômico**. Disponível em: <<http://www.leader.pt/PDF/dicas/Estudodeviabilidade.pdf>>. Acesso em: 8 set. 2011.

LIMA, Luiz Mário Queiroz. **Lixo: tratamento e biorremediação**. São Paulo: Hemus Editora Ltda., 1995. 265p.

LORA, Electo Eduardo Silva. Prevenção e controle das emissões em centrais termelétricas. In: CURSO CENTRAIS TERMELÉTRICAS – FUNDAMENTOS TERMODINÂMICOS, EQUIPAMENTOS E OPERAÇÃO, 2011, Itajubá. **Apostila/ Notas de Aula...** Itajubá: Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria, 12 a 16 de set. de 2011. 50 p.

LUFTECH – Soluções Ambientais. **A limpeza dos gases na incineração**. Disponível em: <<http://www.luftech.com.br/informacoes-ambientais/incineracao/120-limpeza-gases.html>>. Acesso em: 17 ago. 2011.

MACHADO, Guilherme B.; MELO, Tadeu C. Cordeiro de; LASTRES, Luiz Fernando Martins. Utilização de Gás Natural em Motores e Cenário do Uso no Brasil. **Apresentação em slides...** CENPES – Universidade Petrobrás, 2007. 89 p. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/minisite/premiotecnologia/pdf/TecnologiaGas_GasNatural_Motores.pdf>. Acesso em: 7 nov. 2011.

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Ventilação industrial e controle da poluição**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1990. 403p.

MANO, Eloisa Biasotto. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1991. 197p.

MICHELSEN, James. Tecnologias para o aproveitamento energético do biogás. In: CURSO INTERNACIONAL – RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM ATERROS SANITÁRIOS, 2010, Belo Horizonte. **Apresentação em slides...** Belo Horizonte, 2010. 44 p. Disponível em: <<http://www.feam.br/images/stories/alvaro/painel4/tec.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

MENEZES, Ricardo A. Amaral. Tratamento por destruição térmica de RSU. In: CURSO DE ANÁLISE DE PROJETOS DE TRATAMENTO POR DESTRUIÇÃO TÉRMICA DE RSU E ESPECIAIS: INDICADORES OPERACIONAIS, 1999. **Apresentação em slides...** ABES/CEF, 1999. 23 p.

MENEZES, Ricardo A. Amaral; GERLACH, José Luiz; MENEZES, Marco Antonio. Estágio atual da incineração no Brasil. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LIMPEZA PÚBLICA, VII., 2000, Curitiba. **Anais eletrônicos...** Curitiba: ABLP, 2000. Disponível em: <<http://www.luftech.com.br/informacoes-ambientais/incineracao/122-estagio-atual.html>>. Acesso em: 19 ago. 2011.

MINAS GERAIS. Secretaria Estadual de Desenvolvimento Regional e Política Urbana. **Saneamento básico: mais saúde para todos**. Disponível em: <<http://www.urbano.mg.gov.br/municipios/saneamento>>. Acesso em: 3 jan. 2011a.

_____. Secretaria Estadual de Desenvolvimento Regional e Política Urbana. **Consórcios**. Disponível em: <<http://www.urbano.mg.gov.br/municipios/consorcios>>. Acesso em: 3 jan. 2011b.

_____. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **ICMS Ecológico**. Disponível em: <<http://www.semاد.mg.gov.br/icms-ecologico>>. Acesso em: 16 nov. 2011c.

_____. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Regularização ambiental**. Disponível em: <<http://www.semاد.mg.gov.br/regularizacao-ambiental>>. Acesso em: 21 out. 2011d.

_____. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Sistema integrado de informações ambientais (SIAM): Feam - análise licenciamento**. Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/siam/analise/>>. Acesso em: 17 jun. 2011e.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE DO JAPÃO. **Manual do MDL para desenvolvedores de projetos e formuladores de políticas**. Japão, 2006. Disponível em: <http://gec.jp/gec/EN/Publications/CDM_Manual-P.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2011.

NASCIMENTO, Marco Antônio Rosa. Fundamentos teóricos da geração termelétrica e ciclos termodinâmicos. In: CURSO CENTRAIS TERMELÉTRICAS – FUNDAMENTOS TERMODINÂMICOS, EQUIPAMENTOS E OPERAÇÃO, 2011, Itajubá. **Apostila/ Notas de Aula...** Itajubá: Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria, 12 a 16 de set. de 2011. 71 p.

OLIVEIRA, Luciano Basto. Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais. In: SEMINÁRIO LIXO É ENERGIA, 2009, Belo Horizonte. **Apresentação em slides...** Belo Horizonte, 2009. 69p. Disponível em: <http://www.feam.br/index.php?option=com_content&task=view&id=566&Itemid=128>. Acesso em: 19 mar. 2009.

OLIVEIRA, Luciano Basto. (<luciano@ivig.coppe.ufrj.br>). **Versão eletrônica de informações referente a artigo técnico de sua autoria.** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <consuelo.ribeiro@meioambiente.mg.gov.br>. Acesso em 26 maio. 2011.

OPEX ENERGY. **Ciclos combinados:** turbinas de vapor. Disponível em: <http://www.opex-energy.com/ciclos/turbina_de_vapor_CTCC.html>. Acesso em: 6 set. 2011.

OVERCAR. **O motor:** ciclo Otto. Disponível em: <<http://www.overcar.com.br/o-motor-ciclo-otto/>>. Acesso em: 6 set. 2011.

PARLAMENTO EUROPEU e o CONSELHO. **Diretiva 2010/75/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 24 de novembro de 2010, relativa às emissões industriais (prevenção e controle integrado da poluição).** Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:334:0017:0119:pt:PDF>>. Acesso em 4 fev. 2011.

PARLAMENTO EUROPEU e o CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. **Diretiva 2000/76/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de Dezembro de 2000, relativa à incineração de resíduos.** Disponível em: <<http://eur-ex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2000:332:0091:0111:pt:PDF>>. Acesso em 22 fev. 2010.

PBH – PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. Cidade sustentável, BH inaugura usina que gera energia elétrica através do lixo. **Sala de Notícias**, Belo Horizonte, 14 jul. 2011. Disponível em: <<http://portalpbh.pbh.gov.br/pbh/ecp/noticia.do?evento=portlet&pAc=not&idConteudo=48950&pIdPlc=&app=salanoticias>>. Acesso em: 30 ago. 2011.

PECORA, Vanessa; VELÁZQUEZ, Silvia Maria Stortini González; COELHO, Suani Teixeira. **Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica:** estudo de caso em São Paulo. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/download/publicacoes/congbioen_pecora.pdf>. Acesso em 19 mar. 2009

PEREIRA, F. J. Antunes. **Compostagem: fundamento, tecnologias, impactos e aplicações.** Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/11641598/CompostagemFundamentosTecnologias-e-Impactos-Ambientais>> Acesso em: 7 dez. 2011.

PEREIRA FILHO, Edenir Rodrigues. **Sistemas mecanizados acoplados a forno de microondas para a mineralização em linha de amostras de interesse alimentício: determinação de ferro e cobalto.** Campinas: Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química, 1999. 105 p. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado em Química, Instituto de Química da Universidade Estadual Paulista, Campinas, 1999. Disponível em: <<http://erpf.sites.uol.com.br/pdfmestese/dissertacao.pdf>>. Acesso em: 7 dez. 2011

PEREIRA NETO, João Tinoco. **Manual de compostagem processo de baixo custo.** Belo Horizonte: UNICEF, 1996. 56p.

PIFFER, Leandro. **Análise paramétrica de um gaseificador de resíduos de madeira.** Disponível em: <<http://ucsnews.ucs.br/ccet/deme/emsoares/inipes/gasequi.html>>. Acesso em: 7 dez. 2011.

PLASCO ENERGY GROUP. **A partnership for a zero-waste Ottawa.** Disponível em: <<http://www.zerowasteottawa.com/en/>>. Acesso em: 19 out. 2011

PLASCO TRAIL ROAD. **Public meeting 2011.** Disponível em: <<http://www.zerowasteottawa.com/docs/PTR%20Screening%20Meeting.pdf>>. Acesso em: 31 ago. 2011.

PUC - PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO. **Fabricação do cimento Portland e co-processamento de resíduos industriais nos fornos de produção de cimento.** Apresentação em slides. Disponível em: <www.dema.puc-rio.br/download/Aula%20Cimento%20IEM.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2010.

PYROLYSIS FACILITY. 2004. **Müllpyrolyseanlage (MPA) MSW pyrolysis plant**. Disponível em: <http://www.lacitysan.org/solid_resources/strategic_programs/alternative_tech/PDF/PyrolysisFacility.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2011.

RAIA, Maria de Fátima Ribeiro. **Conservação de energia: célula a combustível**. Apresentação em slides. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2009. Apresentação em slides. Disponível em: <http://pessoal.utfpr.edu.br/fatimaraia/arquivos/Celula_a_Combustivel_TECNOLOGIA.pdf>. Acesso em: 11 out. 2011.

ROMÃO, Érica L. et al. **PROBEM: Programa biomassa – energia – materiais**. Refinaria de biomassa. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/novo_site/cms/files/3/erica_apresentacao.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2011.

SANTOS, Andrei Feijó da Silva. **Estudo de viabilidade de aplicação do biogás no ambiente urbano**. Ribeirão Preto: Faculdade de Economia e Administração – Universidade de São Paulo, 2009. Disponível em: <http://homologa.ambiente.sp.gov.br/biogas/docs/artigos_dissertacoes/santos_efs.pdf>. Acesso em: 8 set. 2011.

SANTOS, Marcelo Nascimento dos. **Aplicação de tocha de plasma para incineração de resíduos sólidos**. Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.cetes.com.br/artigos/marcelo_nascimento/artigo_plasma.pdf>. Acesso em: 8 set. 2011.

SCS ENGINEERS. **Relatório de avaliação preliminar: aterro sanitário de Uberaba**. Reston, 2011. Disponível em: <<http://www.feam.br/mudancas-climaticas/iniciativa-global-para-o-metano>>. Acesso em: 15 ago. 2011.

SEBRAE – SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Série de empreendimentos coletivos: sociedade de propósito específico**. Brasília: Unidade de Capacitação Empresarial, 2009. 28 p. Disponível em: <[http://www.biblioteca.sebrae.com.br/bds/BDS.nsf/84E1E57D6B916E6683257669006508F3/\\$File/NT00042C06.pdf](http://www.biblioteca.sebrae.com.br/bds/BDS.nsf/84E1E57D6B916E6683257669006508F3/$File/NT00042C06.pdf)>. Acesso em: 11 ago. 2011.

SHARMA, V. K.; TESTA, C.; CASTELLUCCIO, G. **Anaerobic treatment of semi-solid organic waste**. Energy Conversion & Management, 40, p. 369-384. 1999.

SCHIRMER, Waldir Nagel et al. Características, natureza e métodos de amostragem/Análise de gases odorantes emitidos em processos industriais: Caso das lagoas de tratamento de efluentes. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v.1, n2, p. 35-52, 2007. Disponível em: <http://www.lcqar.ufsc.br/site/data/_uploaded/file/Artigos%20de%20Revistas/v2_03.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2011.

SIGNORETTI, Valdir Tesche. **Controle das emissões de NO_x, SO_x e metais pesados quando se utilizam combustíveis alternativos e alto teor de enxofre na indústria de cimento**. Itajubá: UNIFEI, 2008, 272 p. Originalmente apresentada como tese de doutorado em Engenharia Mecânica, Instituto de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Itajubá, 2008. Disponível em: <http://www.portal.unifei.edu.br/files/arquivos/PRPPG/Engenharia_mecanica/Conversao_energia_doutorado/Valdir_Tesche_Signoretti.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2011.

SILVA, Carlos Alberto Rodrigues da. Recuperação energética de resíduos sólidos urbanos: contexto regulatório, institucional e de negócio. In: FÓRUM BRASILEIRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2011, São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo: ABRELPE, 2011. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/arquivos/forum_residuos/F%C3%B3rum%20Brasileiro%20de%20Res%C3%ADduos%20%C3%B3lidos%202011.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2011.

SILVA, Marjorye Boldrini da. **Influência do tipo de meio suporte no desempenho de biofiltros aplicados à remoção de H₂S do ar atmosférico em sistemas de esgoto sanitário**. 2008. 156 f. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008. Disponível em: <<http://www.ct.ufes.br/ppgea/files/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Marjorye%20Boldrini%20da%20Silva.pdf>>. Acesso em: 9 dez. 2011.

SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO. **Press Kit 2010**. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/presskit_SNIC_2010.pdf>. Acesso em: 09 dez. 2010.

SOARES, Jeferson Borghetti. **Potencial de conservação de energia e de mitigação das emissões de gases de efeito estufa para a indústria brasileira de cimento Portland até 2015**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1998, 184p. Originalmente apresentada como tese de mestrado em Ciência em Planejamento Energético, Engenharia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1998. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/jeferson.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2011.

STRICKLAND, Jonathan. **How plasma converter work**. Disponível em: <<http://science.howstuffworks.com/environmental/energy/plasma-converter.htm>>. Acesso em: 5 ago. 2011.

TRINDADE, Adailton Ferreira. Financiamento de projeto – desafios e oportunidades. In: WORKSHOP INTERNACIONAL APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS E DO TRATAMENTO DE EFLUENTES, 2011, Belo Horizonte. **Apresentação em slides...** Belo Horizonte, 2011. 27 p. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnaclimatica/cursos/biogas/adailton_trindade_gerencia_nacional_financiamento_para_saneamento_infraestrutura.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2011.

