

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

RODOLFO LIMA LANZIANI

**Estudo de caso das alternativas para recuperação energética
dos resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados na região
metropolitana de Campinas**

São Paulo

2013

RODOLFO LIMA LANZIANI

**Estudo de caso das alternativas para recuperação energética
dos resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados na região
metropolitana de Campinas**

Monografia apresentada à
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Especialista
em Energias Renováveis, Geração
Distribuída e Eficiência Energética.

Área de Concentração: Energia.

Orientador (a): Prof (a) Dr (a)
Suani Teixeira Coelho.

São Paulo

2013

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo da Publicação
Universidade de São Paulo

RESUMO

Este trabalho analisa a atual situação da destinação final dos resíduos sólidos urbanos na região metropolitana de Campinas, e avalia as possíveis alternativas para o seu aproveitamento energético. Este é um problema que vem ganhando proporções cada vez maiores em todas as cidades brasileiras, mas que se destaca em regiões de grande concentração populacional como as regiões metropolitanas. As tecnologias disponíveis visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos (RSU) são ferramentas na busca por soluções adequadas, porém por não existir uma solução única que seja a melhor para todas as cidades e/ou regiões, este estudo analisa as alternativas de destinação dos resíduos sólidos urbanos através da ótica ambiental, cultural/social, técnica, financeira e política.

Palavras-chave: Região metropolitana de Campinas, resíduos sólidos urbanos e recuperação energética.

ABSTRACT

This paper analyzes the current situation of solid waste disposal in the Metropolitan Region of Campinas, and evaluates possible alternatives for their energy use. This is an issue that is getting ever greater proportions in all Brazilian cities, but excels in areas of high population density such as metropolitan areas. Available technologies aimed at energy recovery of municipal solid waste (MSW) are tools in the search for appropriate solutions, however there is not a single solution that fits best for all the cities and / or regions, this study examines the alternatives for allocation of municipal solid waste through environmental standpoint, cultural / social, technical, financial and political.

Keywords: Metropolitan Region of Campinas, municipal solid waste and energy recovery.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geração de RSU no Brasil nos anos de 2010 e 2011.....	11
Figura 2 - Condições de disposição final dos RSU no estado de São Paulo nos anos de 1997 e 2011.....	12
Figura 3 - Alternativas para o aproveitamento energético dos RSU.....	13
Figura 4 - População das cidades que compõem a RMC.	15
Figura 5 - Principais objetivos da PNRS	19
Figura 6 - com plantas de incineração.	21
Figura 7 - Diagrama de uma planta de incineração.....	22
Figura 8 - Sistema Tyranossaurus.	27
Figura 9 - Sistema de separação das frações dos RSU.....	30
Figura 10 - Vista aérea do aterro sanitário Bandeirantes	31
Figura 11 – Ilustração de um aterro sanitário	32
Figura 12 - Descarregamento de RSU em uma célula de aterro sanitário	33
Figura 13 - Aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário	34
Figura 14 - Sistema de extração de biogás.....	34
Figura 15 - Flares para queima de biogás.....	37
Figura 16 - Sistema viário da RMC	39
Figura 17 - Planta de incineração de RSU	42
Figura 18 - Fluxograma do processo de TMB dos RSU	44
Figura 19 - Perfil de geração de metano em um aterro sanitário	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição média do RSU brasileiro.....	10
Tabela 2 - Dados dos municípios da RMC.	16
Tabela 3 - Limites de emissões.....	23
Tabela 4 - Comparação entre as tecnologias.....	48

LISTA DE SIGLAS

RSU – Resíduos sólidos urbanos

RMC – Região metropolitana de Campinas

PNRS – Política nacional de resíduos sólidos

PCI – Poder calorífico inferior

TMB – Tratamento mecânico biológico

CDR – Combustível derivado de resíduo

PPP – Parceria público privada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	14
2.2. Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS).....	16
2.3. Recuperação Energética dos RSU	20
2.3.1. Incineração dos RSU.....	20
2.3.2. Tratamento Mecânico Biológico.....	25
2.3.3. Aproveitamento de biogás de aterros sanitários.....	31
2.4. Projetos de Recuperação Energética em Andamento no País	35
2.5. Considerações preliminares	36
3. ALTERNATIVAS PARA RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DOS RSU GERADOS NA RMC	36
3.1. RMC: geração e disponibilidade de RSU	38
3.2. Avaliação da Incineração como uma alternativa	40
3.2.1. Impactos de uma planta de incineração na RMC	42
3.3. Avaliação do Tratamento Mecânico Biológico como alternativa	43
3.3.1. Impactos de uma planta de TMB na RMC.....	45
3.4. Avaliação do uso do biogás de aterro sanitário como alternativa	46
3.4.1. Impactos do uso do biogás de aterro sanitário na RMC	47
4. CONCLUSÕES	50
REFERÊNCIAS.....	52

1. INTRODUÇÃO

A questão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é um problema que está ganhando cada vez mais foco no interesse da sociedade brasileira, principalmente quanto à sua destinação final em grandes centros urbanos e regiões metropolitanas. A Política Nacional dos Resíduos Sólidos significou um avanço no sentido de se obter respostas, mas por si só não será capaz de satisfazer as expectativas e necessidades da população. É preciso que agora se estructurem políticas públicas de âmbito multi-setorial para oferecer condições para que os objetivos contidos nesta política se concretizem. Mas para isso é necessário, antes, estudarmos os problemas que temos e as possíveis alternativas.

As dificuldades com relação à destinação final adequada dos RSU se devem a algumas questões relacionadas ao lixo, entre elas a variação existente nas características dos RSU. Essas características físicas, químicas e biológicas, variam de região pra região, cidade para cidade e até de um bairro para outro de uma mesma cidade. Sofrem mudanças também durante o ano, principalmente em cidades turísticas. A falta de informações a respeito do histórico destas variações e das características dos resíduos é um grande entrave no estudo e elaboração de propostas que visem soluções com o melhor custo benefício, analisadas através dos setores envolvidos. A Tabela 1 apresenta a composição média do lixo brasileiro.

Tabela 1 - Composição média do RSU brasileiro

Material	Participação (%)	Quantidade (t/ano)
Metais	2,9	1.610.499
Papel, Papelão e TetraPak	13,1	7.275.012
Plástico	13,5	7.497.149
Vidro	2,4	1.332.827
Matéria Orgânica 51,4	51,4	28.544.702
Outros	16,7	9.274.251
TOTAL	100,0	55.534.440

Fonte: Abrelpe, 2011.

No Brasil, a dificuldade na busca por soluções à destinação adequada dos RSU se dá também pelo fato da grande heterogeneidade existente entre os mais de 5.500 municípios brasileiros, os quais possuem uma população

variando de pouco mais de 2,0 mil a 15 milhões de habitantes e que são responsáveis pelo gerenciamento dos RSU. Conforme mostrado na Figura 1, a geração de resíduos sólidos no Brasil em 2011 cresceu 1,8% em relação a 2010 e superou 62 milhões de toneladas.

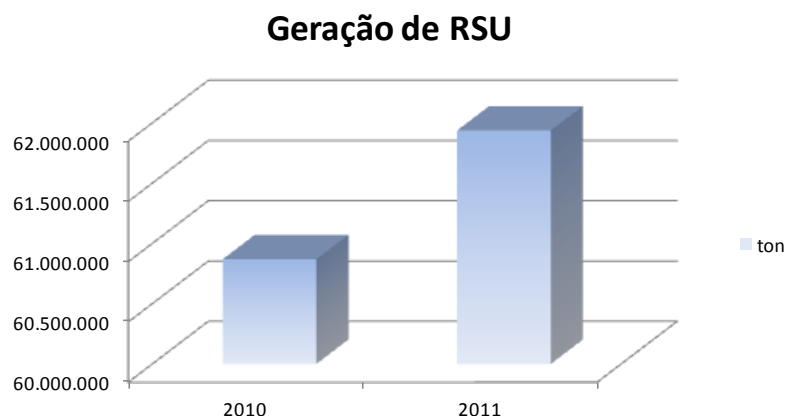


Figura 1 - Geração de RSU no Brasil nos anos de 2010 e 2011 (Abrelpe,2011).

Apesar de a PNRS incentivar a redução do montante de resíduos a serem gerados, quanto maior é a renda per capita e o nível de desenvolvimento de um país, maior também é a geração per capita de RSU. Porém o problema não é o crescimento da geração dos RSU, mas sim a definição de soluções sustentáveis para sua destinação final.

A área atendida por sistemas de coleta no Brasil aumentou, mas não o suficiente para evitar que mais de 6,4 milhões de ton de RSU deixassem de ser coletados no ano de 2011, segundo relatório da Abrelpe, tendo assim sua destinação final inadequada do ponto de vista ambiental, como por exemplo os “lixões”. Este cenário somado ao fato de que quase 42% dos RSU coletados foram destinados de forma irregular mostra a importância que deve se dar a esta temática, pois além de estarem sendo gerados grandes passivos ambientais, um grande potencial energético é desperdiçado diariamente em nosso país.

Desde 1997 o estado de São Paulo vem monitorando anualmente, através da CETESB, a destinação dos RSU. Nesse período houve grande avanço na melhoria das condições de destinação dos RSU, conforme observado na Figura 2.

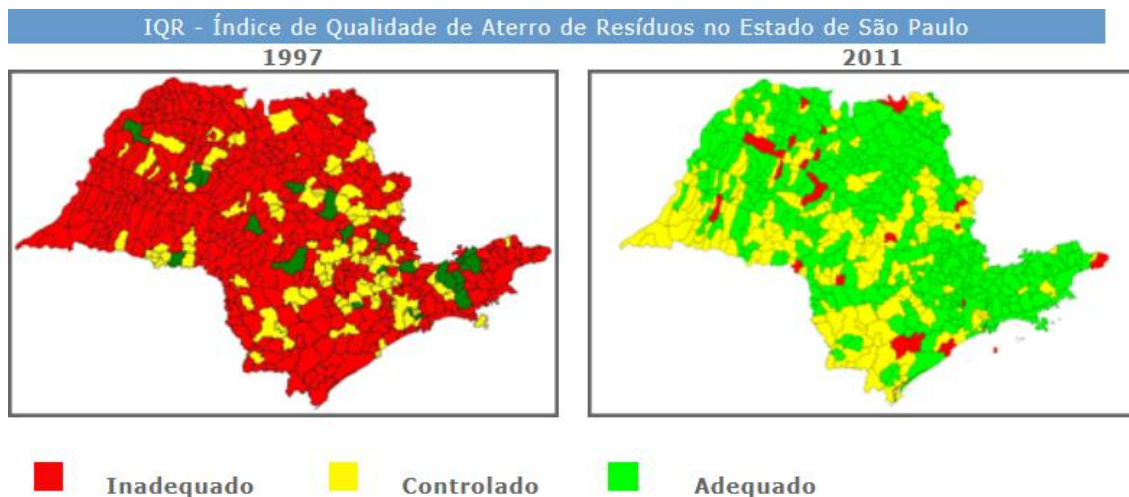


Figura 2 - Condições de disposição final dos RSU no estado de São Paulo nos anos de 1997 e 2011 (CETESB, 2011).

