



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

VIABILIDADE ECONÔMICA RELACIONADA AO TRATAMENTO E À DISPOSIÇÃO  
FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

MARIANA GOMES CARDOSO DE ABREU

BELO HORIZONTE

2019

MARIANA GOMES CARDOSO DE ABREU

VIABILIDADE ECONÔMICA RELACIONADA AO TRATAMENTO E À DISPOSIÇÃO  
FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Centro Federal de Educação Tecnológica de  
Minas Gerais como requisito parcial para  
obtenção do título de Engenheira Ambiental e  
Sanitarista.

Orientador: Prof. Dsc. Arnaldo Freitas de Oliveira Junior

Coorientador: Prof. Dsc Cícero Antônio Antunes Catapreta

Belo Horizonte

2019

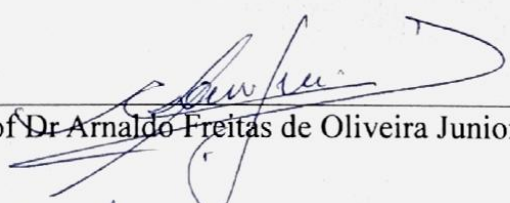
MARIANA GOMES CARDOSO DE ABREU

VIABILIDADE ECONÔMICA DO TRATAMENTO À DISPOSIÇÃO FINAL DE  
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

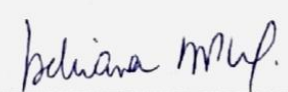
Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Centro Federal de Educação Tecnológica de  
Minas Gerais como requisito parcial para  
obtenção do título de Engenheiro Ambiental e  
Sanitarista.

Data de aprovação 25/06/19

Banca examinadora:

  
Prof Dr Arnaldo Freitas de Oliveira Junior – Orientador CEFET/MG

  
Dr Cícero Antônio Antunes Catapreta

  
Profa Dra Adriana Alves Pereira Wilken – CEFET/MG

## **RESUMO**

A produção e manejo de resíduos sólidos urbanos sempre fez parte da problemática de saneamento e saúde pública, tendo em vista que tudo que é gerado, consequentemente, precisará ser descartado em algum momento posterior. A facilidade de execução e baixo custo de aterros sanitários acaba por deixar pouco difundido outras formas alternativas de tratamento de resíduos antes de sua disposição final ambientalmente adequada. Os métodos de gaseificação, incineração e pirólise são os mais utilizados e conhecidos como possíveis tratamentos de resíduos sólidos urbanos. Porém a literatura acerca do tema ainda é escassa e a eficiência dos processos ainda é pouco estudada. As análises de Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR) são ferramentas capazes de analisar a viabilidade de projetos e, caso aplicadas aos tratamentos de resíduos mais usuais já citados, podem contribuir para um esclarecimento da viabilidade desses métodos e possibilidades de suas aplicações à situações reais.

Palavras-chave: incineração, pirólise, gaseificação, aterros sanitários, viabilidade econômica e ambiental, resíduos sólidos urbanos.

## **ABSTRACT**

The production of solid waste has always been part of the problem of sanitation and public health, since everything that is produced consequently needs to be discarded at some later time. The ease of implementation and the low cost of landfills ultimately leaves little alternative forms of waste treatment available before its environmentally appropriate final disposal. The gasification, incineration and pyrolysis methods are the most widely used and are known as possible treatments for urban solid waste, but the literature on the subject is still scarce and the efficiency of the processes is still little studied. The analysis of NPV and IRR are tools capable of analyzing the feasibility of projects and, if applied to the most usual waste treatments already mentioned, can contribute to a clarification of the viability of these methods and possibilities of their applications to real situations.

Keywords: incineration, pyrolysis, gasification, landfills, economic and environmental feasibility.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Corte da seção de um aterro sanitário.....                                                     | 17 |
| Figura 2 - Gaseificador de leito fluidizado circulante..                                                  | 19 |
| Figura 3 - Diagrama simplificado de incinerador de grelha fixa.....                                       | 21 |
| Figura 4 - Usina de Pirólise. ....                                                                        | 22 |
| Figura 5 - Potenciais Impactos Ambientais de Aterros Sanitários. ....                                     | 23 |
| Figura 6 - Destinações dadas aos RSU nos países asiáticos.....                                            | 25 |
| Figura 7 - Capacidade de uma planta de incineração <i>versus</i> custo de implantação. ....               | 31 |
| Figura 8 - Capacidade de uma planta de incineração <i>versus</i> custo de manutenção e operação.<br>..... | 31 |
| Figura 9 - Composição gravimétrica dos RSU no Brasil. ....                                                | 33 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Padrões de dados considerados para a avaliação econômica de tratamento térmico de RSU.....                       | 28 |
| Tabela 2 - Descrição do cálculo conforme desenvolvido no Microsoft Excel.....                                               | 29 |
| Tabela 3 - Dados sobre a gaseificação extraídos do trabalho de Infiesta (2015) .....                                        | 30 |
| Tabela 4 - Resultados Gaseificação.....                                                                                     | 30 |
| Tabela 5 - Relação do poder calorífico e a quantidade de energia mecânica (elétrica+calor) no processo de incineração. .... | 32 |
| Tabela 6 - Resultados Incineração.....                                                                                      | 32 |
| Tabela 7 - Resultados Aterro Sanitário.....                                                                                 | 34 |
| Tabela 8 - Resultados gerais considerando 100% do investimento pelas empresas. ....                                         | 35 |
| Tabela 9 - Resultados gerais considerando investimento de 25% por parte de terceiros. ....                                  | 35 |
| Tabela 10 - Resultados gerais considerando 60% de investimento por parte de terceiros.....                                  | 36 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

a. a. - Ao ano

ABETRE - Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

CEFET MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CNR - Câmara Normativa e Recursal

CO<sub>2</sub> - Gás Carbônico/Dióxido de Carbono

COPAM - Conselho Estadual de Política Ambiental

DIMOG - Divisão de Monitoramento e Geoprocessamento

DIREM - Diretoria de Infraestrutura e Monitoramento

DN - Deliberação Normativa

EUA - Estados Unidos da América

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente

FGV - Fundação Getúlio Vargas

GEE - Gás de Efeito Estufa

H<sub>2</sub>O - Água

IBAM - Instituto Brasileiro de Administração Municipal

kg - Quilograma

kWh - Quilowatt hora

m<sup>2</sup> - Metro quadrado

MWh - Megawatt hora

MJ - Mega Joule

NBR - Norma Brasileira

Nm<sup>3</sup> - Nanômetro ao cubo

NO<sub>x</sub> - Óxido de Nitrogênio

NT - Nota Técnica

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

RS - Resíduos Sólidos

RSS - Resíduos de Serviços de Saúde

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

SELIC - Sistema Especial de Liquidação e de Custódia

Sisnama - Sistema Nacional do Meio Ambiente

SNVS - Sistema Nacional de Vigilância Sanitária

SUASA - Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária

t - Tonelada

TIR - Taxa Interna de Retorno

TMA - Taxa Mínima de Atratividade

VPL - Valor Presente Líquido

## SUMÁRIO

|          |                                                                             |    |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.       | INTRODUÇÃO.....                                                             | 11 |
| 2.       | OBJETIVOS.....                                                              | 14 |
| 2.1.1.   | Objetivo Geral.....                                                         | 14 |
| 2.1.2.   | Objetivos Específicos .....                                                 | 14 |
| 3.       | DESENVOLVIMENTO.....                                                        | 15 |
| 3.1.     | Fundamentação Teórica.....                                                  | 15 |
| 3.1.1.   | Breve histórico: A relação dos resíduos sólidos urbanos e a sociedade ..... | 15 |
| 3.1.2.   | Técnica de disposição final de RSU .....                                    | 16 |
| 3.1.2.1. | <i>Aterro Sanitário</i> .....                                               | 16 |
| 3.1.3.   | Tratamentos Térmicos de RSU.....                                            | 18 |
| 3.1.3.1. | <i>Gaseificação</i> .....                                                   | 18 |
| 3.1.3.2. | <i>Incineração</i> .....                                                    | 19 |
| 3.1.3.3. | <i>Pirólise</i> .....                                                       | 21 |
| 3.1.4.   | A problemática do modelo atual .....                                        | 22 |
| 3.1.4.1. | <i>Legislação brasileira</i> .....                                          | 24 |
| 3.1.5.   | Cenário atual .....                                                         | 25 |
| 3.2.     | Metodologia.....                                                            | 27 |
| 4.       | RESULTADOS E DISCUSSÕES.....                                                | 30 |
| 4.1.     | Planta de gaseificação .....                                                | 30 |
| 4.2.     | Planta de incineração .....                                                 | 31 |
| 4.3.     | Planta de pirólise .....                                                    | 33 |
| 4.4.     | Aterro Sanitário .....                                                      | 34 |
| 4.5.     | Considerações finais .....                                                  | 35 |
| 5.       | CONCLUSÕES .....                                                            | 37 |
|          | REFERÊNCIAS .....                                                           | 39 |

## 1. INTRODUÇÃO

A produção de resíduos sólidos (RS) sempre fez parte da problemática de saneamento e saúde pública, tendo em vista que tudo que é produzido conseqüentemente precisará ser descartado em algum momento posterior. Conforme a urbanização alcançava as grandes sociedades, mais pessoas consumiam e mais produtos precisavam ser gerados para atender este consumo. As tecnologias de produção aumentavam a complexidade de criação demandando mais recursos, por conseguinte viu-se a necessidade de controlar a geração dos resíduos resultantes, tendo em consideração que as quantidades produzidas já ultrapassavam a capacidade de assimilação pelo meio ambiente (KELLER & CARDOSO, 2014).

O acúmulo de RS dispostos de forma inadequada caracteriza ambiente insalubre e possui potencial poluidor de alcance das águas (subterrâneas e superficiais), da atmosfera e do solo (RUSSO, 2005). Além disso, pode atrair vetores e hospedeiros de doenças que encontram em meio aos resíduos *habitat* adequado para sua proliferação e subsistência.