TOLMASQUIM, Maurício Tiomno (Org). **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 515p.

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK ON CLIMATE CHANGE. Disponível em: <<http://cdm.unfccc.int/>>. Acesso em: 11 ago. 2011.

VIDAL, P. **La voie chimique**. In: GUIDE BIOMASSE ENERGIE, 1., 1994, I'IEPF, Canadá, 1994. p. 123-135. apud FIGUEIREDO, Cristiano Kléber de. **Análise estatística do efeito da pressão na carbonização da madeira de eucaliptus**. Brasília: UnB, 2009. 104 p. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado em Ciências Florestais, Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, 2009. Disponível em: <http://efl.unb.br/arq_pdf/TTP_rtação/2009/Cristiano_Kleber_Figueiredo.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2011.

VERMA, Shefali. **Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes**. Columbia: Columbia University, 2002. 50 p. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado em Earth Resources Engineering, Columbia University, 2002.

ZANTA, Viviana Maria; FERREIRA, Cynthia Fantoni Alves. **Gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos**. In: Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Armando Borges de Castilho Júnior (coordenador). Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. 294p. Disponível em: <<http://www.finep.gov.br/prosab/livros/ProsabArmando.pdf>>. Acesso em: 5 dez. 2011.

ANEXOS

ANEXO 1 - RESUMO DAS NORMAS REFERENTES AO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E OUTROS ASSUNTOS CORRELATOS

Data	Norma	Assunto
Estado de Minas Gerais		
12-1-2009	Lei n. 18.031	Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos.
28-12-1995	Lei n. 12.040	Dispõe sobre a distribuição da parcela de receita do produto da arrecadação do ICMS pertencente aos Municípios, de que trata o inciso II do parágrafo único do artigo 158 da Constituição Federal, e dá outras providências. (revogada pela Lei n. 13.803/2000).
27-12-2000	Lei n. 13.803	Dispõe sobre a distribuição da parcela da receita do produto da arrecadação do ICMS pertencente aos municípios.
12-1-2009	Lei n. 18.030	Dispõe sobre a distribuição da parcela da receita do produto da arrecadação do ICMS pertencente aos Municípios.
15-2-2005	Resolução SEMAD n. 318	Disciplina o cadastramento das unidades de conservação da natureza e outras áreas protegidas, bem como a divulgação periódica das informações básicas pertinentes, para os fins do art. 1º, inciso VIII, alíneas “b” e “c”, da Lei n. 13.803, de 27 de dezembro de 2000, e dá outras providências.
12-2-1998	Lei n. 9.605	Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências.
5-9-2009	Decreto n. 45.181	Regulamenta a Lei n. 18.031, de 12 de janeiro de 2009, e dá outras providências.
5-5-2008	DN Conjunta COPAM/CERH-MG n. 01	Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.
9-9-2004	DN COPAM n. 74	Estabelece critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor, de empreendimentos e atividades modificadoras do meio ambiente passíveis de autorização ou de licenciamento ambiental no nível estadual, determina normas para indenização dos custos de análise de pedidos de autorização e de licenciamento ambiental, e dá outras providências.
17-12-1996	DN COPAM n. 17	Dispõe sobre prazo de validade de licenças ambientais, sua revalidação e dá outras providências.
30-11-2004	DN COPAM n. 77	Estabelece medidas complementares para a aplicação da Deliberação Normativa n. 74, de 9 de setembro de 2004 e dá outras providências.
8-8-2008	DN COPAM n. 121	Estabelece condições aos empreendimentos e atividades para fazerem jus ao acréscimo de um ano no prazo de validade da Licença de Operação – LO ou de Autorização Ambiental de Funcionamento – AAF, estabelecidos pela Deliberação Normativa COPAM n. 17, de dezembro de 1996 e Deliberação Normativa COPAM n. 77, de 30 de novembro de 2004 e dá outras providências.
16-12-2010	DN COPAM n. 160	Altera a Deliberação Normativa COPAM n. 151, de 1 de julho de 2010; prorroga o prazo para adesão ao Programa de Registro Público Voluntário das Emissões Anuais de Gases de Efeito Estufa do Estado de Minas Gerais, e dá outras providências.
30-10-2006	DN COPAM n. 102	Estabelece diretrizes para a cooperação técnica e administrativa com os municípios visando ao licenciamento e à fiscalização de empreendimentos e atividades de impacto ambiental local, e dá outras providências.
28-7-1998	DN COPAM n. 026	Dispõe sobre o coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer.
25-10-2010	DN COPAM n. 154	Dispõe sobre o coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer.

Data	Norma	Assunto
Estado de Minas Gerais		
26-5-1981	DN COPAM n. 01	Fixa normas e padrões para a qualidade do ar.
16-12-1986	DN COPAM n. 11	Estabelece normas e padrões para emissões de poluentes na atmosfera e dá outras providências.
29-9-1981	DN COPAM n. 07	Fixa normas para disposição de resíduos sólidos.
12-1-2009	Lei Estadual n. 18.031	Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos.
17-1-1990	Lei Estadual n. 10.100	Dá nova redação ao artigo 2º da Lei n. 7.302, de 21 de julho de 1978, que dispõe sobre a proteção contra a poluição sonora no Estado de Minas Gerais.
21-7-1978	Lei Estadual n. 7.302	Dispõe sobre a proteção contra a poluição sonora no Estado de Minas Gerais.
Nacional		
2-8-2010	Lei n. 12.305	Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências.
26-4-2002	Lei n. 10.438	Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis n. 9.427, de 26 de dezembro de 1996, n. 9.648, de 27 de maio de 1998, n. 3.890-A, de 25 de abril de 1961, n. 5.655, de 20 de maio de 1971, n. 5.899, de 5 de julho de 1973, n. 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências. (revisada pela Lei n. 11.075/2004).
15-3-2004	Lei n. 10.848	Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as leis n. 5.655, de 20 de maio de 1971, n. 8.631, de 4 de março de 1993, n. 9.074, de 7 de julho de 1995, n. 9.427, de 26 de dezembro de 1996, n. 9.478, de 6 de agosto de 1997, n. 9.648, de 27 de maio de 1998, n. 9.991, de 24 de julho de 2000, n. 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências.
11-11-2003	Lei n. 10.762	Dispõe sobre a criação do programa emergencial e excepcional de apoio as concessionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica, altera as leis n. 8.631, de 4 de março de 1993, n. 9.427, de 26 de dezembro de 1996, n. 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências.
30-12-2004	Lei n. 11.075	Dispõe sobre a criação de cargos em comissão do grupo-direção e assessoramento superiores – DAS, no âmbito do Poder Executivo Federal, e da nova redação a dispositivos das leis n. 10.438, de 26 de abril de 2002, n. 10.683, de 28 de maio de 2003, e n. 10.848, de 15 de março de 2004.
30-7-2004	Decreto n. 5.163	Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. (redação alterada pelo Decreto n. 6.048/2007).
27-2-2007	Decreto n. 6.048	Altera os arts. 11º, 19º, 27º, 34º e 36º do Decreto n. 5.163, de 30 de julho de 2004, que regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica.
16-12-1980	Lei n. 6.894	Dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, destinados à agricultura, e dá outras providências.
23-12-2010	Decreto n. 7.404	Regulamenta a Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências.
14-1-2004	Decreto n. 4.954	Aprova o regulamento da Lei n. 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura, e dá outras providências.
3-7-2007	Resolução Normativa ANEEL n. 271	Altera a redação dos arts. 1º e 3º da Resolução Normativa n. 77, de 18 de agosto de 2004.
18-10-2004	Resolução Normativa ANEEL n. 77	Estabelece os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos hidroelétricos e aqueles com fonte solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, com potência instalada menor ou igual a 30.000 kW.
14-11-2006	Resolução Normativa ANEEL n. 235	Estabelece os requisitos para a qualificação de centrais termelétricas cogeneradoras de energia e dá outras providências.
29-4-2005	Resolução CONAMA n. 358	Dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos dos serviços de saúde e dá outras providências.
31-10-2006	Resolução CONAMA n. 380	Retifica a Resolução CONAMA n. 375/2006 - Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e

seus produtos derivados, e dá outras providências.		
Data	Norma	Assunto
Nacional		
29-10-2002	Resolução CONAMA n. 316	Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos.
8-3-1990	Resolução CONAMA n. 001	Dispõe sobre critérios e padrões de emissão de ruídos, das atividades industriais.
28-6-1990	Resolução CONAMA n. 003	Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR.
6-12-1990	Resolução CONAMA n. 008	Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR.
26-10-1999	Resolução CONAMA n. 264	Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos.
26-10-2006	Resolução CONAMA n. 382	Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas.
22-12-2011	Resolução CONAMA n. 436	Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 2 de janeiro de 2007.
17-3-2005	Resolução CONAMA n. 357	Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.
3-4-2008	Resolução CONAMA n. 397	Altera o inciso II do parágrafo 4º e a Tabela X do parágrafo 5º, ambos do art. 34 da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA n. 357, de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.
3-4-2008	Resolução CONAMA n. 396	Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.
15-6-1989	Resolução CONAMA n. 005	Dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR.
29-10-2006	Resolução CONAMA n. 375	Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências.
7-12-2004	Resolução RDC n. 306	Dispõe sobre o Regulamento Técnico para o gerenciamento de resíduos de serviços de saúde.
5-6-2006	IN SDA/MAPA n. 27	Estabelece limites de agentes fitotóxicos, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas admitidas nos fertilizantes, corretivos, condicionadores de solo e substrato para plantas.
23-7-2009	IN SDA/MAPA n. 25	Aprova as normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura.

Normas Técnicas		
Ano	Norma	Assunto
2004	ABNT NBR 10.004	Resíduos Sólidos – Classificação.
2000	ABNT NBR 10.151	Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando conforto da comunidade – Procedimento.
2004	ABNT NBR 10.006	Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.
2004	ABNT NBR 10.007	Amostragem de resíduos sólidos.
2004	ABNT ISSO 14.001	Sistema de gestão ambiental – Requisitos com orientações para uso.

ANEXO 2 - EFEITOS ADVERSOS DE ALGUNS POLUENTES GERADOS NO PROCESSO DE TRATAMENTO

TÉRMICO

Material particulado (MP)

Há relatos de riscos de mortalidade cardiovascular e respiratória, a longo e curto prazo. Alguns estudos sugerem que uma parte do aumento da mortalidade pode estar associada com exposições simultâneas de MP e de outros poluentes críticos, como SO₂. Os relatórios recentes dos “estudos de corte prospectivo” de longo prazo de exposições a material particulado no ambiente provam substancial associação entre o aumento do risco de câncer de pulmão e MP, em especial a exposição a MP fino ou seus componentes.

Efeitos sobre as condições de visibilidade na atmosfera podem afetar inclusive o clima, absorvendo as radiações solares e impedindo que elas atinjam a superfície terrestre, ocasionando, portanto, um resfriamento. Afeta ainda os materiais e as superfícies (por exemplo, vegetação, edificações e monumentos históricos), contribuindo para prejudicar a qualidade dos recursos ambientais e para reduzir a vida útil de materiais.

Ácido clorídrico ou Cloreto de hidrogênio (HCl)

É corrosivo para os olhos, pele e membranas mucosas. A exposição à inalação aguda pode causar irritação aos olhos, nariz e trato respiratório e inflamação e edema pulmonar em seres humanos. Exposição ocupacional crônica por HCl tem sido reportada como causa de gastrite, bronquite e dermatites em trabalhadores. A exposição prolongada à baixa concentração pode também causar descoloração dental e erosão. Não há informações disponíveis sobre os efeitos do HCl à reprodução ou ao desenvolvimento em seres humanos. A USEPA não classificou o HCl para a carcinogenicidade.

Contribui para a formação de chuvas ácidas. Os efeitos das chuvas ácidas sobre o solo, vegetação e lagos são difíceis de quantificar, mas há alguns exemplos de morbidez acelerada de florestas, alteração das condições biológicas das águas em lagos, impactos sobre edificações e monumentos ou objetos históricos, especialmente aqueles constituídos de materiais a base de carbonatos (mármore, calcário, dolomita), bem como certos metais (ferro, zinco), vidros alcalinos, papel, couro e algodão.

Gás Cloro (Cl₂)

A exposição aguda a níveis elevados de cloro em seres humanos pode provocar dores no peito, vômitos, pneumonia tóxica e edema pulmonar. Em níveis mais baixos, é um potente irritante para os olhos, o trato respiratório superior e os pulmões. A exposição crônica ao cloro gasoso em trabalhadores resultou em efeitos respiratórios, irritação na garganta e olhos e obstrução ao fluxo aéreo. Não há informações disponíveis sobre os efeitos cancerígenos em seres humanos devido à exposição ao cloro por inalação.

Monóxido de carbono (CO)

É um gás incolor, inodoro e insípido, um pouco menos denso que o ar. Os efeitos sobre a saúde advêm de sua grande afinidade para com a hemoglobina do sangue, que é 240 vezes maior do que a desta para com o oxigênio. Mesmo em pequenas concentrações, o CO pode prejudicar a oxigenação dos tecidos. A formação do complexo CO/hemoglobina é reversível e, portanto, o controle da exposição deve levar em conta a exposição aguda.

O CO é pouco solúvel na água e não é removido da atmosfera apreciavelmente através da precipitação úmida. Os mecanismos mais atuantes na remoção do CO são, por um lado, a oxidação a CO₂, que não ocorre diretamente em velocidades expressivas à temperatura ambiente, mas pode ser catalisada por processos fotoquímicos. A deposição seca (absorção no solo e nos seres vivos) parece ser também um mecanismo relevante.

