

TOMÁS LOEWEN SILVESTRE DE SOUZA

**UNIDADE DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA COMO UMA ALTERNATIVA
PARA DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL**

SÃO PAULO

2019

TOMÁS LOEWEN SILVESTRE DE SOUZA

**UNIDADE DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA COMO UMA ALTERNATIVA
PARA DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do Diploma de Engenheiro
de Produção

Orientador: Professor Dr. Reinaldo Pacheco
da Costa

SÃO PAULO

2019

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.

FICHA CATALOGRÁFICA

Souza, Tomás

Unidade de recuperação energética como uma alternativa para destinação de resíduos sólidos urbanos no Brasil / T. Souza -- São Paulo, 2019.

75 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1.Resíduos Sólidos Urbanos 2.Recuperação Energética 3.Estudo econômico-financeiro 4.Incineração I.Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção II.t

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à Deus que com seu Amor nos sustenta na existência.

Em segundo lugar agradeço à minha família que me ensinou a amar.

Agradeço aos meus amigos que foram tão importantes nos momentos difíceis e tornaram a vida mais leve e alegre.

Agradeço especialmente aos amigos que estiveram mais próximos nessa jornada, Bruno B., Fernando L., Luca C., Luca F., Mário B., Octávio B., Pedro M. pelo companheirismo e suporte nesses anos.

Agradeço também ao Professor Dr. Reinaldo Pacheco da Costa que orientou este trabalho.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade econômico-financeira de uma usina de recuperação energética no Brasil. O gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos é um desafio enfrentado globalmente, muitos países desenvolvidos têm utilizado a tecnologia de incineração com aproveitamento energético como uma alternativa à disposição em aterros. Além de reduzir a utilização de aterros e lixões a recuperação energética aproveita o valor do lixo com a geração de energia. Assim, este estudo compreende uma revisão bibliográfica sobre conceitos de gestão de resíduos, apresentando um modelo de referência para as melhores práticas e descreve as principais tecnologias de recuperação energética. O cenário do gerenciamento de resíduos no Brasil é exposto, evidenciando o grande volume de resíduos que são dispostos de forma inadequada o que torna urgente criar alternativas para melhor tratar os resíduos gerados. Finalmente, utilizando as ferramentas da engenharia econômica, o estudo analisa a viabilidade econômico-financeira de uma planta teórica localizada na cidade de São Paulo. Os resultados preliminares obtidos mostram que o projeto é viável, tendo em vista que o valor presente líquido (VPL) do empreendimento teórico é positivo. Ademais a taxa interna de retorno (TIR) obtida (13,84%) sugere um alto nível de atratividade deste tipo de empreendimento.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos. Recuperação energética. Estudo econômico-financeiro. Incineração.

ABSTRACT

This paper aims to assess the financial and economic feasibility of a Waste-to-Energy (WtE) power plant in Brazil. Municipal waste management is a global challenge and many developed countries have been using incineration with energy recovery as an alternative to landfill. Besides the reduction of waste streams to landfills and open dumps, waste to energy seizes value from waste through energy generation. Therefore, this study does a literature review over waste management concepts, presenting a framework for assessing the best practices and describes main WtE technologies. The paper shows waste generation landscape in Brazil, highlighting the huge volumes of inappropriate waste disposal, which makes urgent to create alternatives to have a better waste treatment. Finally, using economic-engineering tools, the study analyzes the feasibility of a theoretical WtE power plant located in São Paulo city. The obtained results show that the project is feasible, since the net present value (NPV) of the theoretical venture is positive. In addition, the internal rate of return (IRR) obtained (13,84%) suggests a high level of attractiveness for this type of enterprise.