Cidades que apresentam gestão inadequada de RS, conseqüentemente, apresentam problemas ambientais correlacionados com problemas de saúde pública, uma vez que afetam os seres humanos e as sociedades em todas as suas dimensões, ficando assim evidentes suas conseqüências no espaço construído (SIQUEIRA & MORAES, 2009).

Parafraseando a Lei Federal 12.305 (BRASIL, 2010) que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, define-se resíduos sólidos como materiais ou substâncias, que podem estar em estado sólido, semissólido, líquido ou gasoso, que já desempenharam o papel ao qual foram destinados e/ou que são inviáveis de serem lançados *in natura* na rede pública de esgoto ou em corpos d'água.

Dentre o grupo definido de resíduos sólidos, vale destacar o subgrupo denominado Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) que, ainda de acordo com a PNRS, são compostos por resíduos domiciliares originários de atividades domésticas em residências urbanas e de resíduos de limpeza urbana originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas, dentre outros serviços. A coleta e disposição final desses resíduos ficam a cargo do titular dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, que são os próprios municípios.

A PNRS, instituída em 2010, trouxe um novo panorama para a forma de como os RSU, em geral, deveriam ser gerenciados dentro do país. Segundo a mesma, na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade de

ações: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Todavia, o cenário brasileiro necessita de ajustes e adequações antes de se tornar adequado ao Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Segundo a ABRELPE (2016), no ano de 2016, com relação à disposição final dos RSU coletados no Brasil, 58,4% dos resíduos foram destinados para aterros sanitários, 24,2% foram destinados para aterros controlados e 17,4% foram para lixões. Esses resultados mostram que 41,6% dos resíduos estão dispostos inadequadamente e servindo de fonte de poluição e risco aos seres vivos e ao ecossistema.

Portanto, o cenário brasileiro atual está muito aquém do ideal exigido pela PNRS e a quantidade gerada de RSU sofre aumento exponencial anualmente, conforme é possível verificar nas edições anteriores do panorama de resíduos sólidos do Brasil desenvolvido pela ABRELPE. Dessa forma, antes de se priorizar a erradicação dos aterros controlados e dos lixões, assim como a priorização de implantação de aterros sanitários e readequação dos espaços de disposição de resíduos, dever-se-ia seguir a ordem de prioridade ditada pela lei, partindo do princípio da não geração de novos resíduos e, em seguida, os resíduos que não pudessem ser evitados deveriam ser destinados a um pré tratamento. Priorizando o tratamento e não a disposição final, diminui-se riscos ambientais e impactos potenciais provenientes da geração descomedida de RSU.

Uma vez reduzido o volume de resíduos encaminhados aos aterros, devido a um tratamento destes ou ao simples fato da redução de sua geração, torna-se mais barato e simples a adequação do local de disposição final de acordo com o que as normas recomendam, pois a toxicidade e volume dos rejeitos pós um pré tratamento dos RSU é menor do que quando estes são aterrados *in natura*. Sendo assim, prolonga-se o tempo de vida útil dos aterros de rejeitos e também reduz-se a geração dos efluentes líquidos e gasosos produzidos.

Ainda que para um aterro sanitário ser viável o tempo mínimo exigido de vida útil seja de 10 anos (ABNT, 1992), na prática é possível observar que a maioria das situações extrapolam esse número em seu dobro ou mais. Como exemplo, em Belo Horizonte - MG, o primeiro aterro sanitário da cidade esteve em operação para aterragem de RSU durante 32 anos (SLU, 2017) e, além de todos os passivos ambientais que podem ser gerados por um aterro em operação, segundo Russo (2013), mesmo após a desativação de um aterro sanitário, ainda é possível que a geração de seus efluentes e possíveis impactos perdure por mais 60 anos.

Dessa forma, tendo em vista que locais utilizados como aterro precisam de monitoramento e manutenção constante mesmo após a desativação dos mesmos, que a implicação de se aterrar RSU gera riscos de impacto de alta magnitude, que há ressalvas em relação a construções sob áreas aterradas e em relação ao uso que se dará ao terreno posteriormente, tem-se uma série de gastos que perpetuarão por décadas e que podem ser reduzidos ou até mesmo evitados caso se desse um tratamento prévio aos resíduos antes de sua disposição final ambientalmente adequada.

A justificativa desse trabalho é a possibilidade de se enriquecer o campo científico para que se torne cada vez mais difundida a ideia de que a destinação de resíduos para uma triagem, um tratamento prévio ou para seu aproveitamento energético são possibilidades que podem reduzir os gastos a longo prazo com a gestão de resíduos sólidos urbanos, como também são situações que podem prolongar a vida útil de um aterro sanitário e por fim dar uma outra função à área aterrada após ser desativada.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1.1. Objetivo Geral**

O presente trabalho tem como objetivo ponderar a viabilidade econômica de 3 diferentes formas de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos em comparação com a viabilidade econômico da disposição final ambientalmente adequada.

### **2.1.2. Objetivos Específicos**

- Levantar os principais custos econômicos gerados por um aterro sanitário.
- Levantar os principais custos econômicos gerados pelas principais formas de tratamento térmico de RSU.
- Comparar a viabilidade econômica de cada técnica visando encontrar a de maior custo benefício para o manejo de RSU.

### 3. DESENVOLVIMENTO

#### 3.1. Fundamentação Teórica

##### 3.1.1. Breve histórico: A relação dos resíduos sólidos urbanos e a sociedade

Segundo Spillmann (2010), a sociedade humana primitiva, ainda nômade, possuía poucos indivíduos em sua composição e apresentava relação simbiótica com seu *habitat*. Sua produção, consumo e descarte se resumiam em matéria orgânica, o que quando descartada é facilmente degradada e reabsorvida pelo meio ambiente. Também, após a exaustão das terras em que essa pequena sociedade viveu brevemente, abandonava-se a região exaurida e buscava-se novos ambientes que pudessem atender às necessidades dessas pessoas, o que proporcionava tempo ao ecossistema dessa localidade de ser restaurado<sup>1</sup>, assimilando assim os danos ecológicos deixados pelo homem.

Quando o ser humano passou a fixar moradia e dar início às civilizações, de acordo com Keller e Cardoso (2014), houve-se a necessidade da criação de artefatos para proporcionar maior conforto, tais como: vasilhames de cerâmica, instrumentos para o plantio e roupas mais apropriadas. Dessa forma, os resíduos gerados, que antes eram predominantemente orgânicos, passaram a ser constituídos por outros produtos e, esse aumento de geração, aumentou também o acúmulo dos resíduos (e excrementos) em meio à urbe criada e, conseqüentemente, surgiu-se assim os primeiros problemas relacionados à questão sanitária: disseminação de doenças, proliferação de vetores, enchentes, contaminação de alimentos e contaminação dos corpos hídricos.

A fim de solucionar os problemas pela falta de saneamento, viu-se a necessidade de remoção dos resíduos indevidamente dispostos em ruas, lotes, becos e locais em meio à cidade e levá-los para longe da população. Esses resíduos então eram enterrados, dispostos em áreas da cidade que já eram consideradas insalubres para a população nobre, como bairros periféricos, ou eram incinerados sem critérios. Levando em conta que incineração gasta grande quantidade de combustível, portanto possui um custo considerável relacionado, logo as práticas mais comuns de disposição de resíduos eram enterrando-os ou dispondo-os em áreas abertas ao ar livre longe da cidade. Dessa forma, surgiram-se os primeiros lixões.

Com os problemas gerados pelos lixões que vão desde as questões sociais nas quais famílias fixavam residência dentro dessas áreas buscando sustento e materiais para revenda,

---

<sup>1</sup> Definição de restauração: Restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada o mais próximo possível da sua condição original. (Brasil, 2000)

até as questões ambientais como degradação do solo, contaminação do lençol freático, poluição de cursos d'água e lançamentos de efluentes atmosféricos, viu-se a necessidade de controlar esse acúmulo de resíduos e idealizou-se tanto as técnicas específicas que definem um aterro sanitário como também as demais técnicas de manejo de RSU.

### 3.1.2. Técnica de disposição final de RSU

Existem diversas técnicas propostas e disponíveis para manejo de resíduos sólidos urbanos. Todavia as práticas convencionais circulam em torno de tratamentos térmicos, reciclagem e aterragem direta. O método de aterro sanitário, mesmo em países que adotam outros tipos de prática como a incineração e a reciclagem, ainda costuma ser adotado como único meio de destinação<sup>2</sup> e disposição<sup>3</sup> final de resíduos em diversas cidades e estados de todos os continentes. Dessa forma, os demais métodos de manejo de resíduos precisam ser conhecidos e difundidos para que se tenha uma maior abrangência de seus usos e, conseqüentemente, maiores experiências e linhas de pesquisa para o aprimoramento das técnicas e metodologias.

#### 3.1.2.1. *Aterro Sanitário*

Aterro sanitário, de acordo com a NBR 8419 (ABNT, 1992), possui a seguinte definição: "Técnica de disposição de RSU no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores se for necessário".

De acordo com Brás, Ferreira & Silva (2017), esta técnica aplica princípios de engenharia para que o volume de resíduos seja compactado em seu máximo através do confinamento dos mesmos na menor área possível. Apesar de ser considerado um método seguro de tratamento de resíduos e de ser amplamente utilizado, deste resultam a geração de biogás<sup>4</sup> e de líquidos lixiviados.

---

<sup>2</sup> Destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que 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 (PNRS, 2010).

<sup>3</sup> Disposição final ambientalmente adequada: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (PNRS, 2010).

<sup>4</sup> Biogás: Mistura gasosa gerado através de digestão anaeróbia de compostos orgânicos, sendo constituído basicamente de metano, gás carbônico, gases inertes e compostos sulfurados (EPE, 2008).