Dioxinas e furanos

A toxicidade da 2,3,7,8-TCDD (tetraclorodibenzodioxina) é muito variável para diferentes tipos de animais. Para seres humanos, em vários estudos epidemiológicos com pessoas expostas à mistura de dioxinas, furanos e outros produtos químicos, observou-se o aumento da incidência de câncer em diferentes locais do organismo. Em relação ao desenvolvimento de tumores malignos, a USEPA concluiu que há evidências disponíveis de que a TCDD exerce seu efeito carcinogênico, primariamente através de sua efetividade como agente promotor de estimulação de replicação de células de maneira reversível, e inibindo apoptose (morte natural de uma célula), não sendo a TCDD, porém, um carcinógeno completo. Entretanto, a 2,3,7,8-TCDD, sob certas condições de exposição, é capaz de aumentar a incidência de câncer em seres humanos, merecendo a classificação pela USEPA de provável carcinogênico humano.

Como resultado, as pesquisas indicam o grande espectro de consequências à saúde creditadas às dioxinas que incluem cânceres, efeitos reprodutivos e no desenvolvimento, deficiência imunológica, disrupção endócrina incluindo diabetes mellitus, níveis de testosterona e do hormônio da tireóide alterados, danos neurológicos incluindo alterações cognitivas e comportamentais em recém-nascidos de mães expostas à dioxina, danos ao fígado, elevação de lipídios no sangue, o que se constitui em fator de risco para doenças cardiovasculares e danos à pele (APHA, 1995 apud ASSUNÇÃO, 1999 apud CEMIG GT e FEAM, 2010).

As rotas de exposição incluem exposição direta pelas emissões atmosféricas e de chaminés e exposição indireta pela contaminação do solo e produtos alimentícios, água e outros.

A maior fonte de dioxina é a da alimentação. Como a dioxina é solúvel na gordura, há bio-acumulação na cadeia alimentar e é encontrada principalmente na carne e no leite. Através da parte gordurosa dos animais ela se acumula, podendo atingir o topo da cadeia alimentar. A principal via parece ser ar-vegetais até atingir os humanos ou outros animais. Nos peixes, a principal rota de exposição é a água. Plantas e animais são expostos principalmente através de particulados suspensos no ar. As partículas sedimentam na vegetação que pode servir de alimento para animais, podendo passar para o homem (ASSUNÇÃO, 1999 apud CEMIG GT e FEAM, 2010).

Mercurio (Hg)

Existe em 3 formas: elementar, compostos inorgânicos (principalmente cloreto de mercúrio) e compostos orgânicos (principalmente metil mercúrio). Cada forma exibe diferente efeito à saúde. Exposição aguda a altos níveis de mercúrio elementar em humanos resulta em efeitos no sistema nervoso central, tais como tremores, alterações de humor e diminuição da função do nervo sensorial e motor. A exposição crônica também afeta o sistema nervoso central, com efeitos tais como aumento da excitabilidade, irritabilidade, timidez excessiva e tremores. Exposição a alta inalação pode também causar danos nos rins e efeitos no trato gastrointestinal e sistema respiratório. Exposição aguda a mercúrio inorgânico por via oral pode resultar em efeitos, tais como náusea, vômito e dor abdominal intensa. O dano renal é o maior efeito da exposição crônica ao mercúrio inorgânico.

Cádmio (Cd)

Em seres humanos os efeitos agudos da inalação consistem principalmente de efeitos sobre os pulmões, tais como irritação pulmonar. A exposição crônica por inalação ou oral conduz a uma acumulação de cádmio nos rins que podem causar doenças renais. Tem demonstrado ser uma substância tóxica no desenvolvimento dos animais, resultando em malformações fetais e outros efeitos, mas não existe prova concludente nos seres humanos. Uma associação entre a exposição ao cádmio e um risco aumentado de câncer de pulmão tem sido relatada em estudos com seres humanos, mas estes estudos não são conclusivos, devido a fatores de confusão.

Arsênio (As)

A exposição aguda por inalação de alto nível de poeira ou fumos de As resulta em efeitos gastrointestinais (náuseas, diarreias, dor abdominal) e desordem nos sistemas nervoso central e periférico. A exposição crônica por inalação de As inorgânico em humanos está associada com a irritação da pele e membranas mucosas. Os dados em humanos sugerem uma relação entre exposição à inalação de mulheres que trabalham em fundições de metal, ou que vivem perto dessas instalações, e um risco aumentado de efeitos reprodutivos, como abortos espontâneos. Exposição ao As inorgânico em seres humanos por via inalatória tem demonstrado ser fortemente associado ao câncer de pulmão, enquanto que a ingestão de As inorgânico por seres humanos tem sido associada a uma forma de câncer de pele e também a câncer de bexiga, fígado e pulmão.

Chumbo (Pb)

É um elemento muito tóxico, causando uma variedade de efeitos mesmo em pequenas doses. Lesões cerebrais, lesões nos rins e distúrbios gastrointestinais podem ocorrer a partir de exposição aguda a níveis elevados de Pb em seres humanos. A exposição crônica ao Pb resulta em efeitos no sangue, sistema nervoso central, pressão arterial e nos rins. Crianças são particularmente sensíveis aos efeitos crônicos do Pb, com baixo desenvolvimento cognitivo, diminuição do crescimento, dentre outros. Há relatos de efeitos sobre a reprodução, tais como diminuição da contagem de esperma nos homens e aborto espontâneo em mulheres.

Cromo (Cr)

Pode ser emitido em duas formas, o cromo trivalente (Cr^{+3}) ou hexavalente (Cr^{+6}). O trato respiratório é o principal órgão alvo para a toxicidade do Cr^{+6} , para exposição aguda e crônica por inalação. Falta de ar, tosse e chiado no peito foram relatos da exposição aguda ao Cr^{+6} , enquanto as perfurações e ulcerações do septo, bronquite, redução da função pulmonar, pneumonias respiratórias e outros efeitos foram observados a partir da exposição crônica. Estudos limitados a humanos sugerem que a exposição ao Cr^{+6} por inalação pode ser associada a complicações durante a gravidez e o parto. Os estudos em seres humanos e animais têm claramente estabelecido que a inalação de Cr^{+6} é uma substância cancerígena, resultando em um aumento do risco de câncer de pulmão. O Cr^{+3} , menos tóxico que o Cr^{+6} , é um elemento essencial aos seres humanos na ingestão de 50 a 200 μg /dia recomendada para um adulto; o organismo pode desintoxicar certa quantidade de Cr^{+6} para Cr^{+3} . O trato respiratório é também o órgão principalmente afetado pela toxicidade Cr^{+3} .

Berílio (Be)

A poeira de berílio entra no ar a partir da queima de carvão e petróleo. Pode ser prejudicial se inalado, e os efeitos dependem dos níveis de exposição e duração. Se os níveis no ar são suficientemente altos, podem resultar em uma condição aguda que se assemelha à pneumonia e é chamada de “doença aguda berílio”. A exposição em longo prazo pode aumentar o risco de desenvolvimento de câncer de pulmão. O berílio não se acumula na cadeia alimentar.

Óxidos de enxofre (SO_x): dióxido de enxofre (SO_2) e trióxido de enxofre (SO_3)

Os efeitos adversos sobre a saúde humana decorrem essencialmente da formação de ácido sulfuroso e ácido sulfúrico quando da absorção dos poluentes na superfície úmida das mucosas, especialmente nas vias aéreas superiores. Os efeitos mais graves do SO_x são observados em combinação com a presença de partículas, no chamado “*smog* londrino”. Além disso, acredita-se que especialmente as partículas contendo metais possam favorecer a oxidação do SO_2 , na medida em que atuam como catalisadoras da reação. Em virtude desse efeito, a Resolução CONAMA n. 03/1990 estabelece também limites para os episódios críticos de poluição através do produto dos parâmetros Partículas Totais em Suspensão e SO_2 . Apresentam ainda elevado grau de agressividade contra praticamente todos os materiais, inclusive a vegetação e animais, e estão envolvidos nos processos de formação das chamadas “chuvas ácidas” (MELO, 1995 apud CEMIG GT e FEAM, 2010).

Óxidos de nitrogênio (NO_x): monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2)

A relevância ambiental do NO_x decorre principalmente de seus efeitos de absorção direta no organismo humano provocando a formação de ácidos, e consequente irritação dos olhos e das mucosas nas vias respiratórias. Nos pulmões, os óxidos nítricos provocam acúmulo de líquidos, edemas e danos aos tecidos. Outros efeitos indiretos dos NO_x são a participação ativa em diversos processos atmosféricos, em especial nos processos de oxidação fotoquímica (“*smog* fotoquímico”) e nas chuvas ácidas (MELO, 1995 apud CEMIG GT e FEAM, 2010).

Hidrocarbonetos totais (HCT)

O termo é utilizado para designar toda uma classe de substâncias que apresenta como característica em comum a capacidade de serem detectadas pelo detector de ionização de chama (FID), que pode ser considerado como um contador de átomos de carbono organicamente ligados. Trata-se, portanto, de um parâmetro, que se mede através de um método de ensaio, e não por um método de análise. Embora a medida de concentração total de hidrocarbonetos seja útil para quantificar a contaminação do ar por compostos orgânicos, esse parâmetro é pouco indicativo do verdadeiro grau de contaminação. Compostos praticamente inofensivos à saúde e pouco reativos nos processos fotoquímicos, como o metano, são considerados em igualdade com compostos tóxicos e cancerígenos, como, por exemplo, o benzeno e o butadieno, ou com compostos mais reativos nos processos fotoquímicos, como os aldeídos. Em virtude disso, as emissões de hidrocarbonetos e a presença deles na atmosfera vêm sendo cada vez mais quantificadas através da medição dos VOCs, e não dos hidrocarbonetos totais (MELO, 1995 apud CEMIG GT e FEAM, 2010).

Fonte: CEMIG GT e FEAM (2010).

ANEXO 3 - PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE SISTEMAS DE TRATAMENTO/CONTROLE DE EFLUENTES ATMOSFÉRICOS

Os sistemas de tratamento/controle de efluentes atmosféricos visam reduzir a emissão de poluentes para a atmosfera, de forma a permitir o atendimento aos padrões de emissão de fontes fixas e de qualidade do ar estabelecidos pelo Órgão Ambiental competente.

Esses sistemas associam quase sempre mais de um equipamento, sendo que os controles operacionais no processo de combustão também permitem reduções de alguns poluentes, como CO, NO_x e material particulado.

Basicamente, há equipamentos para remoção de material particulado e contaminantes gasosos, devendo os seguintes fatores serem considerados em sua escolha:

- concentração e tamanho das partículas do contaminante;
- grau de purificação exigida;
- características do ar ou gás transportador do poluente.

Para o funcionamento dos equipamentos de remoção é necessária a utilização de energia elétrica e também de água no caso de depuradores úmidos.

1. EQUIPAMENTOS PARA REMOÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO

São classificados de acordo com seu princípio físico ou mecânico de funcionamento:

- ação de filtração através de um meio poroso: filtros de tecido e de carvão ativado;
- ação de forças de inércia: coletores inerciais;
- ação da gravidade: coletores gravitacionais;
- ação das forças centrífugas: coletores centrífugos, conhecidos como ciclones;
- ação de umedecimento ou lavagem pela água ou soluções: depuradores e lavadores de gases (*scrubbers*);
- ação de ionização e atração eletrostática: precipitadores eletrostáticos.

Os filtros de tecidos empregados em processos de tratamento térmico são denominados de filtros de mangas, pois se apresentam sob a forma de mangas, sendo que a temperatura dos gases interfere na

escolha do tecido desses filtros e a umidade dos gases pode empastar ou obstruir a passagem do ar ou das partículas.

Os coletores inerciais e gravitacionais, e mesmo os centrífugos, em geral são utilizados para coletar as partículas de maior tamanho e elevado peso específico, funcionando como pré-coletores, de modo a reduzir a carga de coleta no coletor principal. Requerem pouca potência dos ventiladores, são fáceis de construir, de baixo custo e podem ser usados com gases em temperaturas mais elevadas.

2. EQUIPAMENTOS PARA REMOÇÃO DE CONTAMINANTES GASOSOS

Utilizam os seguintes fenômenos ou operações físicas:

- absorção por um líquido no qual o gás seja solúvel: torres de enchimento, torres de prato, torres de borriço, absorvedores tipo Venturi e outros;
- adsorção de poluentes por certas substâncias de alta porosidade pela ação de forças de atração moleculares superficiais: carvão ativado, alumina ativada e sílica-gel;
- incineração de resíduos gasosos, desde que os gases resultantes não sejam também poluidores: queimadores de chama direta, *flares* e pós-queimadores catalíticos;
- condensação de vapores por resfriamento: condensadores.

Os materiais particulados podem também ser removidos por equipamentos para os contaminantes gasosos, entretanto, é recomendável que sejam antecidos por coletores mecânicos para pré-depuração, minimizando a contaminação das águas de lavagem.

Apresentam-se na Tabela 19 algumas características gerais de equipamentos de depuração dos efluentes atmosféricos.

Tabela 19 - Características gerais de equipamentos de depuração dos efluentes atmosféricos.

Equipamento	Diâmetro das partículas (μm)	Eficiência global típica (%)	Temperatura máxima do gás ($^{\circ}\text{C}$)	Investimento de capital ²	Custo de operação ²
Ciclone ¹	> 10	85	500	1	1
Torres de atomização	> 3	95	200 - 250	2	2 - 3
Lavador tipo Venturi	> 0,3 - 1,0	99	200 - 250	2 - 3	3 - 4
Filtro de mangas	> 0,5 - 1,0	99	200 - 250	8 - 10	2 - 3
Precipitador eletrostático	> 0,001	99	500	10 - 15	1 - 2

(1) o uso de multiciclone permite partículas a partir de 5 μm e o rendimento alcança 95%.