No início do levantamento, em 1997, a grande maioria dos 645 municípios que compõem o estado dava uma destinação aos seus RSU considerada inadequada. Em 2011 essa realidade já havia mudado bastante, conforme se verifica na Figura 2.

Mas mesmo com a crescente adequação na forma da destinação final dos RSU, poucos foram os locais que apostaram em alguma maneira de fazer o aproveitamento energético dos RSU, por diferentes razões.

Na verdade, há várias alternativas que temos para conciliar a destinação adequada dos RSU ao seu aproveitamento energético, como mostra a Figura 3.

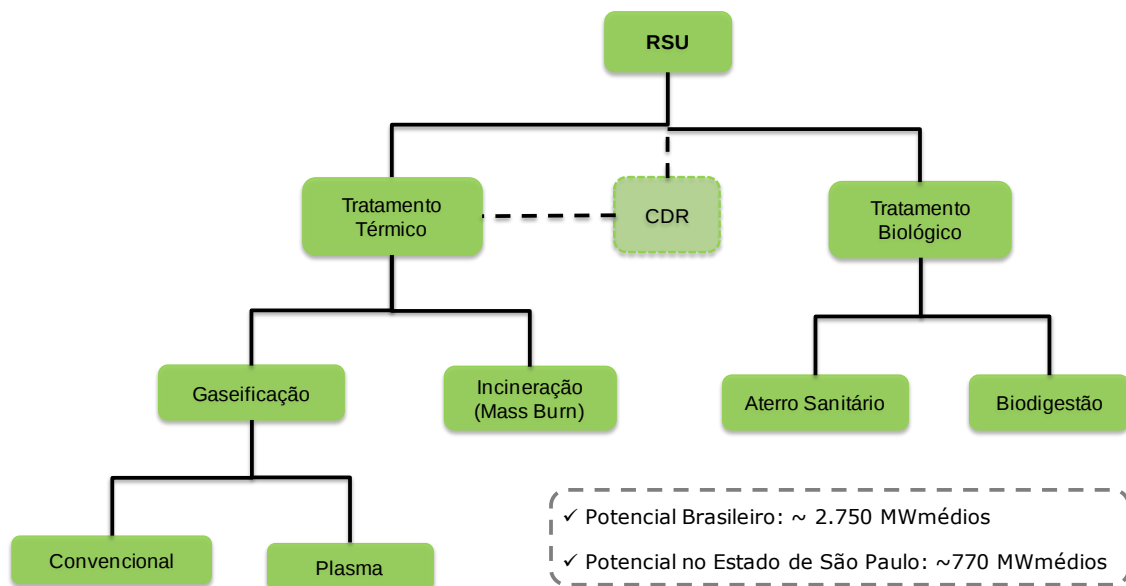


Figura 3 - Alternativas para o aproveitamento energético dos RSU (Cenbio, 2013).

Pelo fato de envolver vários pontos que devem ser analisados a fim de avaliar as alternativas mais sustentáveis, não existe uma solução de destinação dos resíduos sólidos urbanos que possa ser indicada como a melhor para todas as cidades e regiões. Deste fato nasce a necessidade de uma avaliação caso a caso.

Assim sendo, neste trabalho foi realizado um estudo de caso envolvendo a região metropolitana de Campinas que se iniciou com a análise geopolítica dos municípios que compõem a região e também a atual situação da destinação dos resíduos sólidos urbanos e o modelo que está sendo empregado, caminhando até as análises técnicas e econômicas de algumas alternativas. Foi considerado também o panorama brasileiro referente a este tema, de modo que as alternativas avaliadas não entrem em contradição com todas as normativas existentes.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Segundo a ABNT NBR 10004/2004, os resíduos sólidos são “resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos 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 de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

2.1. Características da Região Metropolitana de Campinas

A RMC é constituída por 19 municípios, que juntos ocupam uma área de aproximadamente 3.647 km², correspondendo pela 9ª maior região metropolitana do país, segundo dados da EMTU (Empresa metropolitana de transportes urbanos do estado de São Paulo). Com uma população de mais de 2,8 milhões de habitantes em 2012, distribuída conforme mostra a Figura 4, a RMC obteve um PIB superior a R\$ 98 bilhões, de acordo com a AGEMCAMP (Agencia Metropolitana de Campinas).

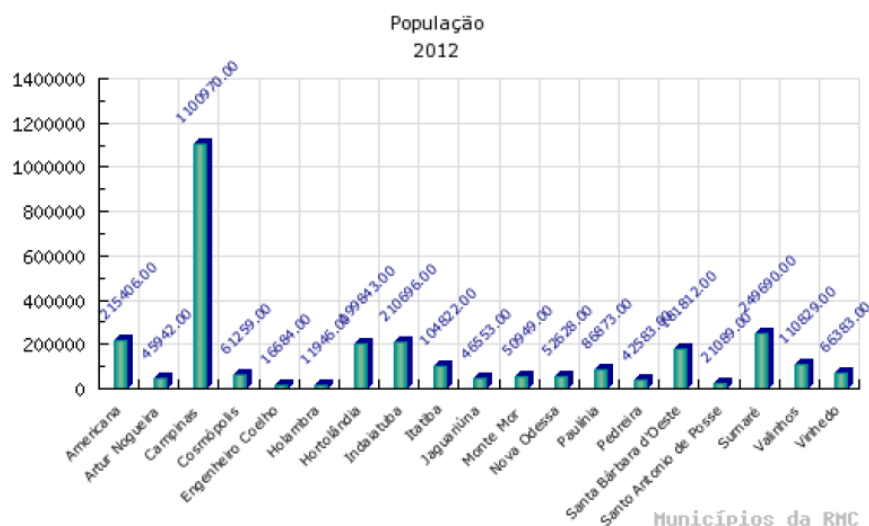


Figura 4 - População das cidades que compõem a RMC (AgemCamp, 2012).

Dados do Inventário Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo – CETESB 2011 indicam que a RMC gera diariamente 1.604 toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos - RSU. Se considerarmos que a população total da RMC é de 2.876.957, conforme número da AgemCamp, cada habitante gera em média 0,56 kg de RSU por dia. Este número é 38% menor que a média de geração de RSU na região sudeste do país em 2008, segundo pesquisas do IBGE, que indicou uma geração per capita de RSU de 0,9 kg/hab*dia. De acordo com aquele mesmo inventário, quinze dos dezenove municípios que compõem a RMC, que correspondem por 39% dos RSU gerados na região, destinam seus RSU ao aterro sanitário particular gerido pela ESTRE, localizado no município de Paulínia, o qual é considerado adequado. Campinas, Indaiatuba e Pedreira, que correspondem por 55% dos RSU gerados na RMC, destinam seus RSU a aterros sanitários municipais. Apesar do grande montante de RSU gerados na RMC, apenas o município de Santa Barbara do Oeste destina seus RSU em aterro controlado (Inventário Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo – CETESB, 2011).

Com isso é possível estimar que os RSU gerados na RMC percorrem uma distância média de 16 km desde o ponto de coleta até o seu local de destinação. Usando os custos de transporte considerado por USEPA (2002), apenas a logística destes RSU tem um custo de aproximadamente R\$ 28/tonelada.

Tabela 2 - Dados dos municípios da RMC.

Municípios da RMC	Habitantes ⁽²⁾	RSU (ton/dia) ⁽¹⁾	kg RSU/hab.dia	IQR (2011) ⁽¹⁾	Destinação ⁽¹⁾	Local ⁽¹⁾	Distância (km)
Americana	215.406	127,1	0,59	9,6	adequada	Paulínia	28
Artur Nogueira	45.942	16,3	0,35	9,6	adequada	Paulínia	36
Campinas	1.100.970	750,1	0,68	8,9	adequada	Delta A	9
Cosmópolis	61.259	22,3	0,36	9,6	adequada	Paulínia	25
Engenheiro Coelho	16.684	4,7	0,28	9,6	adequada	Paulínia	48
Holambra	11.946	3,4	0,28	9,6	adequada	Paulínia	45
Hortolândia	199.843	97,9	0,49	9,6	adequada	Paulínia	14
Indaiatuba	210.696	122,2	0,58	9,8	adequada	Indaiatuba	9
Itatiba	104.822	34,8	0,33	9,6	adequada	Paulínia	57
Jaquariúna	46.553	17,7	0,38	9,6	adequada	Paulínia	44
Monte-Mor	50.949	18,7	0,37	9,6	adequada	Paulínia	36
Nova Odessa	52.628	20,4	0,39	9,6	adequada	Paulínia	23
Paulínia	86.873	33,8	0,39	9,6	adequada	Paulínia	9
Pedreira	42.583	16,7	0,39	9,4	adequada	Municipal	9
Santa Barbara d'Oeste	181.812	89,7	0,49	7,5	controlada	Municipal	9
Santo Antônio da Posse	21.089	7,6	0,36	9,6	adequada	Paulínia	59
Sumaré	249.690	144,1	0,58	9,6	adequada	Paulínia	20
Valinhos	110.829	51,7	0,47	9,6	adequada	Paulínia	42
Vinhedo	66.383	25,1	0,38	9,6	adequada	Paulínia	47

Fonte: (1) Inventário Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo e (2) AgemCamp, 2012.

A RMC também possui uma malha rodoviária muito robusta, interligando as 19 cidades que a compõe. Isso é um fator importante que pode ajudar a reduzir os custos logísticos dos RSU quando se tem a intenção de desenvolver soluções que possam abranger o maior número possível de municípios a fim de se obter ganho de escala e redução dos custos operacionais.