Para o controle desses efluentes e demais passivos ambientais que possam ser gerados, este método de disposição final de resíduos deve contar com os seguintes procedimentos: sistema de impermeabilização de base e laterais, recobrimento diário e cobertura final, coleta e drenagem de líquidos percolados, coleta e tratamentos dos gases, drenagem superficial, tratamento de líquidos lixiviados e monitoramento.

Conforme referido por FEAM (2006), os aterros sanitários exigem cuidados especiais e procedimentos específicos, ilustrados na Figura 1, que devem ser levados em consideração desde a escolha da área para implantação do empreendimento até a sua operação e monitoramento. Pois há, além da probabilidade de impactos locais, também impactos sobre a área de influência e, no processo de licenciamento deste tipo de empreendimento, deve-se esclarecer, para cada possível impacto, os planos e medidas que serão adotadas para mitigação, controle e monitoramento.

Conforme citado anteriormente, através da técnica de aterro sanitário ocorre a digestão anaeróbia do material orgânico presente nos resíduos aterrados e gera-se o biogás. Recomenda-se a queima direta do composto gasoso quando não se encontram possibilidades de aproveitamento de seu potencial energético, uma vez que um de seus componentes principais, o metano, é gás de geração de efeito estufa (GEE) e precisa ser queimado para evitar sua emissão à atmosfera, já que seu impacto é 21 vezes maior que o do gás carbônico, o GEE comumente mencionado como percussor do aquecimento global.

Em situações em que o biogás apresenta poder calorífico entre 4500 e 6000 kcal/m<sup>3</sup> ou é tratado para separação e aproveitamento de metano em que o poder calorífico se assemelha ao do gás natural, este pode ser consumido diretamente que, de acordo com Freire (2013), possui média de eficiência de 35% na conversão da energia térmica para a energia elétrica.

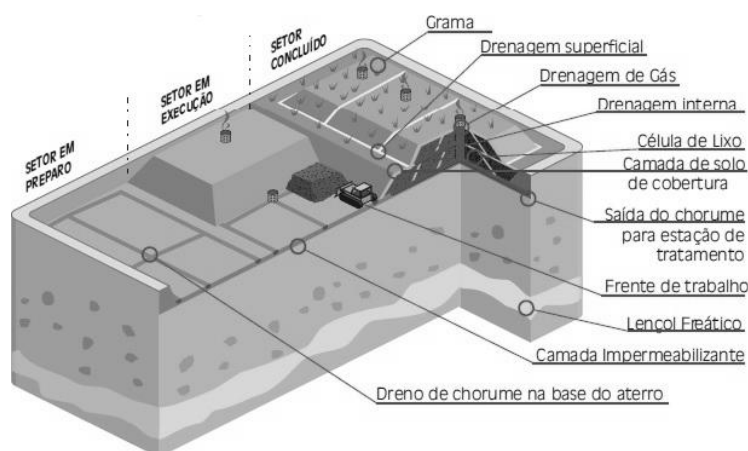


Figura 1 - Corte da seção de um aterro sanitário.

Fonte: CONDER, 2010.

### 3.1.3. Tratamentos Térmicos de RSU

Os tratamentos térmicos em resíduos sólidos urbanos, de acordo com FEAM (2012), são processos que utilizam calor como meio de reduzir o volume dos resíduos a serem tratados, além de restaurar, neutralizar ou dissociar determinados elementos existentes nos mesmos. Também são métodos utilizados para gerar energia. Esse tipo de tratamento aplica-se a qualquer resíduo que tenha carbono e hidrogênio em sua composição química. Atualmente, as principais tecnologias de tratamento térmico utilizadas são: gaseificação, incineração e pirólise.

#### 3.1.3.1. *Gaseificação*

A gaseificação é uma tecnologia que converte qualquer material de base carbônica em, praticamente, gás de síntese (syngas<sup>5</sup>). Esse processo é uma etapa adicional ao método de pirólise, com o objetivo de gerar combustível ou subprodutos comercializáveis em forma gasosa. Nele o carbono reage com vapor d'água, ar ou oxigênio, sob pressão em torno de 33bar e sob temperaturas próximas a 1230°C, para que seja produzido o syngas. Os subprodutos também resultantes, porém em quantidades inferiores, são removidos do gás de síntese para que ele possa ser utilizado como combustível para geração de energia ou outras utilidades dentro da indústria petroquímica ou até mesmo para a produção de hidrogênio (BREAULT, 2010).

O processo de gaseificação pode ser simplificado em três etapas (Figura 2): secagem, pirólise e a gaseificação, neste último ocorre a oxidação parcial dos resíduos e gases voláteis produzidos na etapa de pirólise (INFIESTA, 2015). Dentre os diversos tipos de gaseificadores destacam-se principalmente os modelos de leito fixo, que pode ser contracorrente (injeção do comburente no sentido oposto do combustível) ou concorrente (injeção de comburente e combustível no mesmo sentido de fluxo), leito fluidizado (circulação de sólidos que impede a existência de gradientes de temperatura) e leito de arrasto (pulverização do combustível no interior do reator).

Segundo Infiesta (2015), o modelo de leito fluidizado é o mais promissor quando se refere ao tratamento de RSU. Este, além de processar uma variedade maior de materiais que os demais modelos, cumpre o ciclo completo do processo de gaseificação, ou seja, o processo executa a totalidade das reações químicas que são previstas, sem sobra de resíduos potencialmente poluentes.

---

<sup>5</sup> Syngas: mistura de gases que contém quantidades variáveis de monóxido de carbono, hidrogênio e subprodutos em quantidades inferiores (BREAULT, 2010)

Ainda, dentre outras características ao se comparar a gaseificação em leito fluidizado e a gaseificação em leito fixo, a de leito fluidizado possui maior tolerância à umidade presente no combustível e não há a necessidade de preocupação com a expansão ou a granulometria do produto utilizado, podendo assim utilizar combustíveis líquidos ou pastosos no processo.

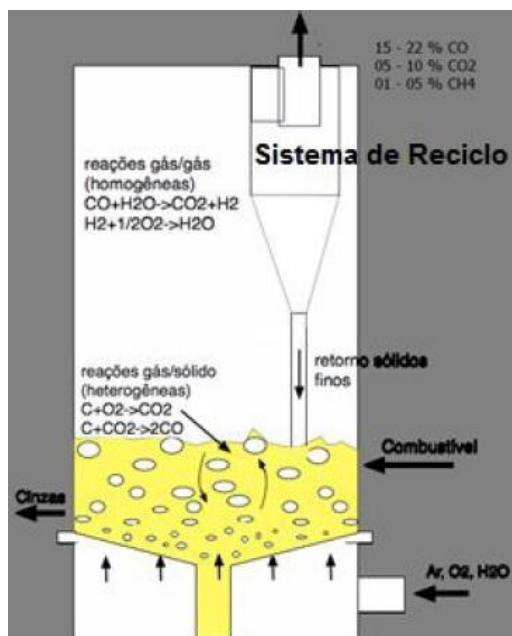


Figura 2 - Gaseificador de leito fluidizado circulante..

Fonte: INFIESTA, 2015 *apud* Carbogas, 2009

### 3.1.3.2. Incineração

De acordo com Lima (1991), a incineração é um processo de redução de peso (em até 70%) e volume do resíduo (em até 90%) através da combustão controlada. O conceito teórico da incineração consiste de uma reação química entre o combustível e o comburente, sendo o resíduo a parte combustível do processo. É necessário que haja uma relação combustível *versus* comburente de acordo com a composição gravimétrica do resíduo e, dessa forma, é possível calcular a quantidade de oxigênio necessária para que haja a combustão. Como compostos carbônicos são mais simples de serem queimados, o processo de incineração elimina a matéria orgânica existente e reduz as características de patogenicidade e periculosidade do combustível.

Segundo Morgado e Ferreira (2006), o processo de incineração pode ser subdividido em dois estágios. O primeiro ocorre na câmara primária, na qual o resíduo é depositado e queimado, em uma temperatura suficientemente alta (entre 500 °C e 900 °C) em um intervalo de tempo que depende do resíduo (para resíduos sólidos emprega-se 30 minutos). A

alimentação de oxigênio nesta câmara é subestequiométrica, isto é, abaixo do conceito teórico para que ocorra combustão completa. O controle deste gradiente é importante para que se evite a volatilização de grandes quantidades de metais presentes e minimize-se a formação de óxidos nitrosos (NO<sub>x</sub>).

O segundo estágio é iniciado após os efluentes gasosos gerados na câmara primária serem encaminhados para a câmara secundária. Estes são novamente queimados, a uma temperatura mais alta do que na câmara primária (entre 750 °C e 1.250 °C), por um intervalo de tempo suficiente para que haja oxidação completa de todos os gases que são reduzidos a CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O (geralmente 2 ou 3 segundos). A intenção desta segunda etapa do processo é a não geração de dioxinas e furanos. Os gases reduzidos são encaminhados para uma nova câmara para que possam ser tratados de acordo com sua composição, seja por adsorção, absorção, resfriamento, lavagem, dentre outros, para enfim serem emitidos na atmosfera através de uma chaminé.

Existem diversos tipos de fornos de incineração, de acordo com IBAM (2001), os mais utilizados são: grelha fixa, leito móvel e rotativo. O primeiro, exemplificado pela Figura 3, recebe os resíduos na grelha fixa que também é o local de queima para, em seguida, ter ar introduzido sobre a grelha de modo a minimizar o arraste das cinzas. As cinzas e a escória resultantes da queima caem através dos orifícios da grelha num cinzeiro, de onde são removidas mecanicamente ou por via úmida para posterior destinação final ambientalmente adequada.

Os processos de incineração são largamente utilizados no Japão, EUA e países europeus e, segundo Freire (2013), os combustíveis resultantes do tratamento térmico são empregados em duas principais funções, para sistemas de aquecimento de edificações com eficiência entre 60 e 85% e para geração de energia elétrica através da conversão da energia térmica, com eficiência entre 20 e 35%.