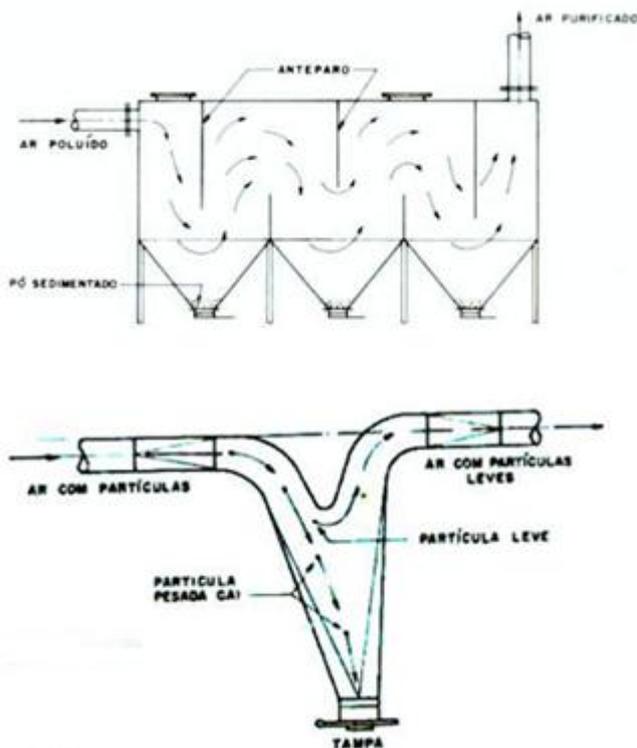
(2) Valor de cada equipamento referenciado em relação a quantas vezes é maior que de um ciclone

Fonte: Adaptado de Lora (2011).

Na escolha do tipo e dos materiais dos equipamentos devem ser consideradas também as seguintes propriedades do gás carregado de contaminantes:

- viscosidade - influi na potência requerida do equipamento mecânico e no rendimento da operação de coleta;
- combustibilidade - caso o gás carreador seja inflamável ou explosivo, aconselha-se o emprego de lavadores e depuradores e não os precipitadores eletrostáticos;
- agressividade química - os gases e vapores carreados não devem reagir com o material que constitui os filtros, dutos e equipamentos.

Apresentam-se nas Figuras 24 e 25 as representações esquemáticas de coletor de câmara gravitacional, ciclone e filtro de mangas.



Princípios de funcionamento
(MACINTYRE, 1990)

Câmara gravitacional:

A velocidade do fluxo gasoso é reduzida ao entrar na câmara, devido sua maior dimensão em relação à do duto de entrada, permitindo a deposição de partículas relativamente grandes (100–200 μm) pelo seu peso.

Câmara inercial:

As partículas, devido a sua inércia, tendem a conservar sua trajetória retilínea, mas a direção do fluxo gasoso é desviada na câmara causando a deposição das partículas (50 a 200 μm), conforme o tipo e tamanho do coletor.

Figura 24 - Representações esquemáticas de coletores de câmaras gravitacionais múltiplas e inerciais.
Fonte: Macyntyre (1990).

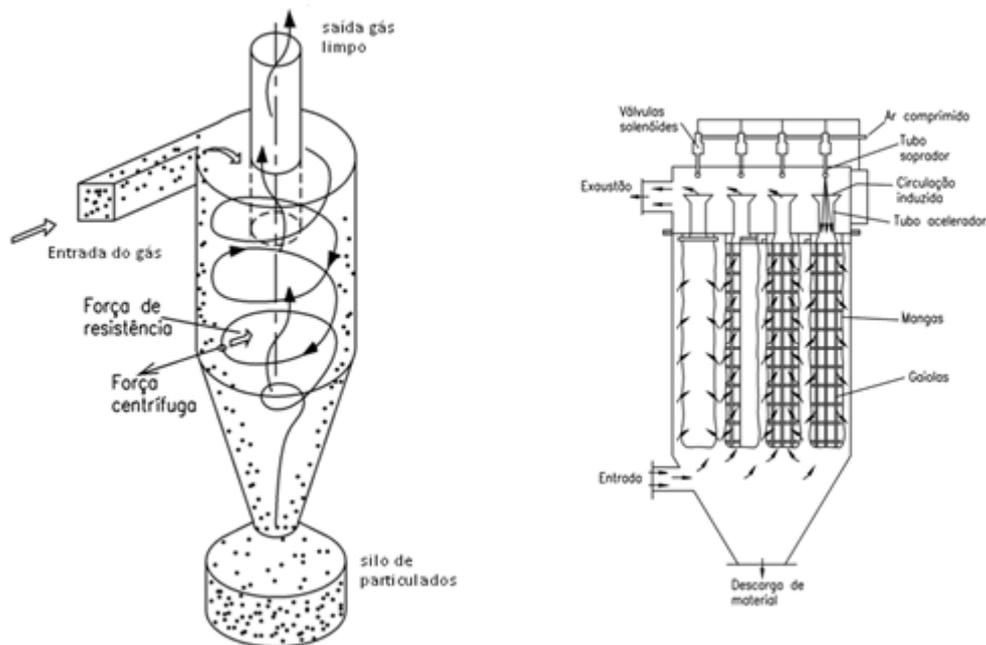


Figura 25 - Representação esquemática de ciclone e de filtro de mangas do tipo de jato de pressão.
Fonte: Lora (2011).

Os ciclones, para partículas finas têm diâmetros menores e maiores comprimentos que os destinados a partículas relativamente grandes, a fim de possibilitar um número maior de rotações do ar no seu interior, antes de atingir a boca de saída. A eficiência de coleta é maior utilizando multiclones, pois o fluxo gasoso se divide entre dois ou mais ciclones, permitindo que estes possam ter diâmetros pequenos e redução da velocidade do fluxo, acarretando menor perda de carga.

As mangas utilizadas como meio filtrante para gases a altas temperaturas empregam tecidos especiais, geralmente fibras de polímeros (Figura 26), que possuem diferentes propriedades químicas, físicas e mecânicas, fazendo com que o meio filtrante ideal seja determinado para cada aplicação.

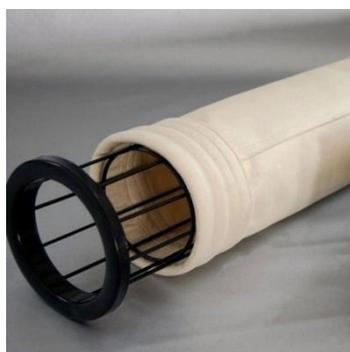


Figura 26 – Foto de uma manga de tecido especial Ryton.
Fonte: Jiangsu (2011).

Apresentam-se na Tabela 20 as características de alguns tecidos usados em filtros de mangas.

Tabela 20 – Características de alguns tecidos usados em filtros de mangas.

Tecido	Temperatura de fusão (°C)	Temperatura máxima de operação (°C)	Resistência		
			a ácidos	a alcalinos	à abrasão (desgaste por fricção)
Algodão	150 (decompõe)	82	pequena	regular	boa
Lã	300 (queima)	93	Muito boa	pequena	razoável a boa
Fibra de vidro	800	288	razoável a boa	razoável a boa	razoável
Náilon 6.6	249	93	razoável	excelente	excelente
Orlon¹	317* (amolece a 250)	127	boa a excelente em ácidos minerais	razoável a boa em álcalis fracos	boa
HT-1²	371 (queima)	204	melhor que o náilon, não tão boa quanto o orlon e o dracon	pioor que o náilon, melhor que o dracon e o orlon	boa
Dracon³	252	135	boa para a maioria dos ácidos minerais. Dissolve-se em ácido sulfúrico	boa em álcalis fracos. Razoável em álcalis fortes	muito boa
Polipropileno	167	93	excelente	excelente	excelente
Terlon²	400 (decompõe)	232 (emite gases tóxicos)	Inerte, com exceção do flúor	inerte, com exceção do cloro, trifluoreto e metais alcalinos	razoável
Poliéster	250 - 270*	110	muito boa	boa	muito boa
Teflon⁴	327*	260 - 280	inerte	inerte	baixa
Ryton⁵	285*	190 - 200	excelente	excelente	boa

(1) nome comercial de poliácilonitrila produzida pelo fabricante DuPont

(2) nomes comerciais de poliamidas aromáticas produzidas por dois fabricantes

(3) nome comercial de poliéster produzido pelo fabricante DuPont

(4) nome comercial de politetrafluoretileno (PTFE) produzido pelo fabricante DuPont (CERON, 2011)

(5) nome comercial de polisulfeto de fenileno (PPS) produzido pelo fabricante Philips (JIANGSU, 2011).

Fonte: Adaptado de Macyntyre (1990); (*) Mano (1991).

Apresenta-se na Figura 27 a representação esquemática de precipitador eletrostático.

Princípio de funcionamento:

Eletrodos de descarga são submetidos a elevada tensão (30.000 a 75.000 volts), fazendo com que elétrons saiam destes e bombardeiem as moléculas de gás próximas ao mesmo, gerando uma corrente de íons gasosos negativos entre os fios dos eletrodos de descarga e as placas coletoras.

À medida que as partículas de poeira conduzidas pelo gás atravessam essas passagens, elas se chocam com os íons e se carregam negativamente, dirigindo-se rapidamente às placas coletoras, ficando retidas por intensas forças eletrostáticas.

As partículas de poeira vão se acumulando sobre as placas, aumentando a resistência da passagem da corrente entre o fio e a placa. Sob a ação de seu peso ou de dispositivos como vibradores ou batidas nos coletores, fragmentos de partículas acumuladas nas placas caem numa tremonha para serem removidos.

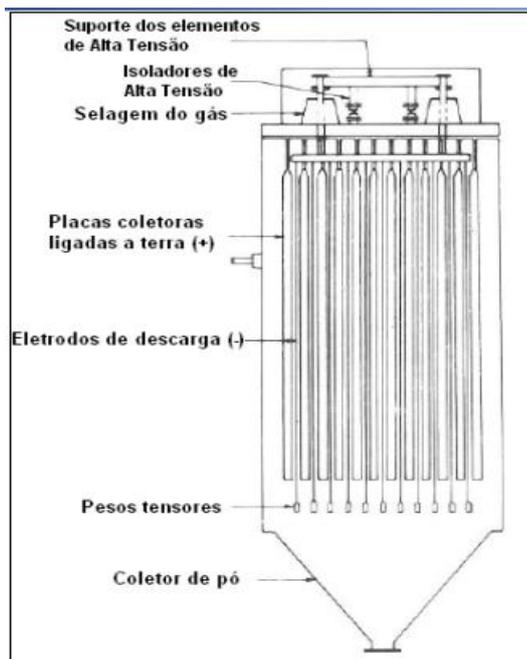


Figura 27 - Representação esquemática de precipitador eletrostático.

Fonte: Macyntyre (1990).

A eficiência de um precipitador eletrostático depende da resistividade elétrica das partículas, da velocidade do fluxo gasoso, da intensidade do campo elétrico e da forma e área dos eletrodos. Valores ideais de resistividade elétrica estão na faixa de 2×10^8 a $2 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$, sendo que resistividades elevadas podem ser reduzidas pela adição, ao efluente gasoso, de compostos de enxofre e/ou de vapor de água (SIGNORETTI, 2008).

Em plantas de incineração de RSU têm sido utilizados precipitadores eletrostáticos ou filtros de mangas em fibra de vidro com tratamento antiácido de teflon, que resistem até 250 °C por cerca de 2 anos. É também possível a adoção desses equipamentos conjugados.

Apresentam-se na Figura 28 as representações esquemáticas de lavadores úmidos de gases, que são utilizados para a remoção de grande variedade de contaminantes, que dependem do tipo de líquido de lavagem utilizado, e nestes ocorre também uma retenção inicial do material particulado inerte.

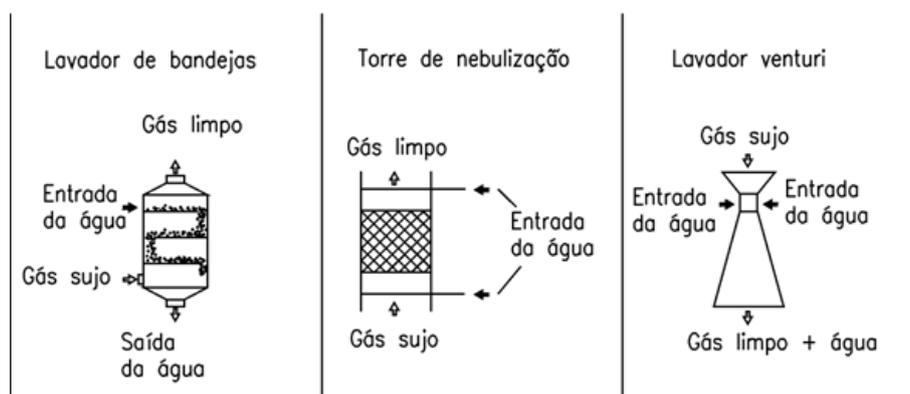


Figura 28 - Representação esquemática de lavadores úmidos de gases.
Fonte: Lora (2011).