2.2. Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS)

A PNRS representou um grande avanço na busca por soluções ambientalmente corretas para a destinação final dos RSU e de todas as etapas que a antecedem. Foi instituída pela Lei nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010, a qual dispõe a respeito dos princípios, objetivos e instrumentos para implantação da PNRS, assim como estabelece as diretrizes relativas à gestão integrada e o gerenciamento dos RS. O texto da lei também traz algumas definições, entre elas:

- ❖ A destinação final ambientalmente adequada inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento

energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

- ❖ Gerenciamento de resíduos sólidos é o conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos, exigidos na forma desta Lei;
- ❖ Entende-se por gestão integrada de resíduos sólidos o conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável;
- ❖ Logística reversa é um instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada;
- ❖ Padrões sustentáveis de produção e consumo corresponde pela produção e consumo de bens e serviços de forma a atender as necessidades das atuais gerações e permitir melhores condições de vida, sem comprometer a qualidade ambiental e o atendimento das necessidades das gerações futuras;
- ❖ Reciclagem é o processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sisnama e, se couber, do SNVS e do Suasa;
- ❖ Rejeitos são todos 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;

- ❖ Os resíduos sólidos são material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível;
- ❖ Responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos é o conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para minimizar o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como para reduzir os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos, nos termos desta Lei;
- ❖ Reutilização corresponde ao processo de aproveitamento dos resíduos sólidos sem sua transformação biológica, física ou físico-química, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sisnama e, se couber, do SNVS e do Suasa;

A PNRS chamou a atenção para a necessidade de implantação de políticas públicas capazes de darem suporte e condições para que os objetivos propostos sejam realmente alcançados. Alguns desses objetivos são bem audaciosos como o que proíbe a destinação de resíduos sólidos a partir de agosto de 2014.

As prefeituras municipais são as responsáveis pela implementação dos planos e políticas que visem o gerenciamento de toda a cadeia que envolve os RSU, o que por sua vez já é um grande desafio para grande maioria delas que não contam com capacitação nem verba apropriada. Porém soluções que

compreendem políticas conjuntas entre municípios próximos podem trazer mais viabilidade aos projetos e também são bem vistas pelos órgãos públicos. A PNRS prevê uma prioridade na liberação de recursos da união aos projetos que contemplem soluções conjuntas entre municípios.

O texto da lei também faz referências a criação de linhas de crédito especiais, com recursos da União, para financiar os projetos que estejam, de alguma maneira, ligados a cadeia dos RSU. A PNRS propõe uma visão abrangente a respeito do desenvolvimento de soluções a esta temática, e que passem pela análise de diversas áreas como: Ambiental, social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública.

A Figura 5 ilustra um dos principais objetivos da PNRS, que é o máximo aproveitamento das potencialidades que os RSU apresentam e posteriormente sua destinação em local adequado.

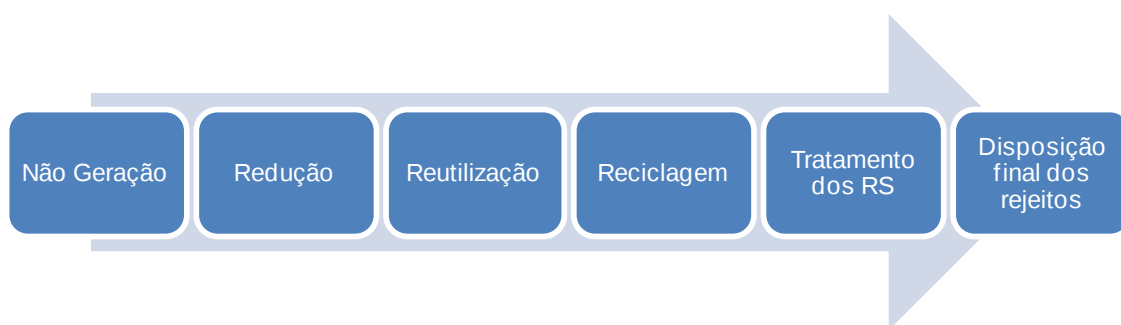


Figura 5 - Principais objetivos da PNRS (Elaboração própria).

É através desta sequência de ações, que a PNRS pretende que todos os municípios desenvolvam soluções adequadas para o gerenciamento dos RSU. Mas para que os objetivos sejam alcançados, outras ações externas ao gerenciamento dos RSU devem ser desenvolvidas. A obtenção de soluções para os problemas causados pela má gestão dos RSU passa pela racionalização do uso dos recursos naturais, intensificação de ações de educação ambiental, aumento da reciclagem no país, promoção da inclusão social, entre outros.

2.3. Recuperação Energética dos RSU

São inúmeras as tecnologias capazes de promover soluções sustentáveis que visam à destinação final dos RSU de forma correta e que envolvam o aproveitamento energético destes. Algumas alternativas são muito interessantes, pois além de serem ambientalmente corretas, podem transformar os RSU em uma alternativa de fonte de geração de energia, como a térmica ou elétrica, para vários setores, entre eles o industrial e assim reduzir de forma significativa a dependência pelos combustíveis fósseis.

Pelo fato de que a cada dia a questão dos RSU ganha mais atenção de diversos setores da sociedade, existem várias pesquisas em andamento que visam a adaptação de tecnologias, usadas atualmente para outros tipos de resíduos e/ou combustíveis, como é o caso da gaseificação e pirólise, para que possam processar também os RSU. Porém as tecnologias que apresentam o maior número de plantas em operação no mundo, e por consequência maiores garantias de performance, são incineração, o tratamento mecânico biológico e o aproveitamento de biogás gerado espontaneamente nos aterros sanitários. Abaixo uma pesquisa a respeito das questões que envolvem cada uma destas três alternativas tecnológicas.

2.3.1. Incineração dos RSU

O processo de incineração dos RSU, chamada também de *mass burn*, consiste na combustão dos RSU, transformando-os em basicamente três produtos: Cinzas, gases e calor.

Este sistema apresenta como grande vantagem a redução do volume de rejeitos gerados, que são as cinzas. Estas normalmente são classificadas como rejeitos não perigosos, podendo assim ser destinadas aos aterros sanitários.

Algumas literaturas indicam que o volume de cinzas geradas representam em média 10% do volume de RSU incinerados, mas este número varia conforme a composição dos RSU. Isto possibilita uma maior vida útil dos aterros sanitários além de tornar o gerenciamento destes mais simples, já que as cinzas são resíduos praticamente inertes. Outra destinação possível para as cinzas geradas, principalmente quando classificadas como material perigoso, é adicioná-la como matéria prima ao processo de produção de cimento ou até mesmo do asfalto.

O *mass burn* já é adotado por muitos países desde a década de 70. Desde então houve muitos avanços tecnológicos dos equipamentos, conferindo uma maior eficiência e controle dos parâmetros que podem causar impactos ambientais, em especial o controle de emissões. A Figura 6 mostra o número de plantas de incineração de RSU instaladas em alguns países.

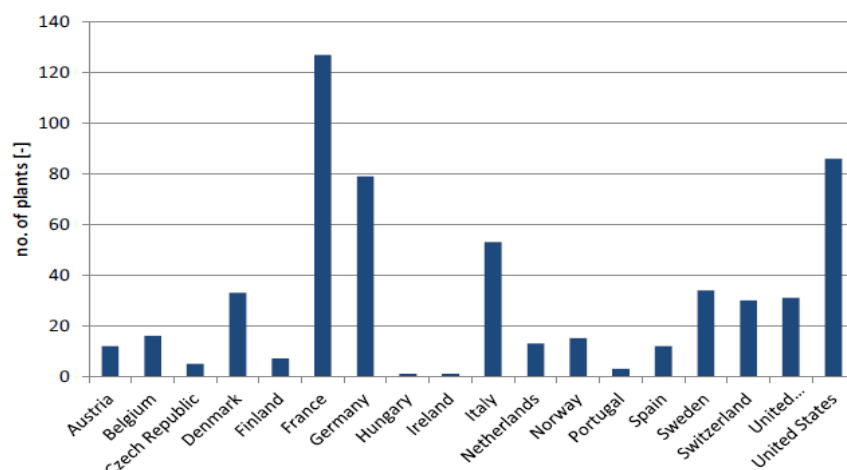


Figura 6 - com plantas de incineração (ISWA, 2012).

Outra vantagem da incineração é que pode ocorrer em caldeiras especiais visando o aproveitamento do calor dos gases de combustão para geração de vapor, que por sua vez pode ser utilizado na geração de energia elétrica através de turbinas a vapor. Porém, devido às características dos RSU, essas caldeiras necessitam de projetos especiais, principalmente em relação ao sistema de queima e ao sistema de limpeza dos gases de exaustão.

Mas essa já é uma tecnologia desenvolvida e os conhecimentos necessários para a construção de tais equipamentos já estão bem maduros e dominados por alguns fabricantes, o que já possibilitou a instalação de mais de 1.400 plantas de incineração ao redor do mundo. A Figura 7 ilustra as etapas do processo de incineração dos RSU em uma caldeira visando a geração de energia elétrica.

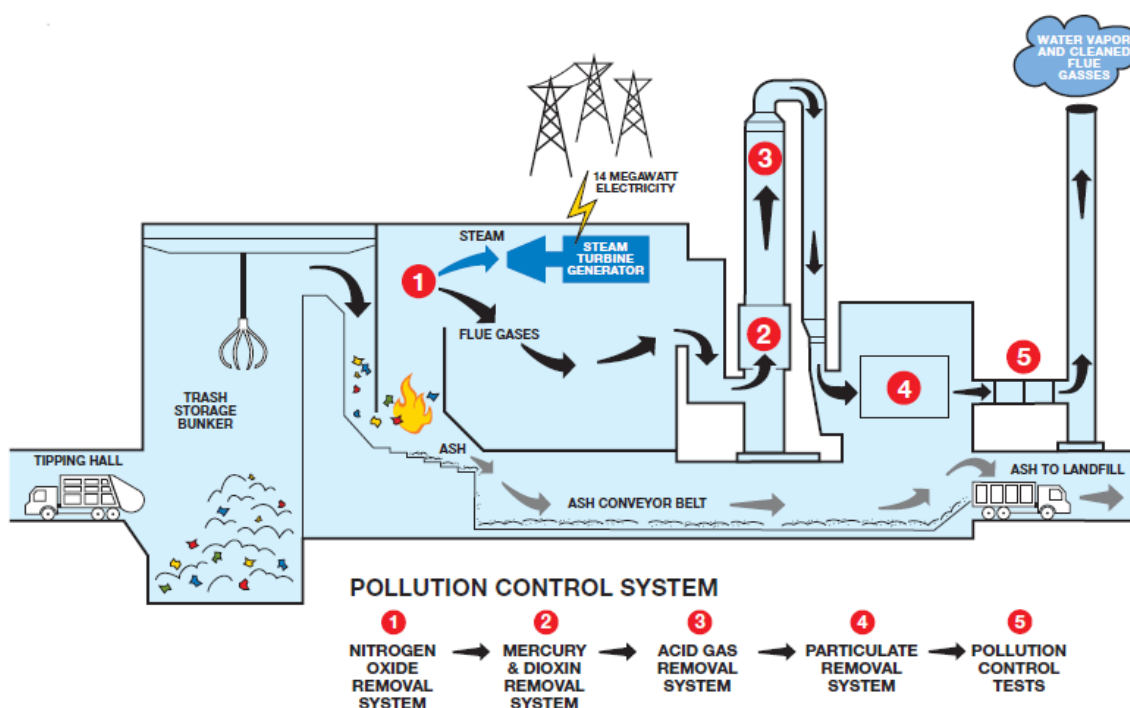


Figura 7 - Diagrama de uma planta de incineração (Ecomaine, 2013).