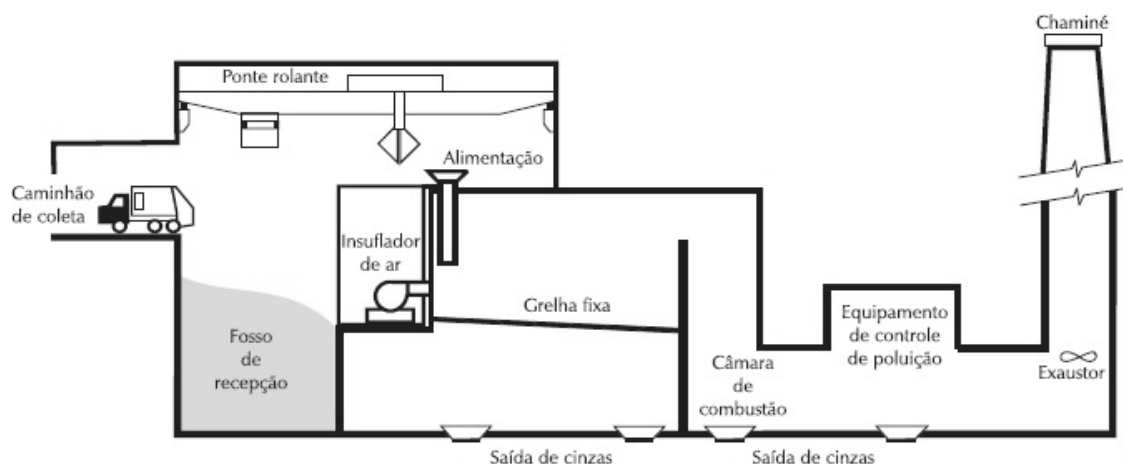


Figura 3 - Diagrama simplificado de incinerador de grelha fixa.

Fonte: IBAM, 2001

### 3.1.3.3. Pirólise

De acordo com Filho (2014), o processo de pirólise caracteriza-se pela degradação térmica de material orgânico em uma atmosfera com ausência ou deficiência de oxigênio. Esse percentual de natureza orgânica é convertido em energia térmica, o que abre possibilidades para que seja possível e economicamente viável, não só o tratamento térmico por meio da pirólise, como também a cogeração de energia no processo. Os subprodutos gerados, tais como gases ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ , no processo de gaseificação), combustíveis líquidos ( $HC$ , alcoois, bio-óleo), resíduos sólidos (escória, char) podem ser posteriormente reaproveitados no próprio sistema ou para outros fins, como por exemplo para a fabricação de carvão ativado, como aprimoramento de combustíveis e produtos químicos com valor de mercado.

O processo se dá através da ruptura de ligações carbono-carbono e na formação de ligações carbono-oxigênio. Constitui-se de reações de oxirredução na qual uma parte da biomassa é reduzida a carbono e a outra parte é oxidada e hidrolisada, resultando em fenóis, carboidratos, álcoois, aldeídos, cetonas e ácidos carboxílicos. (ROCHA et al., 2004).

O fracionamento das substâncias orgânicas ocorre gradualmente à medida que estas passam pelas diversas zonas de calor de um reator vertical ou horizontal (Figura 4): na zona de secagem, parte inicial no reator, perde a umidade e na zona pirolítica propriamente dita (pode variar de  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $1.600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ocorrem os processos de volatilização, oxidação e fusão.

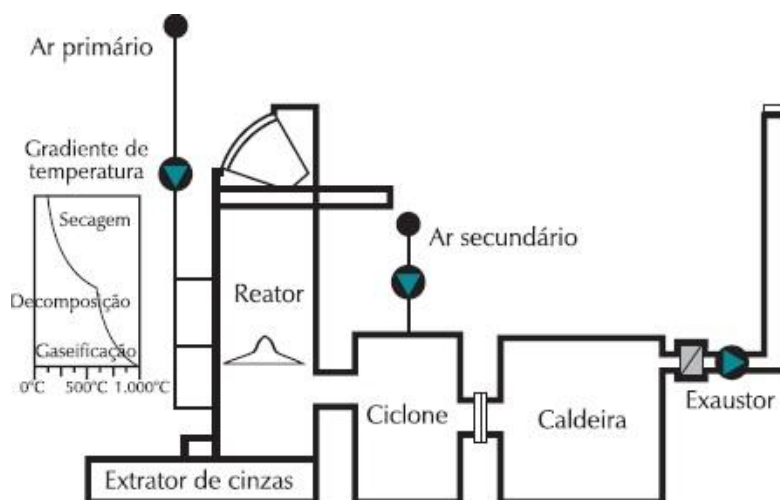


Figura 4 - Usina de Pirólise.

Fonte: IBAM, 2001

#### 3.1.4. A problemática do modelo atual

O uso do aterro sanitário, apesar de amplamente empregado em todo o mundo e possuir variadas tecnologias de manejo, possui uma série de riscos ao meio ambiente. São empreendimentos que demandam grandes áreas que, posteriormente, terão seu reaproveitamento limitado quando referente à readequação desses espaços para o cenário urbano. Devido à movimentação e compactação do maciço de resíduos, existência de bolsões de líquidos e biogás, dentre outros fatores, o futuro dessas áreas que continham resíduos aterrados costuma ser a de transformação desses espaços em parques ecológicos. Torna-se perigoso construções e edificações na área aterrada devido à movimentação da terra pela degradação dos RSU que ainda é perpetuada por vários anos mesmo após encerramento e também pelo risco de explosividade, devido à continuidade de geração de biogás e do aprisionamento dos mesmos no interior do maciço.

Russo (2005) adaptou um quadro esquemático de Vieira (1996) (Figura 5), que demonstra os potenciais riscos de um aterro sanitário ao meio ambiente e o possível alcance de cada um. Ainda segundo o autor, vale ressaltar que a incidência e existência dos impactos estão sujeitas às características do aterro construído, do local de implantação, de sua dimensão, dos tipos de resíduos depositados e tecnologias utilizadas.

É possível observar na figura 5 que as cores mais escuras demonstram uma maior magnitude do impacto citado na imagem em uma das três esferas ambientais, o ar, o solo e a água e o eixo das abscissas da figura demonstra a distância em km na qual é possível ser alcançada por cada impacto citado, o que seria a intensidade do mesmo.

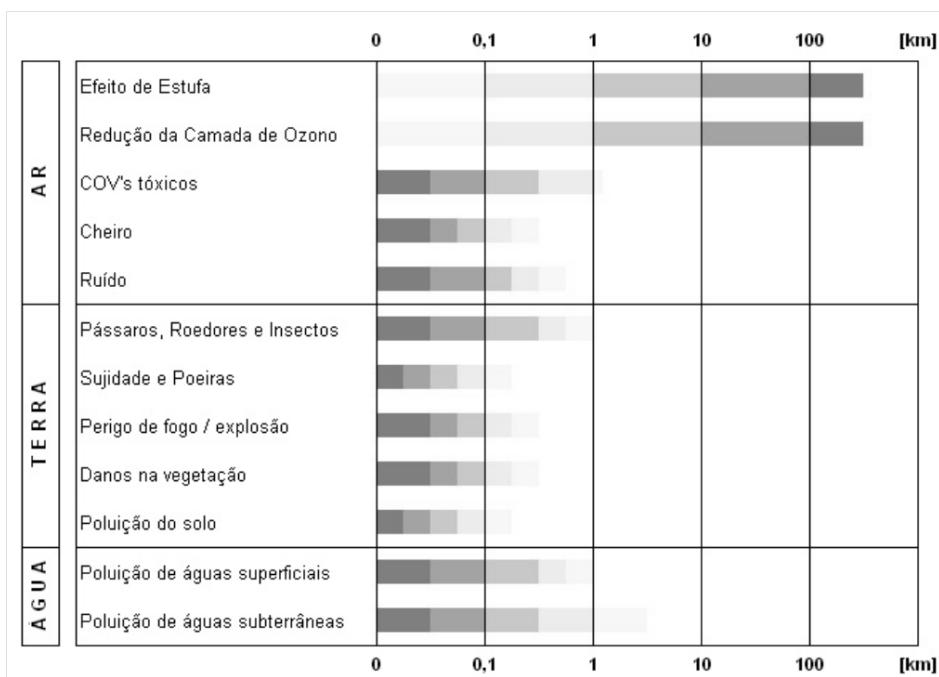


Figura 5 - Potenciais Impactos Ambientais de Aterros Sanitários.

Fonte: Russo, 2005. (Adaptado de Vieira, 1996).

Com base na Figura 5, pode-se aferir que, se o RSU que foi aterrado não passou por nenhum tipo de triagem ou tratamento, a potencialidade de seus impactos é a máxima possível, pois em sua composição pode existir qualquer tipo de material e o seu alcance poluidor chegará à atmosfera, às águas e ao solo. Sendo assim, se a legislação não determina os cuidados de manejo e construção de um aterro sanitário, é preciso levar em consideração que na falta de uma gestão adequada dos aterros, estes possíveis impactos ambientais decorrentes desta prática possuem grandes chances de ocorrer.

Todavia, o trabalho de Russo (2005) não explicita totalmente os possíveis impactos gerados pelos aterros sanitários. É importante dar destaque aos possíveis impactos setoriais, como por exemplo os impactos geotécnico-ambientais relacionados. De acordo com Nisiyama (2016), estes possíveis impactos são geralmente o assoreamento de canais naturais de drenagem, os recalques diferenciais devido ao colapso do solo comprometendo o aterro e as estruturas adjacentes, em caso de problemas na drenagem e controle dos lixiviados pode ocorrer a contaminação dos recursos hídricos subterrâneos e propagação da pluma de contaminação, como também a alteração nas recargas dos aquíferos subterrâneos devido à implantação do aterro e suas instalações de apoio. Há ainda o risco à saúde dos trabalhadores envolvidos, seja na operação de máquinas, seja no convívio com a incidência de materiais particulados ou em suspensão. Há riscos de explosividade ao longo de todo o aterro, como

também há os perigos envolvidos com a exposição aos diversos gases gerados no processo. Também há contato direto com materiais possivelmente contaminados.