A lavagem alcalina, geralmente com soda cáustica (NaOH), neutraliza os poluentes ácidos (como HCl e HF) e contribui para retenção de outros poluentes (como NO_x e SO_x), por meio de reação em ambiente com pH alto (CAIXETA, 2005). A conclusão da remoção da parte muito fina de particulados (menor de 0,7 µm) é feita em lavador de aerossóis ou em filtros de manga (MENEZES, GERLACH e MENEZES, 2000).

Utilizando os lavadores úmidos, haverá sempre a necessidade de tratamento dos efluentes líquidos gerados.

O controle dos gases ácidos pode também ser realizado com o pulverizador de absorvente seco (*Spray Dry Absorber* - DAS) com o emprego de cal (CaO), e a injeção de adsorvente seco (*Dry Sorbent Injection* - DSI), onde normalmente usa-se a cal hidratada (Ca(OH)₂) ou o bicarbonato de sódio (NaHCO₃) diretamente na câmara de combustão com o resíduo a ser incinerado (CAIXETA, 2005).

3. SISTEMAS APLICÁVEIS AOS PRINCIPAIS CONTAMINANTES

3.1 Monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos não queimados (UHC)

O monóxido de carbono — gás incolor, inodoro e muito tóxico, que não pode ser eliminado por lavadores de gases — e os hidrocarbonetos não queimados surgem da combustão incompleta de combustível orgânico —devido ao uso de combustíveis ricos em hidrocarbonetos ou à inadequada mistura de ar e combustível —, indicando, portanto, a qualidade da combustão.

Ambos os poluentes são oxidados a CO₂ e água, quando a combustão é realizada com suficiente excesso de ar, tempo de residência suficiente e turbulência adequada dos gases no interior da câmara.

O grande desafio tecnológico é conciliar a emissão de CO e UHC com a emissão de NO_x, pois os três parâmetros atuam de forma divergente, conforme verifica-se na Figura 29.

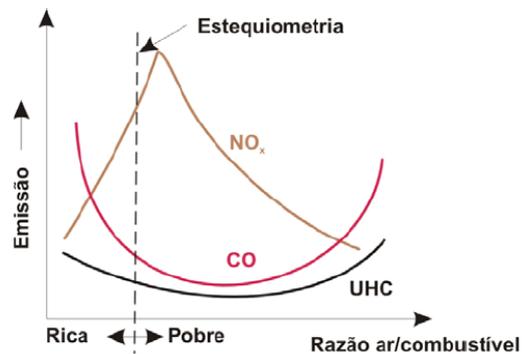


Figura 29 - Comportamento qualitativo entre as emissões de CO, NO_x e UHC – turbina a gás.
Fonte: Signoretti (2008).

3.2 Óxidos de nitrogênio (NO_x)

Em relação aos óxidos de nitrogênio, são relevantes o NO formado nas regiões de alta temperatura do equipamento e o NO₂ que se forma em regiões de baixa temperatura, a partir do óxido nítrico.

A formação de NO_x é determinada por três fatores: temperatura no núcleo da chama, teor de nitrogênio no combustível e excesso de ar durante a combustão.

Os métodos de controle das emissões de NO_x são do tipo pré-combustão (preventivos) e pós-combustão (corretivos), conforme Quadro 7.

Quadro 7 - Métodos preventivos e corretivos para redução da emissão de NO_x.

Tipo de método	Características
Métodos preventivos	
Recirculação dos produtos da combustão	Diminuição da temperatura e da concentração de oxigênio no núcleo da chama.
Combustão por etapas ou estagiada	
Queimadores com baixa emissão de NO _x	
Injeção de água e vapor	Queima de um hidrocarboneto acima da chama.
<i>Reburning</i> (reaquecimento)	
Combustão em leito fluidizado	Temperaturas de combustão menores que em sistemas convencionais para combustíveis sólidos pulverizados.
Métodos corretivos	
Redução Seletiva Não Catalítica – SNCR*	Redução do NO _x até N ₂ , sem a utilização de catalisador, por meio da injeção de amônia ou uréia em pastilhas ou líquida, em zona de alta temperatura dos gases, como acima do ponto de injeção de ar secundário na câmara de combustão (900 °C a 1.000 °C).
Redução Catalítica Seletiva – SCR*	Redução do NO _x em N ₂ , na presença de um catalisador, por meio da injeção de amônia em zona de baixa temperatura dos gases (200 °C a 300 °C), a jusante do principal sistema de tratamento de gases, garantindo melhores condições de funcionamento e estendendo consideravelmente a vida útil do catalisador.
Injeção de ozônio	Oxidação do NO para N ₂ O ₅ , considerando que dos NO _x é o único solúvel em água, podendo ser removido posteriormente pelos lavadores de gases.

(*) aplicam-se também para a redução de dioxinas e furanos.

Fonte: Adaptado de Lora (2011) e ENGEBIO (2010b).

Apresentam-se na Figura 30 representações esquemáticas dos métodos corretivos pelos processos SCR e SNCR.



Figura 30 – Representação esquemática dos processos de Redução Catalítica Seletiva (SCR) e Redução Não Catalítica Seletiva (SNCR).

Fonte: ENGEBIO (2010b).

Nos processos SNCR, melhores desempenhos requerem a injeção de excesso de amônia, o que impede a captura em processos secos ou semi-secos e polui o líquido em processos aquosos. O processo de lavagem dos gases com água faz com que seja possível a reciclagem dentro da caldeira do excesso de amônia presente nos gases.

Em geral, tem sido adotado nas plantas de incineração da Europa o sistema SNCR, mas apesar desse sistema ser mais caro, poderá vir a ser uma exigência legal, pois implica em menor emissão secundária de amônia, que também é um poluente sujeito a padrões de emissão.

3.3 Gases ácidos (como SO_x, HCl, HF)

Os reatores de neutralização de gases ácidos podem adotar sistemas úmido, semi-seco (pulverização de leite de cal) ou seco (injeção na câmara de combustão do adsorvente cal hidratada ou bicarbonato de sódio).

3.4 Metais pesados e dioxinas/furanos em carvão ativado

Os metais também são um tipo de material particulado que podem estar associados aos processos de combustão.

Para a adsorção de metais pesados e dioxinas/furanos injeta-se o carvão ativado no fluxo de gases de combustão antes do sistema de lavagem. Pode-se adicionar também o carvão ativado ao leite de cal do sistema semi-seco.

O processo de Redução Catalítica Seletiva é igualmente eficiente para destruir dioxinas e furanos. Neste, catalisadores específicos também são eficientes para oxidar o CO residual em CO₂.

No caso da incineração com aproveitamento energético não se aplica o sistema *quench* (resfriamento brusco dos gases até a temperatura de saturação para que evitar a formação de dioxinas/furanos), pois se utiliza o calor dos gases de combustão para geração de vapor na caldeira.

3.5 Material particulado (MP)

Os materiais particulados dos processos de tratamento térmico são as partículas de material sólido e líquido capazes de permanecer em suspensão, como é o caso da fuligem e das partículas de óleo.

Os equipamentos devem ser dimensionados considerando principalmente a granulometria e as características da carga a tratar, como vazão e temperatura.

Apresentam-se na Figura 31 as faixas típicas granulométricas das partículas e de aplicação dos equipamentos para remoção.

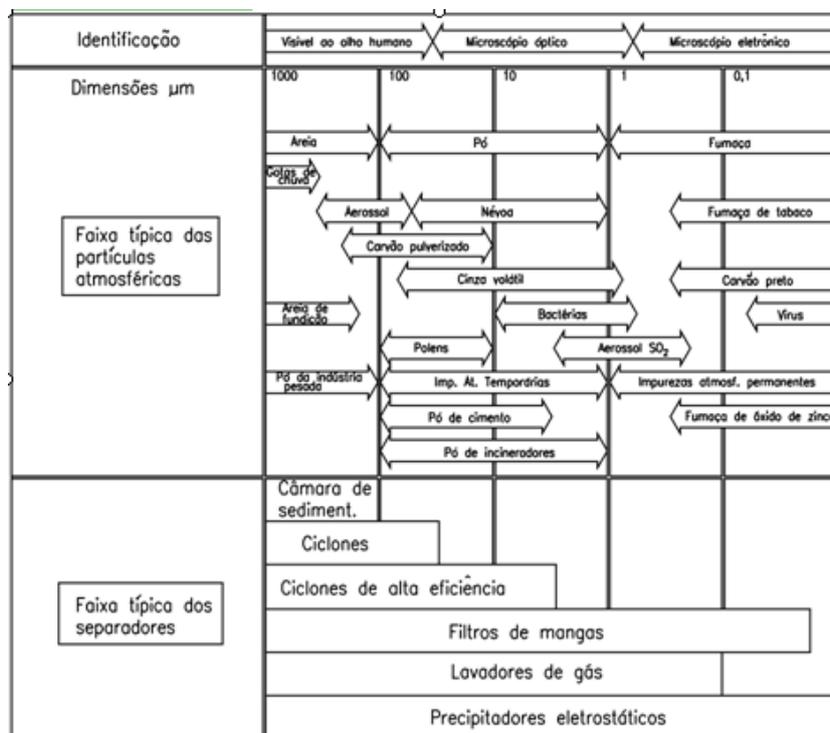


Figura 31 - Faixas típicas granulométricas das partículas e de aplicação dos equipamentos para remoção.
Fonte: Lora (2011).

4. PRINCÍPIOS DE SISTEMAS DE TRATAMENTO DE EMISSÕES ODORÍFERAS POR MÉTODOS BIOLÓGICOS

Existem várias técnicas para tratamento de emissões odoríferas: métodos físicos (adsorção em carvão ativado, absorção em lavadores com água pura), químicos (oxidação térmica, oxidação catalítica, lavadores químicos, ozonização) e biológicos (biolavadores, biopercoladores, biofiltros).

Os métodos físicos e químicos, devido à necessidade de adição de produtos químicos diariamente e da substituição do adsorvente, resultam em custo de operação relativamente alto quando comparados com métodos biológicos (CABRAL e BELLI FILHO, 2002).

No tratamento biológico os microorganismos utilizam os compostos orgânicos do efluente gasoso como fonte de carbono para sua biossíntese e como fonte de energia para a degradação do substrato.

Os métodos biológicos (Figuras 32 e 33) podem ser assim sintetizados (SILVA, 2008):

- biolavador: composto por uma coluna de troca gás/líquido e um biorreator; não dispondo de um meio suporte para fixação de microorganismos, no primeiro ocorre a absorção do poluente gasoso na fase líquida, sendo esta fase destinada ao biorreator, para degradação biológica dos compostos absorvidos, retornando em seguida à coluna. A principal desvantagem ocorre quando o poluente requer um tempo de residência maior para ser degradado;
- biopercolador: caracteriza-se pela presença de um meio suporte contendo microorganismos e pela circulação contínua de uma fase líquida de fluxo ascendente com os gases odorantes;
- biofiltro: caracteriza-se pela presença também de um meio suporte (sintético ou natural) enriquecido com microorganismos, mas sem circulação de uma fase líquida. Quando não há um sistema de distribuição de fase líquida, os gases odorantes devem ser umidificados previamente para evitar a secagem do leito orgânico.

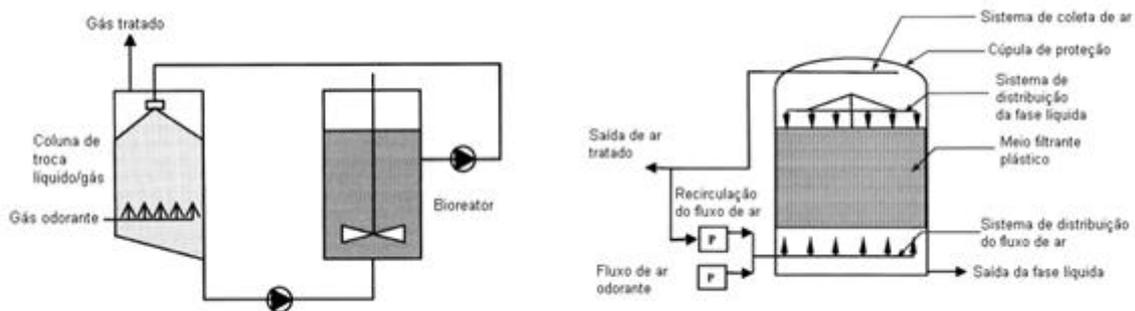


Figura 32 – Representações esquemáticas de um biolavador e de um biopercolador.
Fonte: Silva (2008).

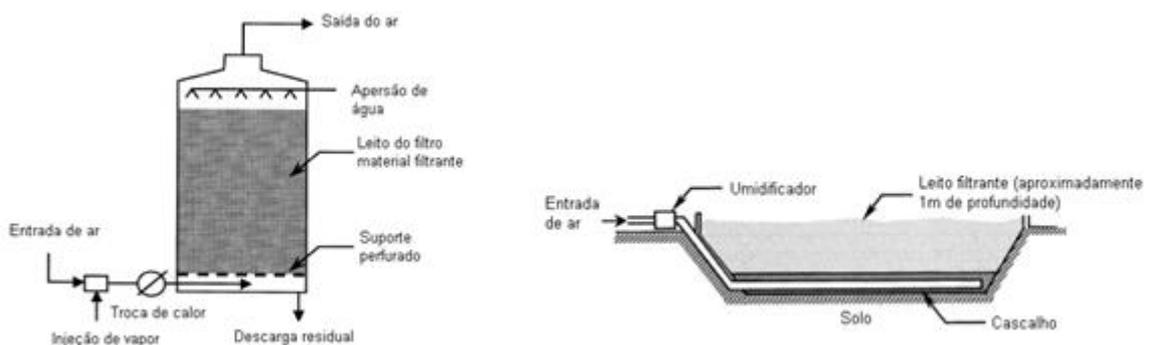


Figura 33 – Representações esquemáticas de biofiltros dos tipos fechado e aberto.
Fonte: Silva (2008).