Key words: Municipal solid waste. Energy recovery. Waste to energy. Economic and financial feasibility. Incineration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração do fluxo dos materiais	22
Figura 2 – Hierarquia de tratamento dos resíduos	23
Figura 3 - Central de compostagem para resíduos das feiras livres (SP)	25
Figura 4 – Cadeia simplificada da gestão de resíduos.....	26
Figura 5 – Esquema de aterro sanitário	28
Figura 6 – Esquema de aterro controlado	28
Figura 7 – Esquema de lixão	29
Figura 8 – Unidade de recuperação energética Copenhill	30
Figura 9 – Lixão da Estrutural próximo à Brasília	34
Figura 10 – Linha do tempo encerramento dos lixões.....	35
Figura 11 – Gráfico de geração de RSU	37
Figura 12 – Geração per capita países selecionados (kg/ano/habitante)	37
Figura 13 – Índice de cobertura da coleta de RSU (%).....	39
Figura 14- Destinação dos resíduos no Brasil (% t/ano)	40
Figura 15 - Fluxo dos resíduos para tecnologias de recuperação energética.....	43
Figura 16– Complementariedade entre aterros sanitários e usinas de biogás	44
Figura 17 – Cadeia de aproveitamento do gás de aterro	45
Figura 18 - Esquema representativo de dupla câmara de combustão.....	46
Figura 19 – Fluxo do processo de recuperação energética através da gaseificação	48
Figura 20 – Ciclo positivo do resíduo	50
Figura 21 – Usina de lixo superadiabática.....	51
Figura 22 – Composição da taxa de juros do financiamento.....	57
Figura 23 – Receitas do projeto.....	58
Figura 24 – Lucro antes dos juros, impostos, depreciação e amortização do projeto	59
Figura 25 – Lucro líquido.....	59
Figura 26 – Fluxo de caixa livre do projeto.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 3 – Principais vantagens e desvantagens dos tipos de destinação	31
Tabela 1 – Composição dos resíduos coletados no Brasil - 2008	38
Tabela 2 - Destinação dos resíduos em países selecionados	40
Tabela 4 – Projeção de indicadores macroeconômicos	53
Tabela 5 – Cálculo da receita com recicláveis	56

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Cálculo do valor presente líquido (VPL)	52
Equação 2 – Cálculo da taxa interna de retorno (TIR)	53
Equação 3 – Receita com destinação	54
Equação 4 – Receita com energia	55
Equação 5 – Receita com recicláveis	56

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACL - Ambiente de contratação livre

ACR - Ambiente de contratação regulada

IPCA - Índice de preços ao consumidor amplo

LAIR - Lucro antes do imposto de renda

LAJIDA - Lucro antes dos juros, impostos, depreciação e amortização

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

RCE - Reduções certificadas de emissões

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

TCAC - Taxa composta anual de crescimento

TIR - Taxa interna de retorno

URE - Unidade de recuperação energética

VPL - Valor presente líquido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. Apresentação e objetivos	19
1.2. Metodologia e estrutura do trabalho	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1. CONCEITOS GERAIS SOBRE GESTÃO DE RESÍDUOS.....	21
2.1.1. Conceito de resíduo sólido	21
2.1.2. Gestão de resíduos sólidos.....	21
2.2. PRINCIPAIS FORMAS DE DESTINAÇÃO.....	24
2.2.1. Reciclagem	24
2.2.2. Compostagem	25
2.2.3. Aterro.....	26
2.2.4. Incineração.....	29
2.2.5. Quadro resumo: vantagens e desvantagens dos tipos de destinação	31
3. GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL.....	33
3.1. Ambiente regulatório.....	33
3.1.1. Responsabilidades	33
3.1.2. Política Nacional de Resíduos Sólidos	33
3.2. Geração	36
3.3. Coleta	38
3.4. Destinação.....	39
4. RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA.....	42
4.1. Principais aplicações.....	42
4.2. Tecnologias selecionadas de recuperação energética	42
4.2.1. Recuperação Energética do Biogás	43
4.2.2. Incineração com recuperação energética	45
4.2.3. Gaseificação.....	47
4.3. Utilização no Brasil.....	49
4.3.1. Usina Verde	49
4.3.2. URE Barueri	49
4.3.3. Usina de lixo – GTL Energia.....	50
5. ANÁLISE ECONÔMICO-FINANCEIRA	52
5.1. Metodologia	52
5.2. Premissas	53