#### *3.1.4.1. Legislação brasileira*

Para a construção de aterros sanitários no Brasil não há legislação específica que possa direcionar a construção, operação e encerramento deste tipo de empreendimento. Porém, é possível encontrar resoluções, normas técnicas e deliberações normativas, tanto para aterros de grande porte, quanto para médio e pequeno porte, além de sugestões de apresentação de projetos de aterro.

Para aterros de grande porte existem a NBR 8419 (ABNT,1992) (tendo pequenas correções em 1996) e a NBR 13.896 (ABNT, 1997) e, em esfera estadual, no caso de Minas Gerais, a NT 003/2005 (DIMOG-DIREM, 2005) e a DN 118/08 (COPAM, 2008) (tendo correções quanto ao rigor de parâmetros em 2011).

A NBR 8419 fixa as condições mínimas exigíveis para a apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos ao órgão responsável pelo seu licenciamento. A NBR 13.896 faz sugestões gerais em relação à forma de construir e gerir um aterro sanitário e, levando em consideração a temporalidade, recomenda que aterros sanitários só sejam construídos com vida útil mínima de 10 anos, o que não ocorre prática. É possível salientar que, caso fossem realmente construídos aterros sanitários com duração de 10 anos, os gastos para licenciamento de novas áreas e manutenção das anteriores seria demasiadamente alto e inviável pela questão da quantidade de terras que seriam demandadas e pouco tempo de produtividade para compensar o alto custo de investimento.

Além disso, a NBR 13.896 também recomenda que, após o encerramento das atividades do aterro sanitário, o único monitoramento ambiental que deva perdurar com duração específica é o de águas subterrâneas por um período de 20 anos. Ao verificar na literatura de mesmo assunto e experiência de profissionais da área, o monitoramento apenas das águas subterrâneas é insuficiente para todo o controle ambiental.

A NT 003 estabelece critérios para o monitoramento dos efluentes líquidos, águas superficiais e águas subterrâneas associados a aterros sanitários, permitindo a verificação dos possíveis impactos ambientais e a efetividade das ações de controle adotadas. Apesar de a NT ser mais específica que a NBR citada, ainda é verificável o quanto a legislação de manejo de RSU é falha no Brasil e abre brechas para um menor rigor na operação e controle de um empreendimento de alto grau poluidor.

A DN 118 estabelece diretrizes para adequação da disposição final de resíduos sólidos urbanos no Estado de Minas Gerais, e dá outras providências, como definições para área de preservação permanente, aterro controlado, aterro sanitário, depósito de lixo, lixão, núcleo populacional, sistema de drenagem pluvial, sistema de impermeabilização e usina de triagem e compostagem para que não haja dúvidas em relação a como e onde desenvolver a disposição final de RSU, visando a redução do número de disposições inadequadas. Posteriormente, essa DN foi revisada pela Diligência CNR 30-11-2011 com propostas de critérios mais restritivos, porém o seu conteúdo técnico não foi alterado.

### 3.1.5. Cenário atual

O constante acúmulo de resíduos sólidos produzido pelas atividades antropogênicas é um fator grave que ameaça a qualidade de vida de todos os seres vivos. Esse tipo de preocupação possui tendência mundial e, assim como determinado pela PNRS do Brasil, há uma busca principal pela redução da geração de resíduos no mundo, entendendo-se como tal a produção e venda de produtos que gerem pouco rejeito após seu uso, o reuso de embalagens produzidas e a reciclagem.

As técnicas alternativas de tratamento, processamento e disposição de resíduos ainda são pouco utilizadas ao redor do mundo. Mesmo assim é possível dar destaque à evolução da utilização de alguns processos, como é possível ver na Figura 6 abaixo:

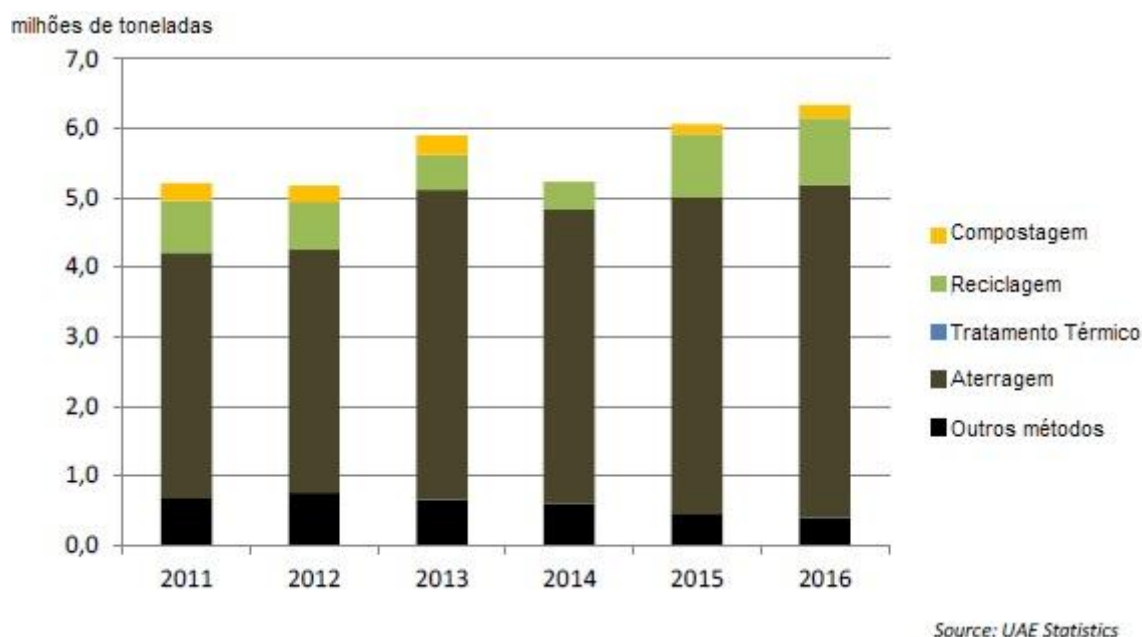


Figura 6 - Destinações dadas aos RSU nos países asiáticos.  
Fonte: Adaptado de ecoprog (2019)

Assim como nos países asiáticos vistos na imagem anterior, em boa parte do mundo as práticas de manejo de resíduos ficam em torno de compostagem, reciclagem, tratamentos térmicos e aterragem. Os tratamentos térmicos por sua vez se mostram promissores no quesito de destinação final de rejeitos, pois através deles é possível reduzir consideravelmente o volume dos RSU e reduzir a toxicidade dos mesmos e de seus efluentes gerados, como também há a possibilidade de consideração do uso de seus compostos resultantes como combustível para geração de energia.

Em relação ao Brasil, não há dados concretos sobre o uso de tratamentos térmicos em RSU, portanto os seus números são desconhecidos. Todavia, a prática deste tipo de tratamento é amplamente utilizada no país quando se trata os resíduos de serviços de saúde (RSS), com destaque para a técnica de incineração.

Apesar de a gestão e o gerenciamento de RSU ser responsabilidade direta dos municípios brasileiros, a interferência nos processos produtivos e de produtos em geral, por exemplo para adequação de embalagens biodegradáveis visando redução de resíduos, não entra em seus encargos, o que acaba tornando estes processos dependentes de investimentos privados e doações.

O ideal seria a promoção da reciclagem através de incentivos das prefeituras seja com a conscientização da população e/ou com a estruturação de programas de coleta seletiva. Pois a reciclagem, antes da aplicação de qualquer tratamento aos RSU, além de ser adequada às normas ditadas pela PNRS agrega valor econômico aos resíduos que seriam descartados como rejeitos. Contudo, a triagem do material reciclável não isenta a obrigação de destinação e/ou tratamento dos demais resíduos não aproveitados, que seriam os rejeitos.

A maior parcela de resíduos gerados, mais de 65%, ainda necessitaria de uma destinação final ambientalmente adequada e, dessa forma, vale considerar um possível aproveitamento energético do potencial destes resíduos através de tratamentos térmicos.

### 3.2. Metodologia

Para a construção desse trabalho foram consideradas 3 formas de tratamento térmico de RSU, a gaseificação, a incineração e a pirólise e, como base comparativa, analisou-se também um estudo sobre aterro sanitário. A escolha destas se deve ao fato de serem as mais citadas em literatura relacionada ao tema como alternativas ao manejo convencional de resíduos (a pirólise para resíduos de couro, por exemplo, como citado por Filho (2014), a incineração para resíduos hospitalares, assim como a prática atual do estado de Minas Gerais, etc). O manejo convencional se trata da destinação dos RSU diretamente ao aterro sanitário sem pré tratamento ou triagem.

Os métodos de tratamento térmico citados já possuem aplicações em alguns países, ultrapassando a realidade de planta piloto, alcançando dimensões maiores de análise de desempenho. Nos países europeus, os tratamentos de RSU são feitos por incineração, recuperação energética, seja por tratamento térmico ou aproveitamento de biogás de aterro, preenchimento de minas de sal desativadas com resíduos (*backfilling*) e reciclagem (EUROSTAT, 2014).

Para a avaliação de cada tratamento utilizou-se os dados de um autor para cada. Para a incineração considerou-se os dados citados por Freire (2013), que são dados embasados na metodologia proposta pelo Banco Mundial<sup>6</sup>.

Em relação à gaseificação, os dados foram considerados do trabalho de Infiesta (2015), estes dados são valores reais utilizados pelo autor extraídos de relatórios da empresa CARBOGAS LTDA, que instalou uma planta de gaseificação na cidade de Mauá-SP.

Para a análise da pirólise, os dados foram extraídos do trabalho de Caibre (2016).que embasou seus dados nos valores fornecidos pela empresa Maim Engineering, empresa italiana que fabrica plantas de pirólise.