O meio suporte deve ter como requisitos básicos suficiente porosidade e uniformidade de tamanho das partículas, grande área superficial e habilidade para suportar a microflora. Usualmente têm sido utilizados como meio suporte: solo, material proveniente de compostagem, bagaço de cana ou palha de café (SILVA, 2008).

No Quadro 8 estão listadas algumas vantagens e desvantagens dos métodos biológicos, que denotam a biofiltração como de baixo custo de investimento e operação mais simplificada.

Quadro 8 - Vantagens e desvantagens dos métodos biológicos.

Biolavador	Biopercolador	Biofiltro
Bom controle do processo	Limitado controle do processo*	Impossível controle do processo*
	Capacidade de controle do pH	Degradação de poluentes pouco solúveis em água
Uso de água*	Operação mais simplificada	
Capacidade de adição de nutrientes		-
Alta estabilidade	Limitado tempo de vida do leito*	
Alta transferência de massa	-	Baixa taxa do fluxo de gases*
Alto custo de investimento*	Baixo custo de investimento	
Adequado para alta concentração de poluentes nos gases	Adequado para contaminação moderada	Somente para poluentes de baixa concentração*
Produção excessiva de biomassa*	Canalização pode ser um problema*	Canalização do fluxo de gases*

(*) desvantagens

Fonte: Adaptado de Silva (2008).

O funcionamento dos métodos de biofiltração pode ser seriamente afetado pela presença de gases tóxicos aos microorganismos. Essa toxicidade pode ser devida à estrutura química desses compostos ou a sua concentração excessiva. Assim, uma caracterização tanto qualitativa, quanto quantitativa, do efluente é indispensável antes do dimensionamento dessas unidades (CABRAL e BELLI FILHO, 2002).

Os fatores ambientais como pH, temperatura e umidade estão diretamente relacionados com o bom funcionamento da biofiltração (CABRAL e BELLI FILHO, 2002):

- a maioria do crescimento biológico ocorre próximo ao pH 7 (neutro). Uma exceção é em relação às bactérias oxidantes do enxofre as quais prosperam em pH baixo;
- a temperatura ideal situa-se entre 15 °C e 40 °C; a queda da temperatura para menos de 10 °C causa uma perda parcial na eficiência do processo;
- a umidade é fundamental à sobrevivência e ao metabolismo dos microorganismos; pode ser assegurada por aspersão ou por injeção de vapor, sendo que a maioria utiliza a primeira solução.

A eficiência da remoção de compostos odoríferos (como NH₃ e H₂S) pode ser determinada por meio de análises químicas e olfatométrica.

ANEXO 4 - SISTEMAS INTEGRADOS PARA CONVERSÃO DE ENERGIA

A classificação das tecnologias de conversão de RSU em energia está associada à necessidade ou não de conversão dos resíduos antes de sua combustão. Assim, um primeiro grupo de tecnologias de conversão se baseia na combustão direta dos resíduos, enquanto o segundo se baseia na queima de combustíveis líquidos ou gasosos derivados dos resíduos.

No primeiro grupo estão as tecnologias que se baseiam nos ciclos a vapor (ciclo Rankine), com combustão direta dos resíduos. No segundo estão as tecnologias que geram gases combustíveis baseadas na gaseificação, pirólise ou digestão anaeróbia de resíduos, integradas às turbinas ou microturbinas a gás, motores de combustão interna ou células a combustível.

No ciclo Rankine (Figura 34), o vapor d'água que passa pela turbina, acoplada ao gerador elétrico, é condensado e retorna à caldeira para reinício do ciclo. Este ciclo utiliza uma turbina a vapor (Figura 35), que é uma máquina térmica de combustão externa (o combustível queima na caldeira, cedendo calor ao ciclo através do vapor), baseada na conversão de energia calorífica em energia cinética da seguinte forma: o vapor de alta pressão se expande, perdendo pressão e temperatura ao passar por um rotor dotado de paletas engastadas no mesmo, cedendo parte de sua energia ao rotor da turbina.

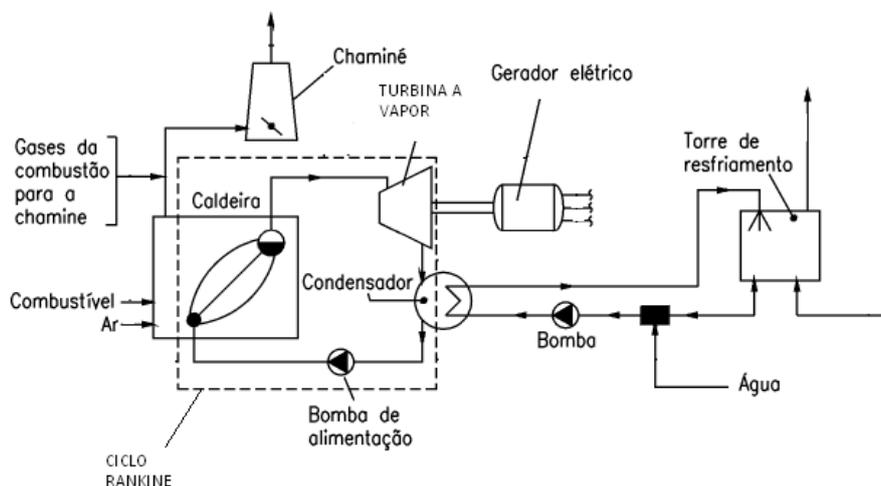


Figura 34 – Representação esquemática do ciclo Rankine de um sistema simples de potência a vapor.
Fonte: Nascimento (2011).

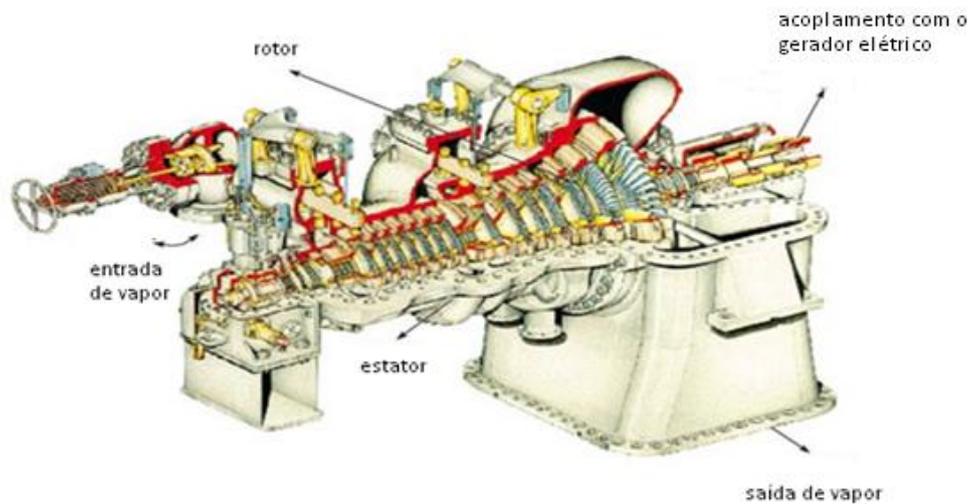


Figura 35 - Desenho esquemático de uma turbina a vapor.
Fonte: OPEN ENERGY (2011).

As termelétricas podem produzir apenas energia elétrica ou calor e energia elétrica/mecânica, mas, se adotada a cogeração, seu rendimento global aumenta, pois o vapor que passa pelas turbinas é utilizado em outros processos antes de ser condensado para posterior retorno à caldeira.

Nos sistemas de conversão dos RSU que geram gases combustíveis para a produção de energia elétrica, são utilizadas as turbinas a gás (ciclo Brayton), Figura 36, ou os motores de combustão interna (ciclo Otto), ambos acoplados a geradores elétricos.

A turbina a gás é composta por três partes: o compressor, que comprime o ar atmosférico até a câmara de combustão utilizando parte do trabalho mecânico da turbina; a câmara de combustão; e a turbina propriamente dita, na qual os gases de combustão se expandem realizando trabalho mecânico, que aciona o compressor. Os gases de exaustão saem da turbina a temperatura elevada (cerca de 550 °C).

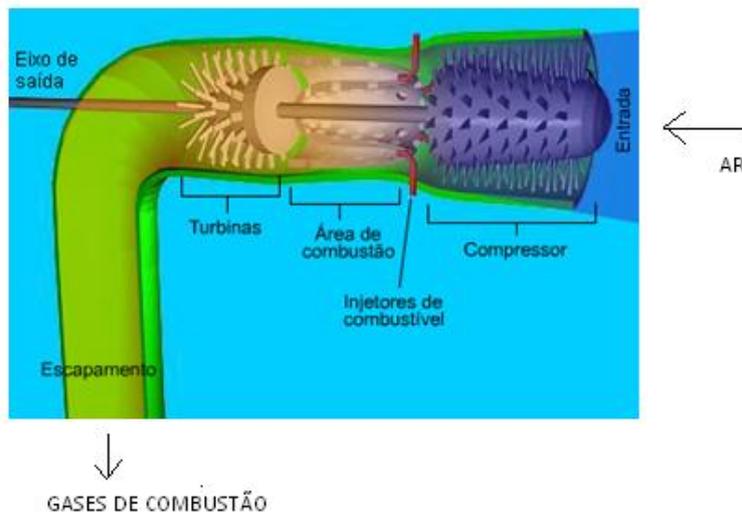


Figura 36 - Representação esquemática de uma turbina a gás.
Fonte: Adaptado de Brain (2011).

As microturbinas possuem o mesmo princípio de funcionamento das turbinas a gás, apresentando possibilidade de geração de eletricidade em pequena escala.

A eficiência térmica das turbinas a gás pode ser melhorada com temperaturas e pressões de entrada mais elevadas, mas isto exige materiais mais caros ao longo do caminho do gás, o que tem limitações técnicas e econômicas. Assim, não é de se esperar que, mesmo com os desenvolvimentos técnicos já antevistos, as turbinas industriais em ciclo aberto (descartam os gases de exaustão) venham a ter eficiência térmica acima de 40%, o que torna este sistema desinteressante para a geração de energia elétrica (GASNET, 2011a).

A eficiência térmica das centrais elétricas que utilizam turbinas a gás tem sido melhorada pelo processo de ciclo combinado (Figura 37), no qual a energia dos gases de exaustão, que saem à temperatura elevada, ao invés de ser descartada, é recuperada e usada para aumentar a produção de energia elétrica, por meio de ciclo a vapor.

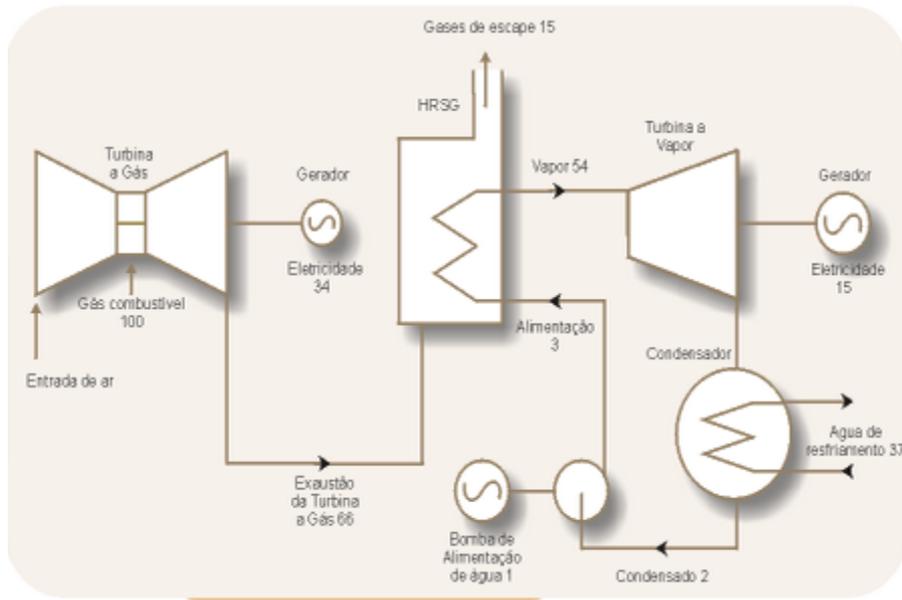


Figura 37 - Representação esquemática de turbina a gás em ciclo combinado.
 HRSG = caldeira de recuperação de calor
 Fonte: Gasnet (2011a).

Para melhorar a adaptação das turbinas a gás ao baixo poder calorífico do gás combustível produzido na gaseificação de resíduos, uma alternativa é misturá-lo ao gás natural.

Como uma das formas de sistema combinado, os gases de combustão procedentes de uma termelétrica a gás são utilizados para aumentar a temperatura do vapor d'água procedente do forno-caldeira de uma planta de incineração de RSU. Esse vapor será destinado ao sistema turbogerador, contribuindo para o aumento da eficiência da conversão energética. O tipo de gás utilizado depende de um estudo econômico, podendo ser o gás natural ou o biogás procedente dos sistemas de tratamento biológico anaeróbio.

O ciclo Otto é o ciclo teórico do processo ideal de funcionamento de motores de combustão interna de ignição por centelha, adotado também em motores de veículos leves, segundo o seguinte ciclo: admissão da mistura de ar e combustível, compressão, combustão e escape dos gases de combustão (Figura 38). A eficiência térmica do ciclo Otto é função apenas da taxa de compressão em relação diretamente proporcional, porém há um limite devido à possibilidade de auto-ignição, causando ondas de alta pressão que provocam perda de potência e danos no motor.