De maneira resumida, uma planta de incineração funciona da seguinte maneira: Os RSU que chegam à unidade de incineração e são depositados em um fosso, o qual deve ser impermeabilizado e conter mecanismos de drenagem dos líquidos que possivelmente irão se acumular no fundo depois de algum tempo de operação. Isso ocorre pelo fato do RSU ser depositado nestes fossos, sem passar por nenhum tipo preparo. Então os RSU são coletados dos fossos e alimentados, através de gruas, na fornalha do incinerador. É nesta parte da planta que ocorre a combustão dos RSU, transformando-os em cinzas, gases e calor. As cinzas são coletadas e podem ser enviadas aos aterros sanitários ou incorporadas como matéria prima em concreto, asfalto, etc, como mencionado anteriormente. Já os gases tem seu calor aproveitado para geração de vapor através de troca térmica. Existe uma limitação em

relação à temperatura do vapor gerado, normalmente ao redor de 400 °C, para evitar a corrosão prematura de algumas estruturas da caldeira. A obtenção de vapor em níveis mais elevados de temperatura permite uma maior eficiência do ciclo térmico, porém seria necessária a utilização de materiais mais nobres em sua construção e assim mais caros que, segundo consulta com alguns fabricantes, normalmente não se justificam.

O vapor gerado na caldeira pode ser utilizado tanto para geração de energia elétrica através da utilização de turbinas a vapor, como também como fonte de calor de processos industriais e até mesmo aquecimento distrital em regiões de clima frio. Já os gases de combustão, passam pelo sistema de tratamento de gases, que podem envolver diferentes tecnologias dependendo das restrições ambientais de emissões e composição média dos RSU, antes de serem despejados no meio ambiente através de uma chaminé. As maiores preocupações em relação aos contaminantes desses gases recaem sobre os óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), material particulado, dioxinas e furanos. A tabela 3 mostra o limite de emissões estipulados por órgãos ambientais de diferentes países. O material coletado no sistema de tratamento de gases podem conter estas substâncias nocivas que o impossibilita de ser agregado às cinzas geradas na fornalha. Esse material deve ter a mesma destinação que materiais classificados como perigosos.

Tabela 3 - Limites de emissões.

Parâmetro	Unidade	EPA (i)	EU (ii)	CETESB (iii)	Conama (iv)
Material Particulado	mg/Nm ³	20	10	10	70
NO _x	mg/Nm ³	210	200	200	560
SO _x	mg/Nm ³	90	50	50	280
HCl	mg/Nm ³	20	10	10	80
CO	mg/Nm ³	130	50	50	125
Hg	mg/Nm ³	0,05	0,05	0,05	-
Cd + Ti	mg/Nm ³	0,01	0,05	0,05	-
HF	mg/Nm ³	-	1	1	5
Dioxinas e Furanos	mg/Nm ³	0,26	0,1	0,1	0,5

Fonte: (i) EPA 40 CFR Part 40 (Agencia Ambiental Norte Americana); (ii) EU 2007/07/CE (Comunidade Europeia); (iii) CETESB; (iv) CONAMA 316/2002 (Conselho Nacional de Meio Ambiente).

A possível geração de emissões nocivas faz do sistema de tratamento de gases uma das partes críticas no projeto destas caldeiras. Grande parte da crítica a respeito da utilização desta tecnologia como alternativa para destinação final dos RSU recai na qualidade dos gases gerados. É verdade que projetos mal dimensionados ou a operação inadequada de uma planta de *mass burn* pode lançar na atmosfera gases nocivos, como por exemplo dioxina e furanos. Porém essas unidades já apresentam alto grau de automação operacional e sistemas de monitoramento online da qualidade dos gases gerados que possibilitam intervenções instantâneas e automáticas caso algum parâmetro comece a ficar fora do valor estipulado pelas regulamentações ambientais. O monitoramento deve começar na fase de projeto, prosseguindo por uma operação e manutenção adequadas. A eliminação de dioxinas e furanos ocorre através do controle da temperatura de combustão. Esta deve ser mantida acima de 800 °C por um período mínimo de 2 segundos para garantir a quebra dessas moléculas. Já o material particulado pode ser removido por precipitadores eletrostáticos, filtros de manga ou lavadores de Venturi. Por fim as emissões de gases ácidos podem ser controladas por meio de scrubbers.

Novamente pelo fato dos RSU apresentarem uma grande variação de suas características e por isso ser inviável conhecer todos os constituintes que possam se transformar em gases nocivos, toda a operação da planta (que influencia muito as características e composição dos gases gerados) assim como o sistema de tratamento de gases tem que ser planejados e projetados de maneira que atendam as regulamentações ambientais mesmo que os RSU apresentem uma composição ruim do ponto de vista a possível geração de efluentes.

Outra parte que confere alto custo ao investimento de uma planta de *mass burn* é o sistema de queima, que em sua grande maioria emprega o grelhado móvel. Há também a possibilidade de utilizar leito fluidizado, porém se faz necessária a trituração do RSU antes de alimentá-lo na caldeira. O sistema de queima tem que ser capaz de propiciar a queima dos resíduos em diferentes condições de composição (PCI), umidade, granulométrica, entre outras. Para isso, alguns

fornecedores desenvolveram tipos diferentes de grelhado que conferem à caldeira a possibilidade de queimar os RSU de maneira eficaz mesmo com toda essa variação. Os grelhados empregados normalmente são compostos de partes moveis que provocam a movimentação dos resíduos em sua superfície, facilitando assim sua incineração.

O projeto do sistema de queima também influencia nos “3 Ts” que regem os projetos de sistemas de queima: Temperatura, tempo de residência e turbulência.

Apesar de favorecerem a queima dos RSU, as partes moveis do grelhado dessas caldeiras acabam sendo um limitante para o projeto de caldeiras com capacidade de incinerar quantidades superiores a 750 ton/dia ou 31,25 ton/h em um único equipamento devido suas partes moveis.

Mas o grande entrave em relação ao desenvolvimento de novos projetos com o uso da incineração não consiste na disponibilidade de equipamentos capazes de atenderem as normas, mas sim nos altos custos de Capex e Opex dessas plantas, quando comparado a outras formas também consideradas adequadas do ponto de vista ambiental, como os aterros sanitários.

2.3.2. Tratamento Mecânico Biológico

Também chamado TMB ou MBT (seu acrônimo em inglês), é um processo utilizado para tratar resíduos indiferenciados, ou seja, não provenientes de coleta seletiva. Na verdade TMB não é uma tecnologia específica, mas uma combinação de processos destinados ao reaproveitamento de resíduos indiferenciados.

O TMB não reduz de forma significativa o volume final de resíduos, sendo seu objetivo, como modo de gestão de resíduos, minimizar os impactos ambientais associados com a disposição final de resíduos biodegradáveis e obter valor

através da colocação comercial dos seus produtos. Uma característica do TMB é que ele apenas separa e/ou transforma os resíduos em outros produtos para os quais se espera uma colocação comercial (combustível, composto, recicláveis, etc.).

O tratamento mecânico consiste nas atividades de seleção, separação, redução de tamanho e controle de granulometria de modo a obter frações úteis.

O tratamento biológico consiste no tratamento aeróbico ou anaeróbico que tem como objetivo a obtenção de uma fração similar a um composto e quando se tratar de processo anaeróbico, biogás.

Às vezes se atribui também o processo de secagem dos resíduos como uma atividade do TMB.

Alguns dos objetivos buscados através de unidades TMB são listados abaixo, sendo que a peculiaridade de todos esses processos, como já comentado, é que eles não eliminam os resíduos, apenas os transforma em outra coisa, para o qual se espera ter aplicação comercial:

- ❖ Algumas unidades TMB buscam a segregação de recicláveis para comercialização, assim como a redução do volume e a estabilização da fração biodegradável de modo a obter um resíduo bio-estabilizado que não produz mais chorume e biogás;
- ❖ Outras unidades buscam a produção de um Combustível Derivado de Resíduos (CDR) ou RDF do seu acrônimo em inglês, ou seja, a obtenção de um produto mais homogêneo e com maior poder calorífico através de secagem, trituração e/ou “blendagem” com outros combustíveis. Esse produto pode ser então utilizado em fornos industriais, etc. caracterizando uma incineração descentralizada;
- ❖ Por fim existem unidades que buscam o pré-tratamento e a redução do volume de resíduos, como definido no item anterior, para posterior geração de energia em incineradores, de modo a reduzir a capacidade dos incineradores a serem instalados.

Algumas das poucas experiências com tratamento de resíduos que se verificaram no país até o momento podem ser enquadradas em processos TMB ou similares. Este é o caso da tecnologia instalada recentemente no aterro particular de Paulínia, gerido pela empresa ESTRE Ambiental e o da empresa Mundo Limpo, desenvolvida em Niterói (RJ). Ambos os processos são descritos brevemente abaixo:

Paulínia – Estre Ambiental: Apesar de não tratar a fração biodegradável, a usina instalada, com tecnologia Finlandesa, é um exemplo de processo mecânico. A tecnologia é chamada Tyrannosaurus e é a primeira do gênero instalada no Brasil. A Figura 8 representa esquematicamente este sistema, que compreende 6 etapas: recebimento, separação, trituração, eletroímã, peneira e energia (CDR) respectivamente.