Com relação ao trabalho sobre aterro sanitário, os dados considerados foram extraídos de um relatório desenvolvido pela ABETRE e FGV (2007), os dados fornecidos por essas empresas foram estimados segundo premissas de engenharia elaboradas por profissionais das associadas da ABETRE, e orçados com base em referências práticas do setor e custos unitários de publicações especializadas. Não foi considerado aproveitamento de biogás e nem receita com crédito de carbono.

---

<sup>6</sup> Instituição financeira internacional que efetua empréstimos a países em desenvolvimento. É o maior e mais conhecido banco de desenvolvimento no mundo, além de possuir o status de observador no Grupo de Desenvolvimento das Nações Unidas e em outros fóruns internacionais, como o G-20 financeiro.

Para a análise dos dados extraídos dos trabalhos de cada autor considerado, os padrões de parâmetros utilizados das análises de viabilidade econômica dos tratamentos térmicos de RSU foram os padrões que costumam ser encontrados por toda literatura acerca do tema e em recomendações para propostas de projetos, como também são valores que podem ser encontrados nas análises individuais de cada autor citado. Estes padrões podem ser vistos na Tabela 1 abaixo:

**Tabela 1 - Padrões de dados considerados para a avaliação econômica de tratamento térmico de RSU**

| Quantidade de resíduos processada | Horizonte de tempo | Taxa de juros | Número de dias no ano | TMA |
|-----------------------------------|--------------------|---------------|-----------------------|-----|
| 2.000 toneladas/dia               | 20 anos            | 10% a. a.     | 365                   | 10% |

Fonte: autoria própria.

Dessa forma, utilizando os dados de cada autor, desenvolve-se a análise do Valor Presente Líquido (VPL) e da Taxa Interna de Retorno (TIR). Ambas ferramentas são bastante usuais para o cálculo de atratividade de um investimento.

O cálculo do VPL baseia-se em fluxos e caixa futuros. Como o primeiro fluxo a ser considerado em cada análise deste trabalho será o investimento inicial ocorrido no início do primeiro período, este valor é acrescido ao resultado final do VPL. A fórmula básica para o cálculo se dá da seguinte forma:

$$VPL = \sum_{i=1}^n \frac{\text{valores}}{(1 + \text{taxa})^i}$$

O cálculo do TIR está relacionado ao cálculo do VPL, este é encontrado quando o VPL é igualado a zero. Corresponde a taxa interna de retorno de uma sequência de fluxos de caixa feitos em intervalos regulares, no caso deste trabalho foi anualmente.

Através do software Microsoft Excel, os cálculos foram desenvolvidos através das funções fornecida pela própria plataforma que se dão conforme a fórmula básica citada acima, são as funções VPL () e TIR (). Extraiu-se de cada autor os dados correspondentes ao investimento inicial de cada empreendimento e, em um horizonte de 20 anos, contando o investimento inicial como o ano 0, considerou-se, do ano 1 ao ano 20, os custos de manutenção e operação, como também, para os trabalhos de gaseificação, incineração e pirólise, considerou-se os valores de retorno com o aproveitamento energético de cada tratamento. A taxa de juros utilizada está citada na Tabela 1. A exemplificação da tabela utilizada para os cálculos junto ao software estão descritos na Tabela 2 à seguir:

**Tabela 2 - Descrição do cálculo conforme desenvolvido no Microsoft Excel**

| Ano                                                                                                                                                               | Empreendimento X                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 0                                                                                                                                                                 | Investimento inicial                                               |
| 1                                                                                                                                                                 | Custos de operação e manutenção<br>+<br>Lucro com venda de energia |
| .                                                                                                                                                                 | Custos de operação e manutenção<br>+<br>Lucro com venda de energia |
| .                                                                                                                                                                 |                                                                    |
| 20                                                                                                                                                                | Custos de operação e manutenção<br>+<br>Lucro com venda de energia |
| Desenvolvimento da função:<br>VPL = (Taxa de juros; Custos de operação e manutenção + lucro da venda de energia dos anos 1 ao 20)+(Investimento inicial do ano 0) |                                                                    |

Fonte: autoria própria.

Para o cálculo da TIR, considerou-se o mesmo horizonte de 20 anos, com ressalva de que os dados inseridos na função vão do ano 0 ao ano 20. o Desenvolvimento da função então fica como:

$$TIR = (\text{Investimento inicial do ano zero} : \text{Custos de operação e manutenção do ano 20})$$

Desta forma, quanto maior o VPL mais viável se torna o investimento naquele empreendimento e em relação à TIR, se ela ultrapassa o valor da Taxa Mínima de Atratividade (TMA) o investimento é considerado atrativo para se investir. A TMA é a taxa que representa o mínimo que um investimento deve remunerar para que seja considerado viável e varia de acordo com a aplicação. Conforme dito na tabela 1, o valor considerado neste trabalho é de 10%, que é o correspondente à taxa de juros aplicada ao ano no cálculo do VPL, pois estes 10% seria o custo de abrir mão deste investimento. No entanto, se o investimento vier de um credor, a taxa SELIC<sup>7</sup> pode ser usada como TMA.

<sup>7</sup> Taxa média ajustada dos financiamentos diários apurados no Sistema Especial de Liquidação e de Custódia para títulos federais.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. 'Planta de gaseificação

O primeiro estudo comparativo refere-se à viabilidade do processo de gaseificação. Infiesta (2015), utilizou um caso real situado na cidade de Mauá-SP, no qual foi implantado um tratamento térmico de RSU por meio da gaseificação com leito fluidizado circulante.

Com os dados reais da empresa Carbogas LTDA, tem-se a seguinte Tabela 3:

**Tabela 3 - Dados sobre a gaseificação extraídos do trabalho de Infiesta (2015)**

| Custo de Implantação | Custo de operação e manutenção | Produção energética              | Geração energética        | Preço de venda de energia |
|----------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| R\$ 354.240.000,00   | R\$ 20.500.000,00              | 844.913.793 Nm <sup>3</sup> /ano | 0,348 kWh/Nm <sup>3</sup> | R\$ 180,00/MWh            |

Multiplicando-se a produção energética pela geração, obtém-se o valor de 294.029.999,964 kWh/ano. Considerando o preço de venda de energia conforme sugere o Banco Mundial ([worldbankgroup.org](http://worldbankgroup.org)), que é o equivalente a 18 centavos por kWh, anualmente a empresa vende o valor de R\$ 52.925.399,99.

Conforme explicitado na metodologia deste presente trabalho e analisando os dados de custos do autor para o desenvolvimento das análises de VPL e TIR citadas anteriormente, tem-se como resultado os seguintes valores na Tabela 4:

**Tabela 4 - Resultados Gaseificação**

| VPL               | TIR    |
|-------------------|--------|
| R\$ 10.375.708,98 | 10,57% |

Vale frisar que quando a  $VPL > 0$ , o empreendimento é considerado como atrativo e a TIR, que mostra a taxa interna de retorno anual e, sendo ela acima do TMA, o investimento é considerado como viável para investimentos.

#### 4.2. Planta de incineração

O segundo estudo em análise leva em consideração uma planta de incineração. Freire (2013) estipulou os custos de unidade de incineração com embasamento em uma metodologia gráfica proposta por Rand, Haukohl e Marxen (2000), autores de grande importância de estudos sobre incineração desenvolvidos para o Banco Mundial, que está descrita a seguir nas Figura 7 e Figura 8 para a implantação do empreendimento e para a manutenção e operação:

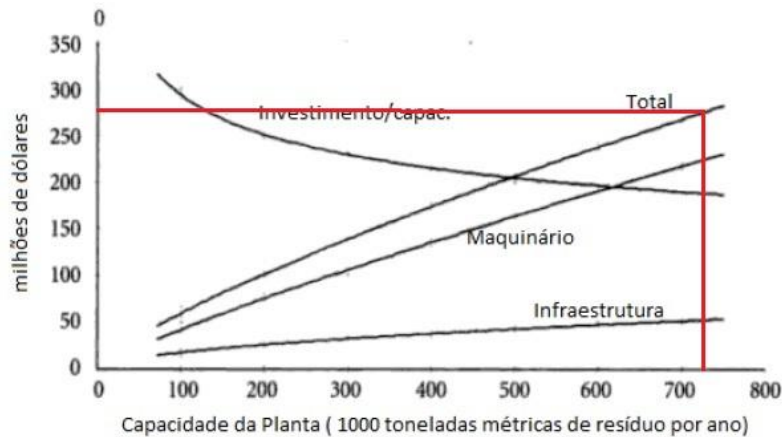


Figura 7 - Capacidade de uma planta de incineração *versus* custo de implantação.  
Fonte: Freire, 2013

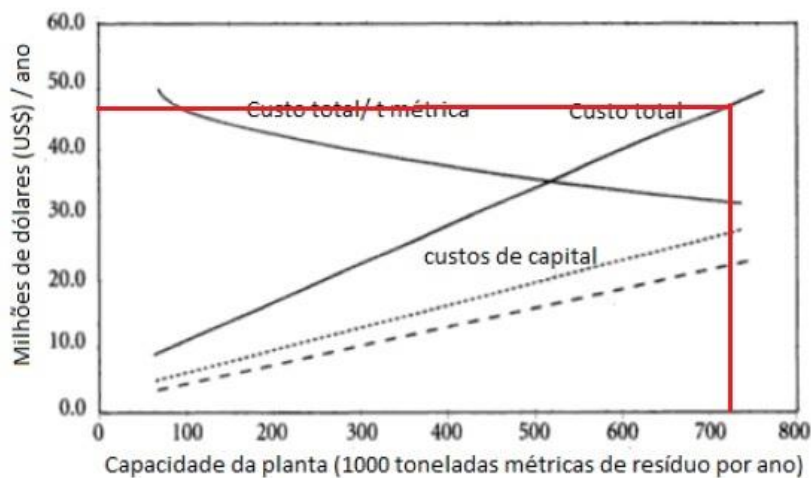


Figura 8 - Capacidade de uma planta de incineração *versus* custo de manutenção e operação.  
Fonte: Freire, 2013

Considerando os parâmetros de análise citados na tabela 1, com 2.000 toneladas diárias de RSU temos 730.000 toneladas em um ano, levando em consideração um ano de 365 dias.