5.2.1.	Premissas macroeconômicas	53
5.2.2.	Capacidade de destinação.....	53
5.2.3.	Capacidade de geração elétrica.....	54
5.3.	Fontes de receita.....	54
5.3.1.	Receita de destinação.....	54
5.3.2.	Receita com energia.....	55
5.3.3.	Receita com recicláveis	55
5.4.	Custos de operação e manutenção.....	56
5.5.	Depreciação	56
5.6.	Impostos.....	56
5.7.	Investimentos.....	56
5.8.	Estrutura de capital	57
5.9.	Taxa de desconto.....	58
5.10.	Principais resultados financeiros	58
6.	CONCLUSÃO	61
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
8.	APÊNDICE A – PREMISSAS MACROECONÔMICAS E OPERACIONAIS	
	67	
9.	APÊNDICE B – DEMONSTRAÇÃO DE RESUTADO.....	70
10.	APÊNDICE C – DEMONSTRAÇÃO DE FLUXO DE CAIXA	73

1. INTRODUÇÃO

Esta introdução apresenta o tema da gestão de resíduos sólidos, contextualizando sua relevância à realidade brasileira e os objetivos do trabalho bem como a metodologia utilizada e a estrutura de desenvolvimento do trabalho.

1.1. Apresentação e objetivos

A gestão adequada de resíduos sólidos urbanos (RSU) é um problema mundial; nos países emergentes como o Brasil a escassez de recursos financeiros somada às legislações ambientais pouco eficazes, fez com que muitas vezes fossem escolhidas alternativas de menor custo, principalmente aterros e até mesmo lixões à céu aberto; assim o problema não é devidamente tratado.

O presente trabalho pretende analisar o cenário brasileiro atual em relação a gestão de resíduos sólidos com foco na destinação, especialmente nos grandes centros urbanos, onde a questão do lixo é mais aguda. Em seguida será explorada a solução de tratamento térmico dos RSU, ou seja, a recuperação energética do poder calorífico do lixo através da incineração gerando energia como subproduto. Assim, o processo de aproveitamento energético dos resíduos (em inglês *Waste to Energy - WtE*) será avaliado como uma alternativa para a destinação dos resíduos sólidos urbanos por meio de uma planta fictícia na cidade de São Paulo.

Essa alternativa será analisada incorporando o conceito de Desenvolvimento Sustentável, analisando os aspectos econômico financeiros e abordando também as questões ambientais e sociais, no sentido de verificar a viabilidade da solução no Brasil.

1.2. Metodologia e estrutura do trabalho

O presente trabalho faz uma introdução ao gerenciamento de resíduos a partir de uma revisão bibliográfica, apresentando os principais conceitos no que diz respeito à gestão de resíduos.

Em seguida são apresentadas as principais formas de destinação: reciclagem, compostagem, destinação em aterros e a incineração.

Será feita a contextualização da questão de resíduos sólidos no Brasil, apresentando o ambiente regulatório e os aspectos legais que envolvem a gestão do lixo no país.

A partir do levantamento de dados secundários será caracterizada a situação atual da gestão de resíduos sólidos no país.

No item posterior o estudo da recuperação energética é aprofundado, com uma revisão bibliográfica das principais tecnologias classificadas como recuperação energética e comparando as soluções do ponto de vista econômico-financeiro e ambiental.

Finalmente, a incineração com aproveitamento energético é analisada a partir de um modelo econômico-financeiro de uma planta fictícia, aplicando técnicas de engenharia econômica e utilizando referências bibliográficas e informações de mercado para definir as premissas operacionais e financeiras de modo que se obtenha um resultado preliminar, para assim utilizar as técnicas de análise econômica e analisar a viabilidade da incineração como uma alternativa para a destinação de resíduos.

O último item do trabalho consiste na conclusão com reflexões sobre o trabalho em relação aos principais resultados e limitações, além de possíveis desenvolvimentos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Martins e Pinto (2001), a pesquisa bibliográfica procura explicar o problema e propor soluções a partir de referências teóricas publicadas em contribuições científicas existentes; portanto, a revisão bibliográfica enriquece e contribui para uma melhor análise do problema. Neste sentido a primeira parte se refere à conceitos gerais gestão de resíduos sólidos e a segunda às principais formas de destinação.