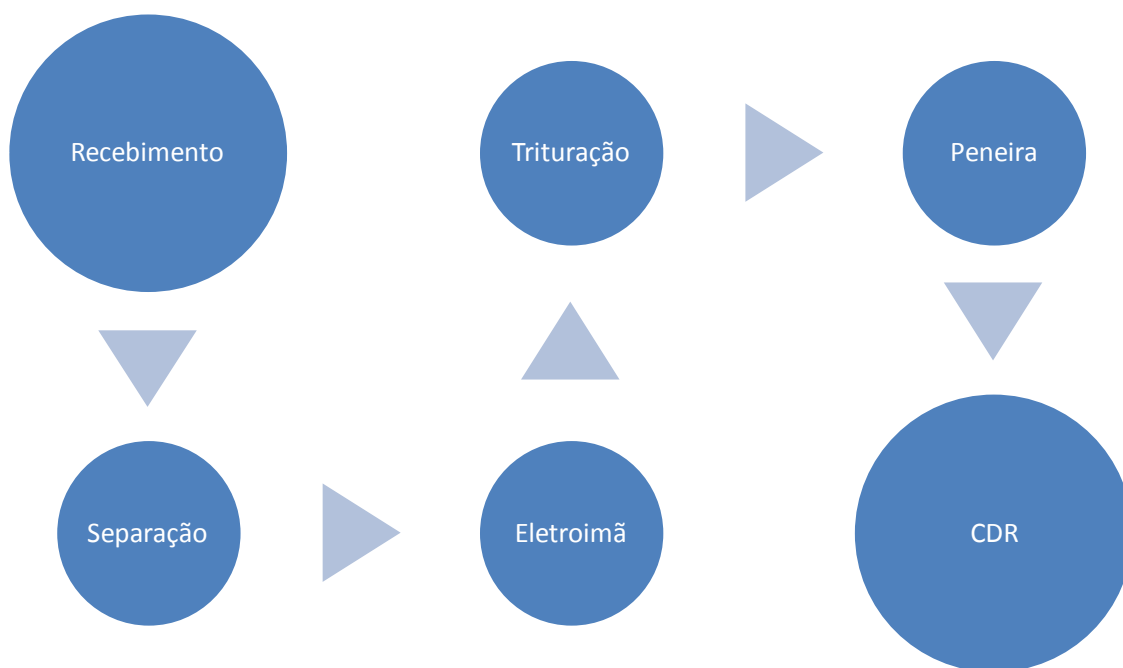


Figura 8 - Sistema de produção de CDR (Elaboração própria).

De acordo com os objetivos anteriormente elencados, a tecnologia se enquadra no segundo caso, ou seja, a homogeneização dos resíduos com maior poder calorífico (borracha, plásticos e papel) para a produção de um combustível (CDR). Neste processo apenas os materiais metálicos são destinados à reciclagem e o material orgânico, é encaminhado para o aterro sem pré-tratamento.

Como as demais tecnologias TMB, ela não representa uma solução final, mas apenas intermediária, sendo altamente dependente do mercado de CDR a ser estabelecido.

Tecnologia Mundo Limpo: Outra experiência nacional, esta com tecnologia brasileira, que pode ser enquadrada em um processo TMB é a da empresa Mundo Limpo, desenvolvida inicialmente em Niterói, RJ.

Com relação aos objetivos elencados anteriormente, esta tecnologia se enquadra na primeira tipologia, ou seja, busca a separação semi-manual de materiais recicláveis e o tratamento dos resíduos biodegradáveis através da trituração e secagem através de secadores rotativos alimentados com gás natural. Através desse processo se consegue que o produto orgânico final seja estabilizado, de modo a não apresentar mais riscos ao meio ambiente. A possibilidade de comercialização dessa biomassa seca, no entanto, deve ser confirmada.

O projeto Tyrannosaurus, embora tenha um objetivo nobre de reduzir o quantitativo de resíduos a ser destinado ao aterro e assim aumentar a vida útil do mesmo, ele pode concorrer diretamente com a reciclagem, pelo fato dos materiais passíveis de serem reciclados normalmente possuem um PCI que é interessante na composição do CDR.

Considerando a possibilidade de comercialização do CDR, além dos fatores ambientais e regulatórios outros problemas a serem enfrentados são a maior corrosão em caldeiras e fornos que utilizam este combustível e também, muito provavelmente, a oposição de comunidades locais à queima de lixo nos seus entorno.

Sobre a tecnologia Mundo Limpo, o objetivo é completamente diferente do anterior, ou seja, o foco é a maior recuperação possível de materiais recicláveis e a estabilização da matéria biodegradável, ambos objetivos muito positivos. Outra característica muito importante deste processo é a utilização de segregação semi-manual, empregando e integrando catadores, um dos objetivos definidos pela política nacional de resíduos sólidos. Resta somente

viabilizar a colocação da matéria orgânica no mercado para evitar a sua disposição em aterros.

A integração de catadores em unidades industriais, com condições de trabalho adequadas é hoje uma exigência social e uma meta política que possibilita geração de renda à população mais humilde e a recuperação de materiais recicláveis. No entanto, esta atividade dificilmente será difundida em âmbito empresarial, devido aos riscos trabalhistas inerentes à atividade.

Uma opção promissora para a separação de recicláveis e a redução de riscos para os catadores é a instalação de sistemas de separação automáticos, que utilizam “peneiras” tipo tambor rotativo, tecnologias de identificação por forma e espectroscopia associada a sistemas com ar comprimido, separadores gravimétricos, etc.. Apesar de reduzir significativamente a quantidade de mão de obra necessária, ela ainda é significativa, porém em condições de trabalho mais dignas.

Esta tecnologia consiste na separação dos RSU em duas frações distintas, através de um processo mecânico, que pode ser, por exemplo, uma peneira rotativa.

- ❖ Fração orgânica: composta basicamente por restos de alimentos e lixos de sanitários, apresentam alta umidade e matéria biodegradável;
- ❖ Fração não orgânica: composta por embalagens plásticas, metais e papéis, não é biodegradável mas apresenta alto poder calorífico.

A Figura 9 ilustra um modelo de equipamento utilizado para separar as frações dos RSU.



Figura 9 - Sistema de separação das frações dos RSU (Kuttner, 2013).

Após se obter a fração orgânica, esta é alimentada em biodigestores, onde ocorre a biodegradação deste material através de microrganismos. Desta reação de biodegradação se obtém o biogás em forma de produto.

O biogás é composto basicamente por gás carbônico (CO_2) e metano (CH_4), sendo este o componente que lhe confere um poder calorífico interessante. Isto possibilita que o biogás possa ser utilizado de varias formas, como por exemplo: Alimentado em motogeradores ou turbinas à gás; combustível para veículos; fonte de calor para processos industriais. Alguns destes usos requerem uma limpeza prévia do biogás antes de sua utilização, pois este normalmente contém em sua composição moléculas como dióxido de enxofre (SO_2) que podem ser danosas aos equipamentos.

As etapas deste processo também já são dominadas por vários fabricantes dos diferentes equipamentos que compõem estas unidades. Neste caso o controle operacional requer um acompanhamento intensivo no que se refere a qualidade do material a ser alimentado no biodigestor. Isto porque o processo de biodigestão que ocorre pode ser afetado por vários fatores, entre eles: pH; inoculação; fração orgânica dos RSU; proporção carbono/nitrogênio; toxicidade por sulfeto; toxicidade por amônia; temperatura.

2.3.3. Aproveitamento de biogás de aterros sanitários

Os aterros sanitários correspondem ao modelo mais utilizado atualmente no Brasil para destinação dos RSU. Apesar de não reduzir o volume final ocupado pelos RSU e representarem um passivo ambiental após o encerramento de sua vida útil, os aterros apresentam custos operacionais interessantes atrativos. Porém questões referentes aos cuidados necessários após o encerramento das operações e por quanto tempo eles seriam demandados, são pontos que podem incrementar esses custos. Através da figura 10 podemos avaliar as dimensões requeridas para implantação de um aterro sanitário.



Figura 10 - Vista aérea do aterro sanitário Bandeirantes (HFC 2013).

A construção de um aterro requer cuidados e o atendimento de normas específicas que necessitam, entre outras coisas, de impermeabilização do solo, drenagem de chorume, drenagem de biogás, drenagem de pé de talude, drenos de monitoramento, procedimento para compactação do lixo, cobertura com argila, balança para pesagem dos resíduos a serem aterrados e sistema de tratamento de chorume. A figura 11 ilustra todas essas estruturas necessárias em um aterro sanitário.



Figura 11 – Ilustração de um aterro sanitário (GrandeBahiaonline 2013).

Os RSU chegam ao aterro, em sua grande maioria, através de transporte rodoviário, diretamente do local onde foi coletado, ou oriundo de um ponto de separação de recicláveis. Passam primeiramente pelo sistema de pesagem que permite um acompanhamento do montante de resíduo aterrado. Cada caminhão possui uma identificação que possibilita rastrear sua procedência. Esse sistema é fundamental principalmente em aterros sanitários que aterram RSU provenientes de diferentes cidades.

Em seguida os caminhões são encaminhados para descarregar os RSU no local onde estes serão aterrados, chamado de célula. As células de um aterro sanitário devem ser revestidas por material impermeável, visando impedir a contaminação do solo. A figura 12 mostra um caminhão descarregando os RSU em uma célula de aterro sanitário.



Figura 12 - Descarregamento de RSU em uma célula de aterro sanitário (Sempretops 2013).

À medida que a capacidade de recebimento de cada célula é esgotada elas são seladas, o que possibilita a captação do biogás proveniente da degradação da componente orgânica.

Apesar de muitas dessas unidades apresentarem sistema de captura do biogás gerado pela decomposição dos RSU, são poucos os aterros que fazem o aproveitamento energético do biogás gerado. A Figura 13. apresenta de forma simplificada um esquema de como é possível gerar energia elétrica através do biogás de aterros sanitários.



Figura 13 - Aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário (PECORA et al., 2008).

O biogás gerado nos aterros é o resultado da decomposição dos RSU que são depositados. Ocorre de maneira natural, o que torna os sistemas de extração, mostrados na Figura 14, e limpeza desse gás, etapas primordiais para um aproveitamento eficiente do biogás.



Figura 14 - Sistema de extração de biogás (Encbioenergy 2013).

A captação, drenagem, a extração, o aproveitamento e, caso este não seja possível, a queima do biogás gerado nos aterros sanitários são exigidas pelas

normas relativas aos aterros sanitários, pelo fato do gás metano, que representa praticamente 50% da composição do biogás, contribuir cerca de 20 vezes mais para o efeito estufa em comparação com o dióxido de carbono. Logo, a utilização do biogás como recurso energético é uma forma de minimizar este efeito negativo para o meio ambiente.

A recuperação energética dos RSU por meio do uso do biogás pode se dar através do uso de motogeradores (ciclo Otto), microturbinas (ciclo Brayton), ou até mesmo como fonte de calor em processos produtivos. Os possíveis usos do biogás de aterro são os mesmos que para o biogás gerado no TMB, assim como a composição do biogás.

2.4. Projetos de Recuperação Energética em Andamento no País

Alguns municípios Brasileiros já apresentam projetos em estágio bem avançados que propõe a recuperação energética como uma das etapas do gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos. Alguns já estão em operação, como é caso dos aterros Bandeirantes e São João que geram energia elétrica através de motogeradores, utilizando como combustível o biogás gerado nesses aterros. Há também processos em fase de licitação ou de licenciamento ambiental, entre os quais o mais avançado é o projeto do município de Barueri, no estado de São Paulo. Neste, o município abriu uma licitação através da qual a empresa “Foxy Participações” ganhou o direito de implantar e explorar comercialmente uma usina de recuperação energética através da incineração dos RSU. O projeto já obteve a licença prévia de instalação e aguarda apenas a licença ambiental de instalação para começar as obras de instalação.