Fazendo o cruzamento de valores no gráfico da figura 6 temos um custo de investimento em implantação de aproximadamente de 280 milhões de dólares para 730.000 toneladas a serem processadas, traçando uma reta do eixo das abscissas até a reta da função

"total". Fazendo o mesmo procedimento para o gráfico da figura 7, temos um custo de manutenção e operação de aproximadamente 48,1 milhões de dólares, traçando uma reta do eixo das abscissas até a reta da função "custo total".

Para o cálculo de venda de energia, Freire (2013) considerou o potencial calorífico dos RSU como o mínimo aceitável para a viabilidade do tratamento por incineração que geralmente é o padrão da literatura, o equivalente a 9MJ/kg. Freire (2013) utiliza da Tabela 5 abaixo como parâmetro para o cálculo de quantidade de energia gerada para que se possa calcular o preço de venda total.

**Tabela 5 - Relação do poder calorífico e a quantidade de energia mecânica (elétrica+calor) no processo de incineração.**

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

Fonte: Freire, 2013

Considerando que a venda seja apenas de energia, de acordo com a tabela acima, temos que a produção de energia seria de 0,88MWh/t de RSU e, assim como o autor avaliou, utilizando os dados do banco mundial, o preço de venda de energia é de US\$35/MWh, para 2.000 toneladas de resíduos, chegando ao valor de 61.600 dólares.

Analisando-se o VPL pela metodologia do presente trabalho, considerando os parâmetros fixados como padrão pela tabela 1, obteve-se o valor de - \$ 95.066.889,78 e de TIR obteve-se o valor de 2,5%. Transformando os valores para a moeda do real, considerando o dólar como R\$ 2,35 no ano de 2013, tem-se os dados a seguir na

**Tabela 6 - Resultados Incineração**

| VPL                  | TIR  |
|----------------------|------|
| - R\$ 223.407.190,98 | 2,5% |

Logo o empreendimento não é considerado viável através da forma de análise proposta por este trabalho, pois além do VPL ter sido negativo, a TIR não ultrapassa a TMA.

### 4.3. Planta de pirólise

O terceiro estudo a ser avaliado envolve o processo de pirólise. Como a literatura acerca do tema de tratamento térmico de RSU é bastante escassa em relação a estudos de viabilidade econômica, o único estudo encontrado sobre custos de pirólise foi o proposto por Caibre (2016). O estudo desta autora leva em consideração a implantação de uma unidade de pirólise com módulos descentralizados, na qual cada módulo possui a capacidade de tratar 47 toneladas de resíduos orgânicos por dia. Por conseguinte, nessa situação, o tratamento de RSU por pirólise precisaria ser considerado concomitantemente à triagem dos resíduos recicláveis existentes nos RSU, para que seja separada a fração orgânica que seria a parte utilizada no tratamento térmico. Ainda, cada módulo da planta de pirólise proposta ocupa uma área de 7.500 m<sup>2</sup>. Para a proposta deste presente trabalho, a quantidade de RSU a ser tratada deveria ser de 2.000 t de resíduos e, de acordo com Caibre (2016), este tratamento deveria ser aplicado na fração orgânica existente nessas 2.000 toneladas.

De acordo com ABRELPE (2013<sup>8</sup>), a composição gravimétrica dos RSU no Brasil se dá da seguinte forma, conforme Figura 9:

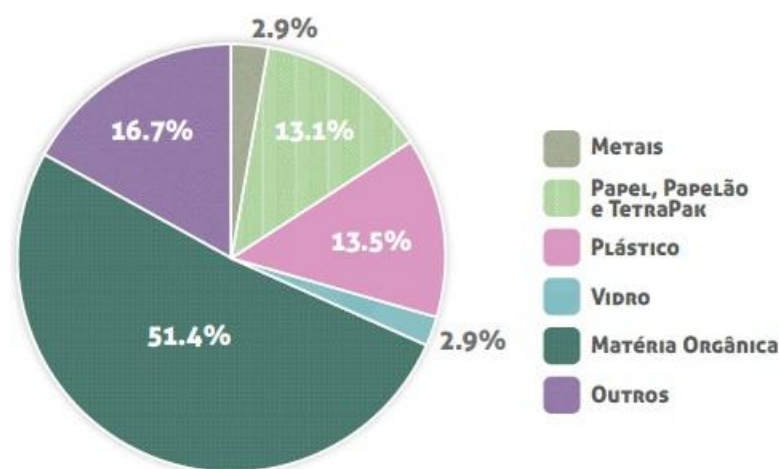


Figura 9 - Composição gravimétrica dos RSU no Brasil.  
Fonte: ABRELPE, 2013

Portanto, das 2.000 toneladas consideradas, nesse projeto seriam utilizadas 51,4%, o equivalente a 1.028 toneladas diárias de resíduos orgânicos. Seguindo os dados fornecidos por Caibre (2016) sobre os módulos de pirólise processarem 47 toneladas diárias de resíduos, para processar 1.028 toneladas, seriam necessários 22 módulos de pirólise, o que inviabiliza o processo, já que cada módulo ocuparia uma área de 7500 m<sup>2</sup> de terreno.

<sup>8</sup> Último ano em que o Panorama de Resíduos Sólidos da ABRELPE informou a composição gravimétrica de RSU.

Além disso, seria necessário a implantação de unidades de triagem dos RSU para a separação do material orgânico dos demais resíduos. Uma vez que a reciclagem é algo ainda incipiente no Brasil, este projeto mais uma vez se mostra inviável.

#### **4.4. Aterro Sanitário**

A Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos Sólidos (ABETRE) junto à Fundação Getúlio Vargas (FGV) desenvolveu um relatório de estudos sobre os aspectos econômicos e financeiros da implantação e operação de aterros sanitários de pequeno, médio e grande porte (ABETRE-FGV, 2007). Para as empresas, um aterro de grande porte recebe 2.000t de RSU por dia e possui horizonte de vida útil de 20 anos, dados também considerados como parâmetros (tabela 1) para a análise do presente trabalho.

Extraíndo os dados do estudo citado, os autores estimaram que o custo de implantação de um aterro sanitário é de R\$ 22.235.242,00 e os custos de operação e manutenção são de R\$ 22.786.422,11 por ano.

Porém, ABETRE-FGV (2007) não consideraram a recuperação energética de aterros como parte de seu estudo econômico. Dessa forma, não há retorno para o empreendimento de forma a tornar o projeto pouco interessante e, de certa forma, em desacordo com a PNRS, que diz que é preciso considerar todas as formas de recuperação energética das destinações finais dadas aos RSU.

Portanto, considerando que este aterro não produz energia a partir de seu biogás e apenas o queima, não tendo valor de retorno de aproveitamento energético, seus valores de VPL e TIR encontrados pela metodologia descrita neste trabalho, foram (Tabela 7):

**Tabela 7 - Resultados Aterro Sanitário**

| VPL                 | TIR |
|---------------------|-----|
| -R\$ 210.670.088,08 | < 0 |

#### 4.5. Considerações finais

É importante ressaltar que, inicialmente, foi considerado que todo o investimento inicial de todas as empresas foi aplicado unicamente por elas mesmas conforme mostra a Tabela 8 a seguir:

**Tabela 8 - Resultados gerais considerando 100% do investimento pelas empresas.**

| Investimento de 100% pela própria empresa |                    |                    |                     |       |
|-------------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------|
| Empreendimento                            | Ano de Implantação | Horizonte de tempo | VPL                 | TIR   |
| Planta de Gaseificação                    | 2015               | 20 anos            | -R\$ 78.184.291,02  | 6,6%  |
| Planta de Incineração                     | 2013               |                    | -R\$ 165.066.889,78 | -0,3% |
| Aterro Sanitário                          | 2007               |                    | -R\$ 216.228.898,58 | < 0   |

Todavia, nessa situação, é possível verificar que nenhum dos empreendimentos demonstrou viabilidade conforme as condições impostas pelo presente trabalho. A planta de gaseificação que, apesar de ter alcançado um valor de TIR positivo, este não ultrapassou a TMA considerada, inviabilizando o projeto junto ao VPL negativo.

Dessa forma, considerando que há a possibilidade de investimento externo e/ou aplicações de acionistas para os empreendimentos, em uma segunda situação foi considerado que, para que a TIR de um dos projetos pudesse ultrapassar o TMA seria necessário que se considerasse 75% de investimento por parte da própria empresa e 25% por parte terceiros. Esta porcentagem do valor foi considerada devido ao fato de ao se fazer testes, uma das empresas alcançou um  $TIR > 10\%$  com VPL positivo, que foi a planta de gaseificação conforme pode ser visto na Tabela 9 a seguir:

**Tabela 9 - Resultados gerais considerando investimento de 25% por parte de terceiros.**

| Investimento de 75% pela própria empresa e 25% por acionistas |                    |                    |                     |       |
|---------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------|
| Empreendimento                                                | Ano de Implantação | Horizonte de tempo | VPL                 | TIR   |
| Planta de Gaseificação                                        | 2015               | 20 anos            | R\$ 10.375.708,98   | 10,6% |
| Planta de Incineração                                         | 2013               |                    | -R\$ 223.407.190,98 | 2,5%  |
| Aterro Sanitário                                              | 2007               |                    | -R\$ 210.670.088,08 | < 0   |

O resultado da tabela 9 foi considerado como a configuração de melhor viabilidade, pois 25% de investimento ao empreendimento proveniente de terceiros é uma situação plausível.