2.1. CONCEITOS GERAIS SOBRE GESTÃO DE RESÍDUOS

A apresentação dos principais conceitos que envolvem a gestão de resíduos, destacando os resíduos sólidos, que são focalizados neste estudo. Salienta-se a lógica hierárquica na administração da cadeia de resíduos.

2.1.1. Conceito de resíduo sólido

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) define os resíduos sólidos como:

“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”. (BRASIL, 2010, N.P.)

Os resíduos sólidos urbanos que serão o foco do presente estudo são os resíduos coletados e tratados pelas autoridades municipais. Incluem os resíduos domiciliares, de comércio e conjuntos corporativos. Além disso compreende os resíduos de limpeza pública: lixeiras de rua, varrição e podas das áreas verdes da cidade. A definição não inclui os resíduos destinados à rede de esgoto e resíduos das atividades de construção civil (OCDE, 2019). Outra denominação, mais usada na bibliografia internacional, é o termo *Municipal Solid Waste (MSW)* traduzido livremente como resíduos sólidos municipais.

2.1.2. Gestão de resíduos sólidos

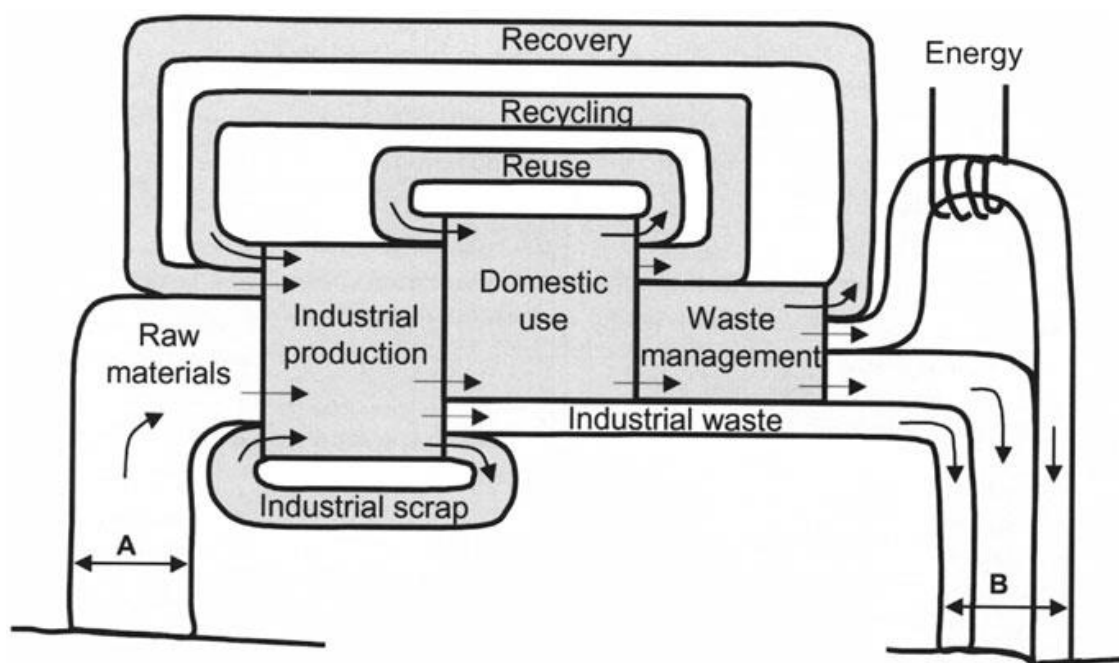
Com a introdução do que são resíduos sólidos passamos para o conceito de gestão dos resíduos sólidos. Recorrendo novamente a definição da PNRS temos a definição de gerenciamento de resíduos sólidos:

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 (BRASIL, 2010, N.P.)