Figura 38 - Vista de motores ciclo Otto e representação esquemática do princípio de funcionamento.
 Fonte: Figueiredo (2007); OVERCAR (2011).

Embora os motores, de modo geral, possuam maior eficiência de conversão elétrica, as turbinas a gás podem apresentar um aumento de sua eficiência global de conversão quando operadas em sistema de cogeração (calor e eletricidade).

Nas turbinas e microturbinas, a taxa de emissão de NO_x é muito menor quando comparada à taxa de emissão dos motores, sendo vantajosa a utilização desse tipo de tecnologia.

Uma turbina a gás tem níveis maiores de NO_x do que caldeiras a óleo ou carvão, porque a relação entre o ar e o combustível é muito maior na queima do gás. Os últimos desenvolvimentos técnicos prevêem a utilização de queimadores com injeção de água ou vapor na zona de combustão das turbinas, o que, além de reduzir o NO_x , ainda eleva a capacidade produtiva por aumento do fluxo de massa através da turbina (GASNET, 2011a).

Apresentam-se na Tabela 21 algumas características de geração de energia de tecnologias comerciais de máquinas térmicas.

Tabela 21 - Características de geração de energia de tecnologias comerciais de máquinas térmicas.

Máquina térmica	Potência disponível	Eficiência de conversão elétrica (%)	Emissão de NO_x (ppm)
Motor de combustão interna do tipo "Ciclo Otto"	30 kW – 20 MW	30 a 40	250 a 300
Turbina a gás	500 kW – 150 MW	20 a 30	35 a 50
Microturbinas	30 kW – 100 kW	24 a 28	< 9 ppm

Fonte: CENBIO (2003) apud Coelho (2006); CEMIG GT e FEAM (2009).

Conforme estudos do Centro Nacional de Referência em Biomassa, publicados em 2005, os motores de combustão interna do tipo ciclo Otto, além de apresentarem baixo custo, quando comparados às turbinas e

microturbinas a gás, possuem alta eficiência quando operados com o biogás; há também as vantagens de rápida instalação e facilidade de manutenção, visto ser uma tecnologia já existente no país (PERCORA, VELÁZQUES, COELHO, 2009).

As microturbinas, além do custo do equipamento em si, exigem que o gás combustível apresente propriedades mais controladas que os motores convencionais, acarretando o uso de sistemas de purificação do gás, o que não se faz necessário para os motores de combustão interna, pois, além de suportar o uso de um biogás *in natura*, dispensa a necessidade de compressão uma vez que o seu princípio de funcionamento se dá por aspiração. Soma-se a este fato a dificuldade de efetuar as manutenções nos equipamentos da linha de tratamento e compressão do gás, principalmente do compressor que é importado e o representante local não dispõe de peças de reposição em estoque, pois se trata de um equipamento pouco comum no mercado.

O gás produzido no processo de gaseificação precisa ser tratado de modo a atender aos requisitos de sua aplicação no uso final. Para aplicação em turbinas a gás, em sistemas de geração de eletricidade, o gás deve estar livre de particulados, alcatrão, compostos de enxofre e de cloro e de metais alcalinos para garantir a integridade da parte quente da turbina. Para aplicações em motores de combustão interna, o gás deve ser resfriado — visando condensar o vapor d'água presente e melhorar o desempenho do motor, pela maior densidade do gás e prevenção à pré-ignição (PIFFER, 2011) —, além de ser necessário o controle dos teores alcatrão e particulados para assegurar que as válvulas e os cilindros estejam protegidos. Nas aplicações em células a combustível é necessário que o gás tenha alto teor de hidrogênio e não esteja contaminado com enxofre e cloro, para assegurar a proteção dos eletrodos. Para as operações de síntese, como a produção de hidrogênio e metanol, os particulados, alcatrão e as substâncias contaminantes (H_2S , por exemplo) devem ser removidos para evitar o envenenamento dos catalisadores (BRAND, 2010).

O biogás extraído dos aterros sanitários, antes de destinado à conversão em energia, também precisa ser tratado. A presença de substâncias não combustíveis, como água e dióxido de carbono, prejudica o processo de queima, tornando-o menos eficiente. Além destes, outros contaminantes podem estar presentes como os siloxanos (compostos orgânicos com silício e oxigênio), a umidade e o H_2S , que podem acarretar corrosão precoce, diminuindo tanto o rendimento como a vida útil do motor térmico utilizado. A necessidade de remoção dessas substâncias depende das especificações do biogás requerida para o equipamento de conversão utilizado (percentual de O_2 , CO_2 , CH_4 , H_2S , ponto de orvalho da água e PCI). As técnicas empregadas para remoção mais comuns são:

- para a umidade: filtros coalescentes e secadores por refrigeração, um antes e outro depois do compressor da turbina;
- para H₂S gasoso: filtro de carvão ativado;
- para H₂S solubilizado na água: secadores por refrigeração e filtros coalescentes.

Células Combustíveis

O dispositivo eletroquímico célula a combustível (Figura 39) é uma nova tecnologia que converte diretamente hidrogênio em energia (térmica e elétrica). Tem por princípio de funcionamento a eletrólise inversa, operando como uma bateria continuamente alimentada, convertendo o hidrogênio e o ar puro em energia. O hidrogênio, que não é uma fonte primária de energia, é obtido a partir de outras fontes, como, por exemplo, dos hidrocarbonetos.

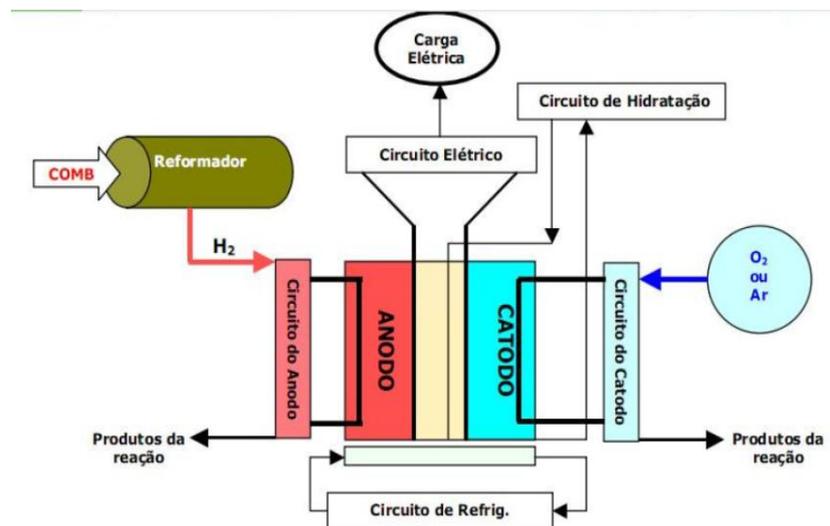


Figura 39 - Aspectos básicos das células a combustível.
Fonte: Raia (2009).

A utilização de biogás em células a combustível para a geração de energia elétrica (Figura 40) requer o uso de um processador de combustível de alto teor — o biogás é “reformado” mediante a remoção de umidade, gás sulfídrico, NMOCs, *mercaptans* e outros, e a separação do metano do diluente CO₂.



Figura 40 – Fluxo do aproveitamento de biogás em células a combustível para a geração de eletricidade.
Fonte: Elaboração própria.

A geração da eletricidade pode ser feita em pilhas contendo numerosas células individuais, tornando o sistema modulável conforme a disponibilidade do recurso combustível.

Apesar das aplicações estarem crescendo, atualmente o preço das células a combustível é muito mais elevado do que das outras tecnologias de utilização de biogás.

**ANEXO 5 - RESUMO DAS NORMAS LEGAIS REFERENTES AOS CONSÓRCIOS INTERMUNICIPAIS, LICITAÇÕES,
CONTRATOS E OUTROS ASSUNTOS CORRELATOS**

Data	Norma	Assunto
Nacional		
21-6-1993	Lei Federal n. 8.666	Regulamenta o art. 37, inciso XXI, da Constituição Federal, institui normas para licitações e contratos da Administração Pública e dá outras providências.
11-5-1978	Lei n. 6.528	Dispõe sobre as tarifas dos serviços públicos de saneamento básico, e dá outras providências (Revogada pela Lei n. 11.445/2007).
19-12-1979	Lei n. 6.766	Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras providências.
11-5-1990	Lei n. 8.036	Dispõe sobre o Fundo de Garantia do Tempo de Serviço, e dá outras providências. (Revogada pela Lei n. 11.445/2007).
13-2-1995	Lei Federal n. 8.987	Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previstos no art. 175 da Constituição Federal, e dá outras providências.
30-12-2004	Lei Federal n. 11.079	Institui normas gerais para licitação e contratação de parceria público-privada no âmbito da administração pública.
6-4-2005	Lei Federal n. 11.107	Dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos e dá outras providências (Derivada do art. 241 da Constituição).
5-1-2007	Lei Federal n. 11.445	Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis n. 6.766, de 19 de dezembro de 1979 (parcelamento do solo urbano), 8.036, de 11 de maio de 1990 (FGTS), 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei n. 6.528, de 11 de maio de 1978 (tarifas de serviços públicos de saneamento básico); e dá outras providências (contempla no Art. 13 a criação de fundos para serviços de públicos de saneamento básico).
10-1-2002	Lei Federal n. 10.406	Institui o Código Civil.
7-7-1995	Lei Federal n. 9.074	Estabelece normas para outorgas e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências.

Fonte: Elaboração própria.

**ANEXO 6 - RESUMO DE METODOLOGIAS DE MDL APLICÁVEIS ÀS ATIVIDADES DE PROJETOS DE
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

Metodologia	Aplicação
ACM0001 Versão 5	Metodologia consolidada para atividades de projetos de captação de gás de aterro (LFG) em que o cenário da linha de base é a emissão parcial ou total do gás para a atmosfera. As atividades do projeto compreendem situações onde o gás captado é queimado ou usado para produzir energia, podendo haver ou não reivindicação de redução de emissões por se deslocar ou evitar o uso de energia de outras fontes.
ACM0002 Versão 6	Metodologia consolidada para a geração de eletricidade conectada à rede a partir de fontes renováveis. Dentre outras fontes, aplica-se à geração de eletricidade conectada à rede a partir da captação de gás de aterro.
AMS-III.G Versão 6	Metodologia aplicável às atividades onde há recuperação de metano em aterro sanitário. O metano recuperado pode ser usado para produção de hidrogênio ou para geração de energia térmica ou elétrica diretamente, após o engarrafamento do biogás beneficiado ou após o beneficiamento e distribuição com o uso de tecnologias especificadas.
AM0003 Versão 4 (em inglês)	Metodologia para análise financeira simplificada para projetos de captura de gás de aterro sanitário. Esta metodologia é aplicável às atividades de projeto onde o gás de aterro é captado e queimado ou captado e usado para produzir energia, mas não se reivindica nenhuma redução de emissões por se deslocar ou evitar o uso de energia de outras fontes.
AM0010 Versão 1 (em inglês)	Metodologia para projetos de captação de gás de aterro e geração de eletricidade nos casos em que a captação de gás de aterro não é obrigatória por lei. Esta metodologia é aplicável às atividades de projeto onde o gás de aterro é captado e utilizado para geração de energia.
AM0011 Versão 3 (em inglês)	Metodologia para atividades de recuperação de gás de aterro com geração de eletricidade e nenhuma captação ou destruição de metano no cenário da linha de base.
AM0025 Versão 11 (em inglês)	Esta metodologia inclui atividades em que emissões de resíduos orgânicos são evitadas por meio de processos alternativos de tratamento de resíduos. A atividade de projeto pode envolver uma ou a combinação de opções de tratamento de resíduos para resíduos frescos que teriam sido destinados a aterro. As opções de tratamento são: processo de compostagem em condições aeróbias; gaseificação para produção de <i>syngas</i> e sua utilização; digestão anaeróbia com coleta, queima e/ou uso do biogás; processo de tratamento térmico/mecânico para produção de combustível derivado de resíduos (<i>refuse-derived fuel</i>)/biomassa estabilizada (<i>stabilized biomass</i>) e sua utilização; incineração de resíduos frescos para geração de energia, eletricidade e/ou calor.
AM0053 Versão 1.1	Metodologia aplicável às atividades de projeto que processam biogás e o equiparam em qualidade ao gás natural, distribuindo-o como energia pela rede de distribuição de gás natural. A fonte do biogás, que é gerado pela decomposição anaeróbia de matéria orgânica, pode ser aterros sanitários, tratamento de resíduos líquidos, sistemas de manejo de dejetos animais etc.
AM0024 Versão 2.1	Metodologia aplicável a projetos para atividade com uso de gás aquecido residual gerado em processo de fabricação de clínquer (em fornos de cimento) para produção de eletricidade.