2.5. Considerações preliminares

A bibliografia pesquisada oferece dados sólidos que irão possibilitar uma análise mais profunda a respeito de cada tecnologia, custos atrelados a elas e assim um panorama de alternativas que poderiam ser aplicadas, em especial, para destinação dos RSU na RMC. Sempre buscando atender as normativas que esta questão está sujeita, podendo inclusive propor mecanismos necessários para uma maior utilização das tecnologias disponíveis.

Outras tecnologias, como por exemplo, a gaseificação, a pirólise e até mesmo o plasma, não foram analisadas pelo fato de inexistir um histórico de plantas comerciais de escala considerável utilizando alguma destas tecnologias visando o aproveitamento energético dos RSU, apesar de apresentarem algumas vantagens e poderem também atender as normativas técnicas, precisando apenas desenvolver a questão de confiabilidade e histórico operacional.

3. ALTERNATIVAS PARA RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DOS RSU GERADOS NA RMC

Atualmente nenhum dos aterros sanitários e controlados aos quais são destinados os RSU da RMC, tem algum tipo de recuperação energética. Apesar de apresentarem em sua grande maioria uma destinação considerada adequada, um grande potencial de energia também é aterrado diariamente junto com os resíduos.

O aterro particular de Paulínia, para onde são destinados 45% do total dos RSU gerados na RMC (Inventário Cetesb 2011) é um dos mais modernos do Brasil e tem um robusto sistema de captação de biogás. Porém a totalidade desse biogás é queimada em flares, conforme mostrado na figura 15, visando à receita oriunda dos créditos de carbono. Essa receita se justifica pelo fato da

queima transformar o gás metano (CH_4) contido no biogás em dióxido de carbono (CO_2), já que este é 20 vezes menos prejudicial ao efeito estufa.



Figura 15 - Flares para queima de biogás (Globo.com 2013).

O potencial de geração de energia através dos RSU é baixo se comparado com o potencial de outras fontes alternativas como a biomassa e principalmente a eólica, mas não pode ser descartada, pois apresenta outros inúmeros benefícios diretos e indiretos quando utilizada como fonte de geração de energia.

Um fato que evidencia o potencial dos RSU como fonte energética foi à notícia publicada no caderno “Ambiental” do jornal “Folha de São Paulo”, no mês de junho, com a seguinte manchete: “Noruega importa lixo para produzir energia”. A notícia se refere ao fato do país citado usar os RSU como combustível alternativo à geração de energia elétrica e também energia térmica, sendo esta última utilizada no aquecimento distrital de algumas localidades daquele país. Segundo a notícia, mesmo sendo um dos dez maiores países exportadores de petróleo e gás, ter abundantes reservas de carvão e uma rede de mais de 1.100 usinas hidrelétricas em suas montanhas, ricas em água, a Noruega usa a queima dos RSU para geração de energia como uma maneira de compensar e reduzir a utilização dos combustíveis fósseis. Ainda segundo a notícia, alguns países europeus vêm apostando no lixo como uma fonte energética alternativa.

Considerando as tecnologias analisadas no capítulo 2, foi realizada uma análise técnica e econômica em relação as alternativas para o aproveitamento energético dos RSU na RMC. É importante resaltar que as três alternativas analisadas atendem a todos os critérios da PNRS, desde que seja elaborada

uma política de gestão para os RSU. Há outras tecnologias que podem se mostrar interessante como é o caso da gaseificação, mas pelo fato de ainda não haver um histórico de plantas comerciais de grande porte utilizando esta tecnologia como rota para o aproveitamento energético dos RSU, não foram analisadas neste estudo.

3.1. RMC: geração e disponibilidade de RSU

A RMC é formada por 19 municípios, esta localizada na região centro-leste do estado de São Paulo, é uma das mais desenvolvidas do país. Ocupa a segunda posição de região mais rica do estado, ficando atrás apenas da região metropolitana da cidade de São Paulo.

Com uma economia dinâmica e diversificada pela forte presença de montadoras de veículos, empresas de tecnologia, prestadoras de serviços diversificados e indústrias de ponta com destaque para a maior refinaria de petróleo da Petrobrás, a REPLAN, localizada na cidade de Paulínia. A RMC conta com a presença de um importante polo têxtil, situado na região dos municípios de Americana, Hortolândia, Sumaré, Nova Odessa e Santa Bárbara do Oeste. Também contempla o polo de alta tecnologia (CIATEC - Companhia de Desenvolvimento do Polo de Alta Tecnologia de Campinas), que agrega várias empresas de tecnologia de ponta, incubadoras e desenvolvimento de pesquisa.

Essa composição confere à RMC um mercado de trabalho dinâmico, com muitas oportunidades em diversos segmentos, dispondo de mão de obra qualificada, formada em ótimas universidades (destaque para a Unicamp), escolas técnicas e faculdades particulares.

Com uma malha rodoviária moderna, aeroporto internacional (Viracopos), ferrovias e etc, a RMC apresenta uma infraestrutura diferenciada principalmente quando comparamos à realidade nacional. Conforme podemos

observar na figura 16, a região apresenta uma ramificada malha viária, o que pode ser bem aproveitado no momento de definição de um ponto ótimo para localização de uma possível unidade de recuperação energética. Isso pode representar uma diminuição significativa nos custos operacionais já que a logística desses RSU são altos.



Figura 16 - Sistema viário da RMC (Prefeitura Municipal de Santa Barbara d'Oeste 2012).

Através da análise do mapa acima e da Tabela 2, onde está especificada a população dos municípios que compõe a RMC, verifica-se que a região mais indicada para a localização de uma planta visando o aproveitamento dos RSU da região seria as proximidades da divisa entre os municípios de Campinas e Paulínia. Vale lembrar que Paulínia é o município onde está localizado o aterro sanitário particular gerido pela empresa Estre, e que atualmente já recebe 45% (Inventário Cetesb 2011) dos resíduos gerados na RMC.

A redução do custo logístico não beneficia diretamente a viabilidade de uma planta de recuperação energética, mas impacta significativamente no custo global de gerenciamento dos RSU. Assim uma redução destes custos pode abrir margem para um custo maior com a destinação final, caso necessário, sem precisar elevar os gastos públicos neste setor.

Porém, fica evidente que os municípios localizados na periferia da RMC, acabariam por despende mais recursos na questão logística de seus resíduos. Por este fato, e por estar sendo analisada uma solução que visa beneficiar a todos, uma opção é a equalização de custos totais (logística + destinação final) para as prefeituras que compõem a RMC, proporcional aos RSU gerados. Em outras palavras, a soma dos custos com logística e destinação final dos RSU, através do aproveitamento energético dos RSU, deve ter o mesmo valor por tonelada, para todos os municípios. Para isso o município que se beneficiar por estar mais próximo da planta de recuperação energética, deve pagar a mais pela destinação dos RSU, e vice-versa. Até o ano de 2011 não era empregada nenhuma estrutura de consórcio municipal na RMC visando a gestão dos RSU (Cetesb, 2011).

3.2. Avaliação da Incineração como uma alternativa

Apesar de, no Brasil, ainda não existir nenhuma planta de incineração de resíduos com aproveitamento energético em escala comercial e em operação, essa é uma tecnologia muito utilizada em países como EUA, Inglaterra, Alemanha, Holanda, Espanha, Portugal, Bélgica, entre outros.

Também conhecido como *mass burn*, consiste na queima dos RSU em caldeiras, as quais possuem estruturas projetadas para gerar vapor através do calor fornecido pela combustão deste material. O vapor gerado aciona uma turbina acoplada a um gerador que transformará a energia mecânica em energia elétrica. Devido às características dos RSU, essas caldeiras apresentam algumas limitações, como por exemplo em relação à temperatura e pressão do vapor gerado, o que diminui a eficiência termodinâmica do ciclo.

Uma das grandes vantagens desta tecnologia é a redução do volume dos resíduos, que após a queima, representam aproximadamente 10% do volume processado. Este material, que saía em forma de cinzas, normalmente é inerte e classificado como resíduo não perigoso, possibilitando que este seja

destinado a aterros sanitários ou então incorporado como matéria prima na fabricação de materiais cerâmicos, por exemplo. Indiretamente, proporciona uma vida útil dos aterros pelo menos 10 vezes superior ao que ele teria caso os RSU fossem todos aterrados.

Esta tecnologia dispensa a necessidade de um pré-tratamento dos RSU, podendo estes serem processados da maneira que chegam à unidade de incineração. É importante destacar que não existe nenhum tipo de incompatibilidade entre esta tecnologia e a reciclagem ou coleta seletiva, pois ambas podem ser realizadas numa fase anterior. Apesar de poder reduzir o poder calorífico dos RSU, pelo fato de extrair uma parcela de materiais como plásticos e papel, a reciclagem não inviabiliza a implantação de usinas de incineração. O uso desta tecnologia é interessante como alternativa de recuperação energética apenas dos RSU que seriam destinados a algum aterro, ou seja, que não apresentam vantagens de serem reciclados.

As unidades de incineração são compostas também por um sistema de tratamento para os gases de combustão, de maneira que as emissões atendam os limites impostos pelas legislações ambientais. Isto possibilita que estas plantas possam ser instaladas próximas às cidades. Esta é uma grande vantagem em grandes centros populacionais onde as áreas para instalação de novos aterros sanitários estão se tornando cada vez mais escassas. A proximidade dessas unidades às cidades pode reduzir consideravelmente os custos com a logística dos RSU, além de proporcionarem uma vantagem ao sistema elétrico por serem instaladas próximos à centros de consumo. Em vários países Europeus estas unidades estão instaladas praticamente dentro de cidades, como observado na Figura 17, abaixo.



Figura 17 - Planta de incineração de RSU (Doosan 2012).

Por outro lado, estas unidades exigem um alto valor de investimento, o que as tornam viáveis apenas para cidades ou regiões com uma população normalmente superior a 800 mil habitantes, ou que apresentam uma geração de 720 ton de RSU por dia aproximadamente. Esses valores se justificam pela necessidade de se utilizar materiais mais nobres na construção desses equipamentos já que estes operam sob condições severas. As partes que tem impacto sobre os valores elevados são os sistemas de queima e de limpeza dos gases de combustão. A queima dos RSU pode, pelo fato da sua heterogeneidade, gerar diversos tipos de gases como SO_x , NO_x , particulados, dioxinas, furanos, entre outros, que devem ser removidos antes de serem lançados na atmosfera.