Todavia, buscando um resultado para que a planta de incineração pudesse se tornar viável, foi-se fazendo iterações até alcançar a  $TIR > TMA$ , o que foi conseguido considerando investimento externo de 60%, como pode ser visto na Tabela 10 a seguir:

**Tabela 10 - Resultados gerais considerando 60% de investimento por parte de terceiros**

| Investimento de 40% pela própria empresa e 60% pelos acionistas |                    |                    |                     |       |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------|
| Empreendimento                                                  | Ano de Implantação | Horizonte de tempo | VPL                 | TIR   |
| Planta de Gaseificação                                          | 2015               | 20 anos            | R\$ 134.359.708,98  | 22,5% |
| Planta de Incineração                                           | 2013               |                    | R\$ 2.933.110,22    | 10,4% |
| Aterro Sanitário                                                | 2007               |                    | -R\$ 202.887.753,38 | < 0   |

De certa forma, analisando a tabela 10, a planta de gaseificação ainda se mostrou como empreendimento mais atraente para viabilidade e investimentos. Todavia, investimento externo de 60% é uma situação inviável e fora da realidade.

O aterro sanitário, em nenhuma das análises, alcançou  $VPL > 0$  e  $TIR > TMA$ , demonstrando que este empreendimento pode vir a ser atrativo caso tenha algum meio de obter retorno financeiro, o que pode ser o caso de uma análise considerando a produção e venda energética através da queima do biogás.

## 5. CONCLUSÕES

A situação do Brasil em relação à destinação de seus resíduos sólidos urbanos é insuficiente, pouco menos que 60% dos resíduos gerados são transportados para aterros sanitários. E, mesmo que os resíduos sejam transportados para aterros sanitários, poucos deles dispõem do aproveitamento de seu biogás para a geração de energia. O que demonstra a precariedade da gestão atual dos municípios e de prestadoras de serviços de limpeza urbana.

O tratamento térmico através da gaseificação se mostrou de maior viabilidade para investimentos como tecnologia alternativa a ser implantada para manejo de resíduos, conforme pode ser visto nos resultados da análise de viabilidade econômica desse trabalho. Porém, para uma garantia de sua viabilidade, considerando  $VPL > 0$  e  $TIR > TMA$ , mostra-se necessário que haja investimento externo de 20% do valor do custo inicial do projeto. Também, para este tipo de tecnologia, quanto maior a quantidade de RSU a ser tratado, menor será seu custo operacional e maior sua produção energética.

A incineração, apesar de ser uma das formas mais utilizadas de tratamento térmico para RSU, não se mostrou atrativa economicamente e, além disso, é a forma mais complexa para mitigação de seus impactos. Este fato se deve a este tratamento ser o que gera poluentes atmosféricos com maior toxicidade como furanos e dioxinas. Estes são produtos que não são gerados nas demais formas de tratamento térmico, como pirólise e gaseificação, que utilizam ambiente com ausência de oxigênio.

Como a aplicação de tratamentos de resíduo no Brasil é algo ainda pouco estudado, a literatura acerca do tema é bem escassa. O trabalho sobre pirólise, por exemplo, foi o único encontrado relacionado ao tema no qual há a análise de viabilidade econômica desse tipo de empreendimento e, mesmo assim, a análise utilizada não atende aos critérios adotados neste trabalho.

O aterro sanitário, apesar de ser o método mais difundido em todo o mundo não se mostrou viável pela análise deste trabalho. A sua ampla aplicação mundial pode ser devido ao fato de sua implantação ter baixo custo e sua operação e manutenção não ser tão criteriosa quanto se exige nos processos de tratamento térmico.

Por fim, é possível inferir com todo o levantamento feito por este trabalho que, apesar do aterro sanitário ser o método mais comum e supostamente de menor custo para destinação final de resíduos, mostra-se relevante a intensificação de pesquisas acerca de outras formas de destinação de resíduos, não só em relação aos tratamentos térmicos citados, como também outros processos, para que se torne ainda mais baixo o custo dos aterros como disposição final

de rejeitos e ainda ser possível ter retorno financeiro através do aproveitamento do potencial energético dos RSU.

O manejo de RSU está cada vez mais sendo pauta de preocupação ambiental de diversos países. Seja para com a redução da geração, as possibilidades de se ter ganho econômico explorando seu potencial energético, a redução de toda a potencialidade de riscos de impactos ambientais. O aumento exponencial da população e da geração de RSU são fatores de urgência que precisam ser levados em consideração quando se trata de um planejamento de gestão de resíduos que, cada vez mais, precisa levar em consideração a sustentabilidade do manejo.

## REFERÊNCIAS

ABETRE; FGV. Estudo **Sobre os Aspectos Econômicos e Financeiros da Implantação e Operação de Aterros Sanitários**. Relatório Final de Consultoria. São Paulo, SP, 2007

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419 - **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. 1992.

\_\_\_\_\_. NBR 13896 - **Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação**. 1997.

ABRELPE, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo, 2017. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2016.pdf>>. Acesso em: 02 mai 2018.

\_\_\_\_\_. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo, 2013.

BRÁS, I; FERREIRA, B. S; SILVA, M. E. Avaliação do Efeito da Recirculação de Lixiviados num Aterro Sanitário. **Millenium**. 2ª Edição, 2017, 10p.

BRASIL. Lei n.º 9.985 de 18 de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil** Brasília, DF, 19 jul. 2000.

\_\_\_\_\_. Lei n.º 12.305 de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil** Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)>. Acesso em: 07 abr 2018

BREAULT, R. W. Gasification Process Old and New: A Basic Review of the Major Technologies. **energies**, 3ª Edição, USA, 2010, p 216-240. Disponível em: <[www.mdpi.com/journal/energies](http://www.mdpi.com/journal/energies)> Acesso em: 11 jun 2018

CAIBRE, D. I. et al. Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso Aplicado a uma Cidade de Médio Porte. **Revista de Ciências Ambientais - RCA**, Canoas, RS, v. 10, n. 2, 2016.

CONDER, CAMPANHA DE DESENVOLVIMENTO URBANO DO ESTADO DA BAHIA. **Manual de Operação de Aterros Sanitários**, 2010.

COPAM, Deliberação Normativa 118. **Definições Técnicas Relativas aos Sistemas de Tratamento e/ou Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos**. FEAM, Minas Gerais, 27 jun 2008

DIMOG-DIREM. Nota Técnica 003. **Monitoramento de Efluentes de Aterros**. Minas Gerais, 16 dez 2005.

ECOPROG. Waste to Energy 2018/2019, **Technologies, plants, projects, players and backgrounds of the global thermal waste treatment business**. 2019

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

EUROSTAT, STATISTICS EXPLAINED. **Statistics of Waste Treatment in Europe**. 2014. Acesso em: 05 jul 2019. Disponível em: <[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Waste\\_treatment,\\_2014\\_YB17.png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Waste_treatment,_2014_YB17.png)>

FEAM, FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Orientações Básicas para Operação de Aterro Sanitário**. Belo Horizonte, 2006, 36p. Disponível em: <<http://www.feam.br/images/stories/arquivos/Cartilha%20Aterro2.pdf>> Acesso em: 01 mai 2018.

\_\_\_\_\_. **Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: Guia de Orientação para Governos Municipais de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2012, 163p.

FILHO, A. T. **Aplicação do processo de pirólise para valoração, cogeração de energia e tratamento de resíduos**. (Tese de Doutorado em Engenharia Sanitária) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/125M.PDF>>. Acesso em: 06 abr 2018.

FREIRE, M. L. **Estudo prévio de viabilidade econômica e energética para a implantação e usina de incineração para resíduos sólidos urbanos no Brasil**. (Trabalho de conclusão de curso para Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

IBAM, INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**, Rio de Janeiro, 2001, 204p.

INFIESTA, L. R. **Gaseificação de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Vale do Paranapanema - Projeto CIVAP**. (Monografia apresentada à especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

KELLER, M. M. CARDOSO, W. M. **Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos: Breve Histórico Global e Realidade Brasileira**. Santa Maria, RS, 2014

LAKATOS & MARCONI. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 2003.

LIMA, LUIZ M. Q. **Tratamento de Lixo**. editora Hemus. São Paulo, SP, 1991, 240p.

MORGADO, T. C. FERREIRA, O. M. **Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos, Aproveitamento na Cogeração de Energia. Estudo para a Região Metropolitana de Goiânia**. (Monografia de projeto final de Engenharia Ambiental) - Universidade Católica de Goiás, Goiânia, GO, 2006.

NISIYAMA, F. L. **Aspectos geotécnicos e ambientais relacionados à implantação do aterro sanitário oeste**. (Monografia de projeto final de Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, DF, 2016.

ROCHA, J; PEREZ, J; CORTEZ, L. **Aspectos teóricos e práticos da pirólise da biomassa.** Núcleo interdisciplinar de planejamento energético, Universidade Estadual de Campinas NIPE-UNICAMP, SP, 2004.

RUSSO, M. A. T. **Avaliação dos processos de transformação de resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário.** (Tese de doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de Minho, Braga, Portugal, 2005. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/7126>>. Acesso em: 06 abr 2018.

SIQUEIRA, M. M; MORAES, M. S. **Saúde coletiva, resíduos sólidos urbanos e os catadores de lixo.** *Ciência & Saúde Coletiva*, vol. 14, núm. 6. Rio de Janeiro, 2009.

SLU, SUPERINTENDÊNCIA DE LIMPEZA URBANA. **Relatório Anual de Atividades da Limpeza Urbana 2016.** Belo Horizonte, 2017.

SPILLMANN, C. V. **Implantação de Coleta Seletiva em Meios de Hospedagem em Municípios Turísticos: Caso de Armação dos Búzios (RJ).** (Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

VIEIRA, J. M. P. **Implicações da Aplicação em Portugal da Directiva Europeia sobre Aterros Sanitários.** 1º Simpósio Internacional sobre Resíduos Sólidos Urbanos de Viana do Castelo - 1996. IPVC, 1996.