Metodologia	Aplicação
AM0036 Versão 3.0	A metodologia se aplica a projetos que substituem o uso de combustíveis fósseis em biomassa residual em equipamentos de geração de calor. Essa metodologia se aplica às seguintes atividades: adaptação dos equipamentos de geração de calor existentes; substituição dos equipamentos de geração de calor existentes; instalação de novos equipamentos de geração de calor; instalação de novos equipamentos de geração de calor e adaptação e/ou substituição dos equipamentos de geração de calor existentes.
AM0057 Versão 3.0	A metodologia se aplica a projetos que utilizam resíduos agrícolas como estoque de alimentação para: polpa e papel, papelão, cartão ou produção de bio-óleo, onde o produto final possui as mesmas características e qualidade dos produtos de alta qualidade existentes no mercado e que não requer especial uso ou método de disposição.
ACM0006 Versão 11.2.0	Metodologia aplicável a projetos de atividades com utilização de biomassa residual em plantas de queima para geração de energia e calor. O projeto pode incluir as atividades a seguir ou, quando aplicável, a combinação dessas: instalação de novas plantas em locais onde não ocorre a geração de energia ou calor; instalação de novas plantas em locais onde ocorre a geração de energia ou calor (a nova planta substitui ou opera próxima à planta existente); a melhoria da eficiência energética das plantas existentes, que possam conduzir à expansão da capacidade pela adaptação da planta existente; substituição total ou parcial dos combustíveis fósseis por biomassa residual em plantas existentes ou em novas plantas que foram construídas na ausência do projeto.
ACM0018 Versão 1.3.0	Metodologia aplicável a projetos de atividades de geração de eletricidade a partir da biomassa residual em plantas de queima para geração de energia. O projeto pode incluir as atividades a seguir ou, quando aplicável, a combinação dessas atividades: instalação de novas plantas de queima de biomassa residual para geração de energia em locais onde não ocorre a geração de energia; instalação de nova planta de queima de biomassa residual para geração de energia que substitua ou opere próximo às plantas já existentes de queima com geração de energia utilizando combustíveis fósseis e/ou biomassa residual; a melhoria da eficiência energética das plantas de queima de biomassa residual com geração de energia que possam conduzir à expansão da capacidade pela adaptação da planta existente; substituição total ou parcial dos combustíveis fósseis por biomassa residual em plantas de geração de energia existentes ou em novas plantas que foram construídas na ausência do projeto.
ACM0020 Versão 1.0.0	Metodologia aplicável a projetos de atividades que operam uma única peça do equipamento de geração de calor a partir da biomassa residual. O calor de saída dos geradores de calor pode ser usado localmente para produção de eletricidade em plantas de geração de energia ou em plantas de cogeração. O projeto inclui a substituição parcial do combustível fóssil por biomassa residual em equipamentos de geração de calor novos ou já existentes.

Fonte: Elaboração própria.

ANEXO 7 - DETERMINAÇÕES PARA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

1.1 Geração *per capita*

A quantidade exata de RSU gerada é de difícil determinação devido a interferências como reutilização ou reciclagem e o descarte em locais clandestinos, que acabam por desviar parte do fluxo de materiais antes do descarte dos resíduos por seu gerador em local de responsabilidade do poder público. Em razão dessas interferências, na prática, determina-se a quantidade de resíduos sólidos coletados.

Além disso, fatores sazonais podem influenciar as características dos RSU, como o aumento da quantidade de embalagens no verão ou período de carnaval (latas, vidros e plásticos rígidos), e em épocas de Natal, Páscoa, Ano Novo, dias dos pais/mães (papel/papelão, plásticos maleáveis e metais). Em cidades turísticas não deve ser efetuada caracterizações em períodos de férias escolares ou feriados, pois é significativa a população flutuante.

A quantidade de resíduos coletada pode ser obtida com base em dados já existentes fornecidos pelo setor responsável da Prefeitura Municipal ou empregando-se métodos estimativos baseados na expectativa de crescimento populacional, na produção *per capita* de resíduos sólidos e no crescimento da demanda dos serviços de limpeza urbana.

Para se avaliar corretamente a projeção da população para os próximos anos é necessário conhecer a população residente e flutuante.

Para o cálculo da geração *per capita*, deve-se medir o volume de lixo que diariamente é destinado ao aterro, ao longo de um dia inteiro de trabalho. Calcula-se então o peso total do lixo aterrado, aplicando o valor do peso específico que foi determinado, e avalia-se o percentual da população atendida pelo serviço de coleta.

Para o cálculo da população atendida, aplica-se o percentual avaliado sobre o valor da população urbana do município (incluindo núcleos urbanos da zona rural, se for o caso). A taxa de geração *per capita* é obtida dividindo-se o peso do lixo pela população atendida.

Outra forma de obter essa informação é por meio de levantamentos de campo. Estes podem adotar diferentes procedimentos, como a seleção de domicílios por classes socioeconômicas e a subsequente pesagem das quantidades coletadas ou a seleção de áreas de coleta representativas, obtendo-se a carga transportada por cada veículo coletor em cada viagem realizada ou ainda medindo-se por cubagem os resíduos coletados a cada viagem. Em qualquer uma dessas alternativas deve-se estabelecer o período de amostragem e a época do ano em que será efetuada e realizar o tratamento estatístico cabível dos dados obtidos.

A norma ABNT NBR 10.007 orienta quanto aos procedimentos de amostragem de resíduos.

1.2 Composição gravimétrica

A determinação da composição gravimétrica dos RSU expressa o percentual de cada componente em relação ao peso total desses resíduos. Com objetivo de avaliação de componentes recicláveis, bem como daqueles que irão conferir maior poder calorífico aos resíduos, recomenda-se detalhar ao máximo as frações para que seja o menor possível o percentual de frações não especificado (“inertes”, “diversos” ou “outros”).

Para fins de aproveitamento energético, quanto maior o percentual de resíduos com composição orgânica, como plástico, papel, papelão, borracha, couro, têxteis, folha, mato e galhada, maior a capacidade de geração de energia térmica, pois esses materiais possuem elevado poder calorífico.

Entretanto, a matéria orgânica composta por restos de comida apresenta baixo poder calorífico, devido sua elevada umidade, sendo de menor interesse para a incineração.

1.3 Peso específico aparente

É o peso do resíduo solto em função do volume ocupado livremente, sem qualquer compactação, expresso em kg/m^3 . É fundamental para o correto dimensionamento de equipamentos e instalações para coleta, transporte, tratamento e destino final.

1.4. Umidade

O teor de umidade ou conteúdo de umidade é a quantidade de água ou umidade presente no combustível. Pode ser expressa em base seca (kg água/kg material seco) ou na base úmida (kg água/kg total de amostra úmida), mas para a geração de energia o ideal é expressá-la em base úmida.

No caso de resíduos, tem influência direta na velocidade de decomposição da matéria orgânica no processo de compostagem. Influencia diretamente o poder calorífico e o peso específico aparente do resíduo, concorrendo de forma indireta para o correto dimensionamento de incineradores e usinas de compostagem. Influencia diretamente o cálculo da produção de chorume e o correto dimensionamento do sistema de coleta deste em aterro sanitário. Varia muito em função das estações do ano e da incidência de chuvas.

Quanto maior a umidade, menor será a quantidade de energia útil para o sistema de geração de energia, pois o calor latente de evaporação é perdido com os gases de combustão, o que implica no aumento do consumo do combustível.

Além disso, ocorre o aumento do volume de produtos de combustão, das perdas de calor com gases de escape, da potência necessária do exaustor (aspirador de fumaça) e o custo de transporte. Provoca ainda a aceleração de corrosão da parte final do gerador de vapor e o acúmulo de sujeira nas superfícies de aquecimento.

O teor de umidade do combustível, sendo muito variável, pode tornar difícil o processo de combustão, principalmente no que diz respeito ao seu controle, havendo necessidade de constantes ajustes no sistema de admissão de ar dos equipamentos. Além disso, poderá causar o aparecimento de material particulado (fumaça escura e densa resultante de material combustível não totalmente queimado) junto aos gases produzidos durante a queima.

1.5 Compressibilidade

A compressibilidade, também conhecida como grau de compactação, indica a redução de volume que uma massa de RSU pode sofrer, quando submetida a uma pressão determinada. A compressibilidade do RSU situa-se entre 1:3 e 1:4 para uma pressão equivalente a 4 kg/cm².

É muito importante para o dimensionamento de unidades compactadoras, tais como: veículos coletores, estações de transferência e caçambas estacionárias.

2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

2.1 Composição química

A composição química consiste na determinação, por exemplo, dos teores de cinzas, matéria orgânica, carbono, nitrogênio, potássio, cálcio, fósforo, resíduo mineral total, resíduo mineral solúvel e gorduras (IBAM, 2001).

Relativo à qualidade da biomassa para uso como combustível é fundamental, entre outras determinações, a análise e conhecimento da sua composição química elementar e imediata (BRAND, 2010).

2.1.1 Análise elementar

Na análise elementar de combustíveis são determinados, em base seca (sem considerar a presença de água), o conteúdo percentual em massa dos principais elementos químicos presentes que formam as substâncias orgânicas: carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N); e todos os materiais minerais que não são relevantes nas reações de combustão como o potássio, o fósforo e o cálcio - as cinzas.

Constitui a base dos cálculos de combustão, pois é a partir da porcentagem de cada um de seus elementos que pode ser calculado o potencial energético de um combustível.

Nem sempre a análise elementar é determinada experimentalmente, mas é o princípio utilizado para a análise dos processos de combustão, como para o cálculo do volume de ar necessário, da quantidade de gases gerada e da energia disponível na forma de calor. Conhecendo-se esta característica pode-se também determinar o poder calorífico do combustível, além de permitir avaliar o impacto ambiental da queima do mesmo.

As cinzas representam o rejeito do processo de combustão e contribuem para a redução do poder calorífico do combustível por unidade de massa, pois, apesar de não participarem do processo, são contabilizadas em sua massa.

2.1.2 Análise imediata

Na análise imediata de combustíveis é determinado, em laboratório, o conteúdo percentual do carbono fixo, materiais voláteis, cinzas e eventualmente a umidade, baseado na massa do combustível.

O conteúdo de voláteis (realizado em atmosfera inerte, até temperatura de aproximadamente 850 °C, por 7 minutos) expressa a facilidade de se queimar um material, indicando o grau de combustão de um combustível; o carbono fixo é a fração de carvão que permanece na amostra logo após este aquecimento.

O conhecimento da composição química imediata é importante para o cálculo do projeto da fornalha e das quantidades de ar primário e secundário necessários em função da percentagem de voláteis. Combustíveis com baixo índice de voláteis (elevado índices de carbono fixo) deverão queimar mais lentamente e requerem longo tempo de residência na fornalha. Também, o teor de voláteis tem um papel importante durante a ignição e as etapas iniciais da combustão de combustíveis sólidos.

Os combustíveis com maior teor de voláteis e menor teor de cinzas apresentam, normalmente, maior poder calorífico.

2.2 Poder calorífico

Indica a capacidade potencial de um material liberar determinada quantidade de energia quando submetido à queima. Influencia o dimensionamento das instalações de todos os processos de tratamento térmico.

O poder calorífico do RSU pode variar em função de diversas condições, como a composição do resíduo entre locais, sua umidade e quantidade de cinzas.

Pode ser expresso como PCS ou PCI, sendo a unidade de medida internacionalmente aceita para combustíveis sólidos o kJ/kg ou MJ/kg, nas bases seca, úmida ou úmida e sem cinzas. O valor expresso em kcal/kg é também muito usado.

2.2.1 Poder Calorífico Superior (PCS) – base seca

Expressa a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão completa do combustível sem umidade (base seca). A água formada na oxidação do hidrogênio do combustível permanece no estado líquido. O PCS pode ser medido precisamente utilizando uma bomba calorimétrica adiabática a volume constante para combustíveis líquidos ou sólidos.

2.2.2 Poder Calorífico Inferior (PCI)

PCI – base seca: é o resultado do PCS subtraída a energia para evaporar a água formada na oxidação do hidrogênio do combustível durante a combustão. Neste caso, considera-se a água gerada pelos produtos de combustão na forma de vapor.



Em instalações industriais, a temperatura dos gases de saída em processos de combustão é maior que a temperatura de condensação da água na pressão atuante. Assim sendo, o PCI tem maior aplicação prática no dimensionamento e avaliação de equipamentos.

$$\text{PCI (base seca)} = \text{PCS (base seca)} - L (9H/100)$$

Onde:

H = teor de hidrogênio no combustível (%)

L = calor latente de vaporização da água = 583 kcal/kg (a 25 °C)

PCI – base úmida e sem cinzas: considera apenas os componentes do combustível a serem oxidados.

$$\text{PCI (base úmida e sem cinzas)} = \text{PCI (base seca)} \times \left[\frac{(100-c)}{100} \times \frac{(100-W)}{100} \right] - \frac{W}{100} \times L$$

Onde:

W = conteúdo de umidade no combustível (%)

c = teor de cinzas no combustível (%)

L = calor latente de vaporização da água = 583 kcal/kg (a 25 °C)

Os PCS e PCI de qualquer combustível podem ser calculados por diversos procedimentos indicados na literatura especializada, que consideram, geralmente, a composição imediata ou elementar do combustível.

2.3 pH

O valor do pH (potencial hidrogeniônico) indica o teor de acidez (se este é menor que 7) ou alcalinidade dos resíduos. Em geral, para RSU situa-se na faixa de 5 a 7.

Interfere no grau de corrosividade dos resíduos coletados, servindo para estabelecer o tipo de proteção contra a corrosão a ser usado em veículos, equipamentos, contêineres e caçambas metálicas.

Como quase todos os processos biológicos são dependentes do pH, é também um importante parâmetro de acompanhamento do processo de decomposição dos RSU, indicando a evolução da degradação microbiológica da matéria orgânica e a evolução global do processo de estabilização da massa de resíduos. Pode afetar o processo de biodigestão anaeróbia de forma direta, quando interfere nas atividades enzimáticas, ou de forma indireta, quando influencia a toxicidade de algum composto alterando o potencial de oxirredução do meio (LANGE, 2002).

2.4 Relação C/N

A relação C/N indica o grau de decomposição da matéria orgânica do lixo nos processos de tratamento/disposição final.