3.2.1. Impactos de uma planta de incineração na RMC

A grande vantagem das usinas de incineração é a redução do volume dos rejeitos que precisam ser aterrados. Em uma região com uma densidade

demográfica alta isso tem um peso relevante pela dificuldade em licenciar novas áreas para instalações de aterros sanitários. Logo a prolongação da vida útil dos já existentes é bem vista.

Estas plantas necessitam de uma área pequena, podendo ser localizada sem nenhum problema em um bairro industrial. Isso pode trazer a possibilidade também de venda de energia térmica (vapor) para indústrias vizinhas.

Considerando o montante de RSU gerados na RMC, aproximadamente 1.600 toneladas por dia, e a capacidade das plantas de incineração indicadas por alguns fabricantes, 2 linhas de incineração seriam suficientes para processar todo o RSU. Isso corresponderia a uma planta de aproximadamente 25 MW instalados e uma comercialização de energia elétrica ao redor de 170.200 MWh por ano, se considerarmos o PCI do RSU sendo de 1.900 kcal/kg em média.

Através de planos de manutenção corretos e a realização de overhall, essas plantas podem continuar em operação na mesma área, sem necessidade de buscar novos locais, e caso no futuro se opte pela paralisação das atividades, a área da usina pode ser utilizada para outra atividade sem restrição, pois a incineração não altera em nada as condições do solo.

3.3. Avaliação do Tratamento Mecânico Biológico como alternativa

O TMB é uma alternativa que pode ser formatada de diversas formas, podendo-se assim variar também a geração de receitas. Através da fração inorgânica pode ser produzido o CDR, e os rejeitos da biodigestão da fração orgânica podem ser aproveitados como fertilizantes.

A comercialização da fração inorgânica na forma de CDR é uma opção interessante pelo fato de corresponder por uma maneira do aproveitamento energético dos RSU, gerando receita e reduzindo o volume de rejeitos a serem aterrados, podem também substituir combustíveis fósseis em alguns sistemas

produtivos. Sem esta alternativa o processo do TMB não reduz de maneira significativa o volume de resíduos que necessitam ser aterrados.

A utilização dos rejeitos da biodigestão como fertilizantes é condicionada a análises de sua composição. A garantia de que os rejeitos estarão sempre livres de contaminação, atrelados a grande heterogeneidade dos RSU é o um entrave de sua utilização. Mas a biodigestão traz o benefício de oxidar a matéria orgânica antes de aterra-la em um aterro sanitário. Estabilizada a fração orgânica, o acompanhamento do aterro fica mais simples e diminuí o risco de instabilidade do terreno.

A Figura 18 Ilustra os processos envolvidos nesta análise, que corresponde a uma das possíveis formas de gerar receita através do TMB.

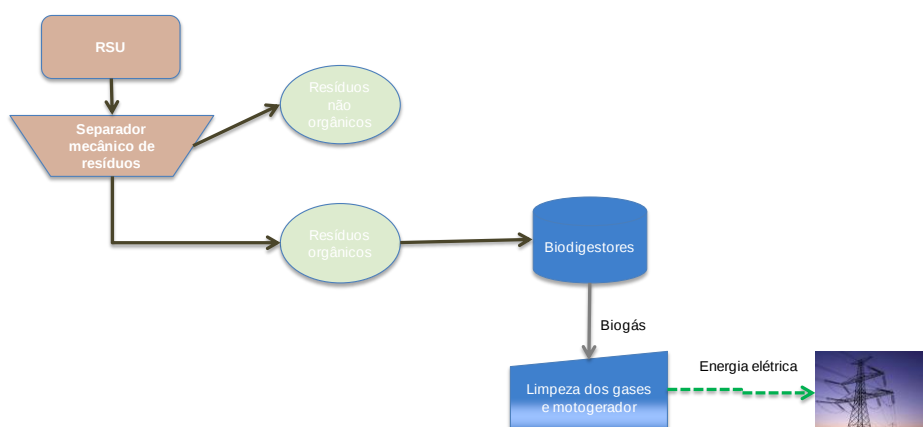


Figura 18 - Fluxograma do processo de TMB dos RSU (Elaboração própria).

O processo consiste basicamente na recepção dos RSU, seguida da sua separação em duas frações: orgânica e não orgânica. Essa é uma etapa mecânica que pode ser realizada, por exemplo, através de peneiras rotativas, considerando que a fração orgânica dos RSU normalmente apresenta uma granulometria menor do que a fração não orgânica. Pelo fato dos RSU normalmente estarem acondicionados em sacos plásticos, é necessária a instalação de um sistema que possibilite a ruptura destas embalagens antes dos RSU passarem pelo sistema de separação.

Como todo sistema de separação, este também não é 100% eficaz, possibilitando quantidades residuais de resíduos não orgânicos na fração orgânica, mesmo após a separação.

3.3.1. Impactos de uma planta de TMB na RMC

O fato da RMC ser altamente industrializada, abre espaço para exploração de todas as alternativas apresentadas pelo TMB.

Desde que tenha licença para comercialização, o CDR poderia ser utilizado por inúmeras indústrias da região em substituição de combustíveis fósseis. Através do montante de RSU gerados na RMC, seria possível obter aproximadamente 720 toneladas por dia deste combustível. Além de gerar receita, prolongaria de maneira significativa a vida útil dos aterros em operação e seria uma maneira do aproveitamento energético dos RSU.

As características da região também possibilitam alternativas para utilização do biogás gerado pela biodigestão da fração orgânica. Poderia, após passar por um sistema de limpeza, ser alimentado diretamente em motogeradores de combustão interna, obtendo-se energia elétrica ou então ser purificado e incorporado a rede de gás natural. Ambas são formas de aproveitamento energético dos RSU.

No aterro sanitário de Paulínia existe uma unidade de separação das frações orgânicas e não orgânicas. Com capacidade para processar até 1.000 ton por dia de RSU, o principal objetivo da empresa proprietária é comercializar o CDR. Porém ainda não há um mercado consolidado na região, pela falta de conhecimento a respeito das emissões que possam provocar e consequentemente pela falta de licenças ambientais.

3.4. Avaliação do uso do biogás de aterro sanitário como alternativa

Atualmente a totalidade dos RSU gerados na RMC são destinados à aterros. As cidades de Campinas, Indaiatuba, Pedreira e Santa Barbara d'Oeste possuem aterros municipais próprios. Todos os demais municípios que fazem parte da RMC destinam seus RSU ao aterro sanitário particular localizado na cidade de Paulínia. Este é um aterro modelo, com toda a infraestrutura necessária, inclusive o sistema de drenagem de biogás gerado pela decomposição dos RSU aterrados. Porém todo o biogás gerado era, até o ano de 2012, queimado em flares visando à receita de créditos de carbono. O potencial de geração de energia através desse biogás é grande, pois este aterro recebe também os RSU de outros municípios que não compõe a RMC.

Os aterros são a forma mais empregada no Brasil para destinação final dos RSU, principalmente pelo fato de necessitar baixo custo de investimento e operação barata e simplificada. No Brasil, este baixo custo operacional resulta da não especificação de alguns fatores como, por exemplo, o montante de biogás que deve ser drenado. Estudos apontam que praticamente metade do biogás gerado nos aterros é emitido à atmosfera através da superfície.

Se as restrições aos parâmetros operacionais dos aterros fossem mais severas, como no caso das plantas de incineração, seu custo seria mais elevado.

Um ponto que chama atenção no estudo de implantação de unidades de recuperação energética em aterros é a curva de geração de biogás em função do tempo. A Figura 19 ilustra o perfil de geração de biogás em um aterro sanitário. O pico da curva corresponde ao fim das operações no aterro.

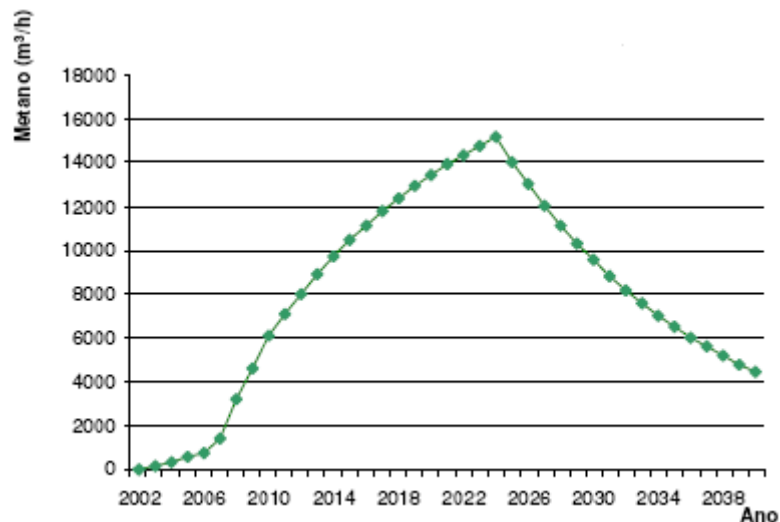


Figura 19 - Perfil de geração de metano em um aterro sanitário (Figueiredo, 2007).

A importância em se conhecer e prever a geração de biogás no aterro consiste no fato de dimensionar as unidades geradoras, que podem ser motogeradores, de forma que o sistema não fique ocioso, proporcionando custos desnecessários.

3.4.1. Impactos do uso do biogás de aterro sanitário na RMC

Pelo fato da totalidade dos RSU gerados na RMC estarem sendo destinados atualmente à aterros sanitários, existe um potencial significativo de geração de biogás nesses locais. Mesmo que a totalidade dos RSU deixassem de ser destinados a esses aterros, estes ainda continuariam a gerar metano pelos próximos anos.

A RMC oferece a oportunidade de esse biogás gerado ser purificado, buscando se obter um gás rico em metano, e inseri-lo na rede de gás natural ou comercializa-lo diretamente com potenciais consumidores. No caso de inseri-lo na rede de gás natural, deverão ser verificados e atendidos todos os requisitos necessários. Outra opção seria simplesmente queima-lo em motogeradores, por exemplo, para geração de energia elétrica.

Pelo fato da RMC ser uma das mais povoadas do Brasil, a disponibilidade de novas áreas para instalação de aterros e inviabilização de utilizar áreas aterros cuja as atividades já foram encerradas são questões que devem ser consideradas.

3.5. Comparação das tecnologias

As características da RMC favorecem a exploração de várias alternativas para a implantação de tecnologias que visem a recuperação energética dos RSU. A Tabela 4 compara essas alternativas e traz os custos estimados de implantação, operação e manutenção das tecnologias analisadas neste trabalho, considerando o dimensionamento necessário para o processamento de 100% dos RSU gerados na RMC.

Tabela 4 - Comparativo entre as tecnologias

Custos \ Tecnologia	Incineração	TMB	Biogás de aterro sanitário
Investimento	R\$ 450 milhões	R\$ 550 milhões	R\$ 30 milhões
Operação e manutenção	R\$ 18 milhões/ano	R\$ 22 milhões/ano	R\$ 3,2 milhões/ano
Alternativas de receitas	Energia elétrica e energia térmica (vapor)	CDR, fertilizantes, energia elétrica e energia térmica (gás)	energia elétrica e energia térmica (gás)

Fonte: Elaboração própria.

Os valores foram estimados através de pesquisas de mercado, levantando os custos de instalações semelhantes, e apresentam variação pelo fato de haverem diferentes possibilidades de configuração assim como diversas fontes de receitas. Este é um ponto que dificulta o estudo de viabilidade financeira de um projeto de recuperação energética de RSU. As possíveis receitas estão ligadas a mercados bem distintos, como por exemplo no caso do TMB, que pode ter receitas a partir da comercialização de CDR, que é um combustível, da mesma maneira que pode obter receitas da venda de energia elétrica. As unidades de incineração podem ser configuradas de maneira que possibilite a

venda conjunta de vapor e energia elétrica para uma planta industrial anexa por exemplo. Da mesma maneira um aterro sanitário em operação permite tanto a geração de energia elétrica através do uso de motogeradores quanto a comercialização de um gás combustível com características similares ao gás natural, após passar por um sistema de purificação como citado anteriormente.

O fato da maioria das configurações possíveis estar ligada de alguma maneira a geração de energia elétrica, coloca as empresas de geração de energia como possíveis investidores de projetos como esse. Por outro lado, essas empresas são conhecidas pela baixa exposição a riscos comerciais, ou seja, buscam projetos que mesmo apresentando uma baixa taxa de retorno de seus investimentos, apresentem contratos de comercialização de energia de longo prazo que garantam o retorno esperado. Como no caso dos projetos de recuperação energética, a receita oriunda apenas da comercialização de energia elétrica não é suficiente para viabilizar economicamente o projeto. Considerando os valores atuais de comercialização de energia elétrica, essas empresas necessitam conhecer mais a respeito do comportamento dos mercados responsáveis pelas outras receitas.

Os investimentos também poderiam partir de empresas que já atuam no segmento de destinação final de RSU. Porém neste caso, o desconhecimento recai sobre o mercado de comercialização de energia elétrica.

4. CONCLUSÕES

Conforme observado, todas as três alternativas analisadas são viáveis, do ponto de vista técnico, para a recuperação energética na RMC. Hoje a região da um destino considerado correto pela PNRS para a totalidade dos RSU gerados, porém aterra ou queima um potencial de aproximadamente 170.200 MWh por ano. Considerando dados do Banco Mundial que apontaram no Brasil um consumo *per capita* médio de 2.383 KWh por ano em 2010, a energia elétrica gerada através da recuperação energética destes RSU poderia ser capaz de suprir o consumo de 2,5% da população da RMC.

Muitos fatores devem ser considerados ao analisar a recuperação energética dos RSU. Uma delas é qual seria o modelo de negócio ideal, ou quem seria responsável por fazer os investimentos: Setor público ou privado.

O setor público poderia esbarrar na falta de preparo para gerenciar um projeto desta natureza, que envolve alto custos de investimentos e retornos atrelados à uma gestão eficaz. Por outro lado o setor privado enxerga dificuldades referente aos possíveis riscos políticos, jurídicos e pelo fato desse negócio envolver diferentes setores da economia, como por exemplo o elétrico e o ambiental. As parcerias público privadas (PPP) e leilões exclusivos para comercialização da energia proveniente desse tipo de geração poderiam ser ações que mitigariam os riscos enxergados pelos possíveis investidores, assim como a estruturação de consórcios contendo empresas dos diferentes mercados envolvidos. Essa é uma questão que vale para todas as regiões brasileiras.

Um ponto que tem que ser considerado ao analisar qual seria a melhor alternativa para a RMC é a disponibilidade de áreas para novos aterros. Diante deste fato, a incineração e o TMB, este considerando o uso do CDR, seriam as melhores alternativas para propiciar o aumento da vida útil dos aterros que estão em operação atualmente, diminuindo a necessidade por novas áreas. Apesar de apresentarem custos mais elevados de investimento e operação em relação aos aterros, proporcionariam a busca para solucionar um problema que apareceria nas próximas décadas, porém com um custo bem mais elevado.

Por outro lado o aproveitamento energético do biogás gerado nos aterros hoje em operação é possível e viável, devendo ser aproveitado ainda mais considerando a baixa no mercado de créditos de carbono que já rederam boas receitas às empresas proprietárias de aterro pelo simples fato de queimarem o biogás. Neste caso a incerteza dos investidores recai em cima da previsão de geração de biogás, ou seja, qual será o perfil da curva de geração de biogás. Experiências como foi o caso do aterro Bandeirantes (SP) onde a curva de decaimento de geração de biogás no aterro foi mais rápida que o projetado, deixam outros potenciais investidores com receio de investir.

O fato da maioria das alternativas proporcionarem geração de energia elétrica como produto final, faz deste mercado um fundamental aliado na busca por uma solução adequada. Em vários países da Europa, por exemplo, uma parte das receitas que remuneram os investimentos provem da venda de energia elétrica, apesar de não ser a única. Contratos de longo prazo para a comercialização dessa energia gerada, entre 20 e 30 anos, com valores diferenciados que poderiam ser obtidos através de leilões de compra de energia exclusivos, seriam alternativas que facilitariam a captação de financiamentos, e que consequentemente incentivariam os investidores a entrar nesse mercado. Outro ponto seria as PPPs considerarem valores diferenciados para o chamado “tipping fee”, valor pago pelas prefeituras às empresas que fazem a destinação final dos RSU. Esta é outra receita fundamental para alcançar a viabilidade desses projetos, principalmente quando as alternativas de recuperação energética apresentarem um conceito mais nobre e adequado à realidade da região. Não seria ideal, por exemplo, que empresas propondo soluções diferenciadas, como aterro sanitário e incineração, participassem da mesma licitação considerando apenas o menor custo de “tipping fee”.

Linhas de financiamentos especiais com taxas de juros reduzidas, período de carência ao menos igual ao prazo de implantação e um prazo para amortização similar ao da PPP, seriam fundamentais para a viabilidade destes projetos.

Pelas questões levantadas, apesar de apresentarem custos mais elevados em relação ao dos aterros sanitários, a incineração ou o TMB seriam as alternativas mais indicadas para a recuperação energética na RMC.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2011.**

Agência Metropolitana de Campinas. Disponível em: <<http://www.agemcamp.sp.gov.br/>>. Acesso em: 25 mai. 2013.

BARROS, Regina Mambeli. “**Tratado sobre Resíduos Sólidos – Gestão, uso e sustentabilidade**”. Editora Interciência, Rio de Janeiro – 2013.

CALDERONI, S. “**Os Bilhões Perdidos no Lixo**”, 3ª edição, Humanitas, 1999.

CEPEA, Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - ESALQ-USP. **Estudo do potencial de geração de energia renovável proveniente dos “aterros sanitários” nas regiões metropolitanas e grandes cidades do Brasil.** Piracicaba, 2004.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo 2011.**

Doosan. Catálogo de equipamentos.

Ecomaine 2013. Disponível em: <<http://www.ecomaine.org/electricgen/index.shtm>>. Acessado em: 27 de mai de 2013.

Encbioenergy. Disponível em <www.encbioenergy.com>. Acessado em: 05 de Jun de 2013.

Figueiredo, N. J. V., **Utilização do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás – estudo de caso.** (Trabalho de Graduação Interdisciplinar). Universidade Presbiteriana Mackenzie. Escola de Engenharia, Dpto. de Engenharia Mecânica. São Paulo, 2007.

Globo. com. Disponível em <www.globo.com>. Acessado em: 30 de mai de 2013.

GrandeBahiaonline. Disponível em <www.grandebahiaonline.blogspot.com.br>. Acessado em: 6 de Jun de 2013.

HFC. Heleno & Fonseca Construtécnica S.A. Disponível em <<http://www.hfc.com.br/site.htm>>. Acessado em: 10 de Jun de 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**.

ISWA. International Solid Waste Association. **Waste-to-Energy - State-of-the-Art-Report**, 6th Edition.

Kuttner. Catálogo de equipamentos.

“Noruega importa lixo para produzir energia”. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 18 de Junho de 2013. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/ambiente/2013/06/1296446-noruega-importa-lixo-para-produzir-energia.shtml>>

Santos, Guilherme Garcia Dias dos. **Análise e Perspectivas de Alternativas de Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos: o Caso da Incineração e da Disposição em Aterro**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

Sempretops. Disponível em <www.sempretops.com.br>. Acessado em: 05 de Jun de 2013.

Vanessa Pecora GARCILASSO; Renata GRISOLI; Cristiane Lima CORTEZ; Manuel Moreno Ruiz POVEDA; Amanda Veit BRAUNE; Angelo LIMA; Suani Teixeira COELHO; Alex NOGUEIRA; Luís Eduardo FERNANDES; Gil Anderi SILVA; Anna Karin Elisabeth Bernstad Saraiva SCHOTT. **Comparação do desempenho ambiental de alternativas para a destinação de resíduos sólidos urbanos com aproveitamento energético**. Trabalho publicado, apresentado e premiado na categoria Pôster no III Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida de Produtos e Serviços, 03 a 06 de setembro de 2012, Maringá, PR, Brasil.

Vanessa Pecora GARCILASSO; Sílvia Maria Stortini González VELÁZQUEZ; Suani Teixeira COELHO. **Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás**

Proveniente de Aterro Sanitário - Estudo de Caso. Trabalho publicado no evento: XIII Congresso Brasileiro de Energia - XIII CBE, 09 a 11 de novembro de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Vanessa PECORA; Sílvia Maria Stortini González VELÁZQUEZ; Suani Teixeira COELHO. **Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica: Estudo de caso em São Paulo.** Trabalho publicado no evento: IV Congresso Internacional de Bioenergia, 18 a 21 de agosto de 2009, Curitiba, PR, Brasil.

Cenbio. Centro Nacional de Referência em Biomassa. Seminário **"Impactos Ambientais e Sociais do Tratamento e Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos"**. São Paulo, 8 mar 2013.

____. United States Environmental Protection Agency Solid Waste and Emergency Response. **Waste Transfer Stations: A Manual for Decision-Making.** June 2002. Disponível em: <<http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/pubs/r02002.pdf>>. Acesso em 20 de mai de 2013.