A literatura incorpora a gestão de resíduos à um cenário mais amplo. Anthony et al. (2003) abordam a teoria de resíduo zero (*Zero Waste Theory*) como um objetivo a ser perseguido, embora a natureza das atividades humanas o tornem inalcançável. O autor ilustra a dinâmica do uso dos materiais pela sociedade, na figura 1, a seguir.

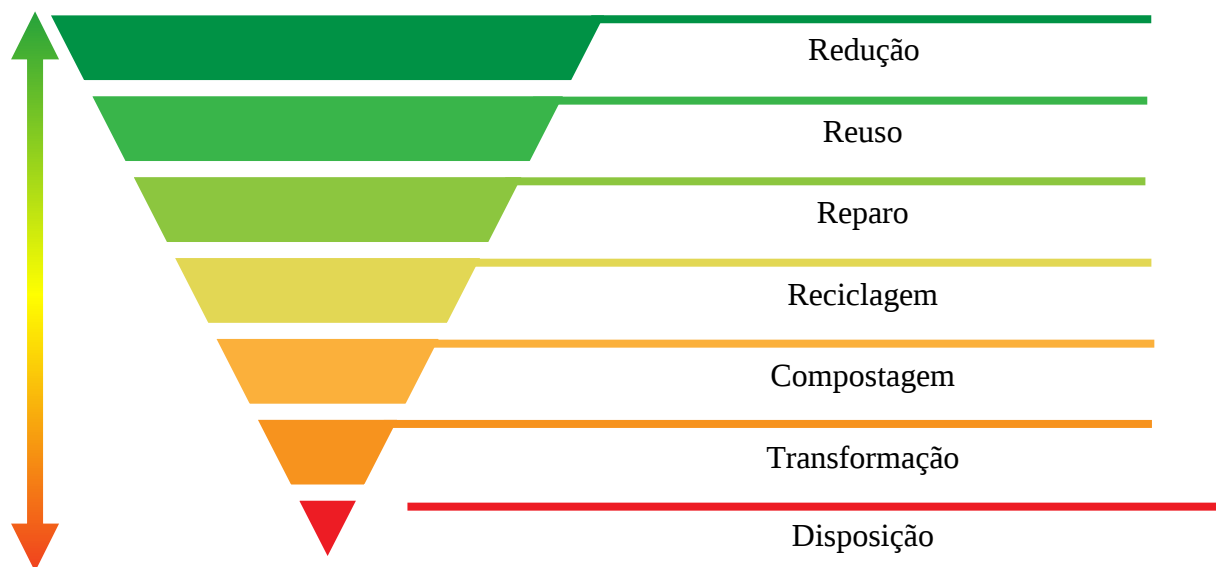
Figura 1 – Ilustração do fluxo dos materiais



Fonte: (ANTONHY et al., 2003, p. 54)

Estes autores exploram o conceito de responsabilidade compartilhada ao longo do ciclo de vida dos produtos, tanto pelos produtores quanto pelos consumidores; neste sentido, propõem uma hierarquia (figura 2) para as formas de tratamento dos resíduos do melhor tratamento para o pior: Redução, Reuso, Reparo, Reciclagem, Compostagem, Transformação e Disposição em aterro.

Figura 2 – Hierarquia de tratamento dos resíduos



Fonte: elaboração própria

A redução é a melhor forma de gerenciar os resíduos, eliminando na fonte a geração de resíduos e pode ser atingida através de três formas: (1) reduzindo a quantidade de material usada por produto sem sacrificar a utilidade do produto; (2) aumentando a vida útil do produto; (3) eliminando a necessidade do produto. O reuso e o reparo são características que podem ser introduzidas na fabricação, mas também dependem da conscientização dos consumidores. Essas práticas são consideradas as de menor impacto por minimizarem a utilização de recursos, como materiais, energia e mão de obra.

A reciclagem envolve reintroduzir os materiais no processo produtivo, reduzindo a necessidade de extrair mais material da natureza e reutilizando materiais em um estágio mais avançado da cadeia de transformação. A reciclagem tem uma forte ligação com a sociedade e as indústrias já que os materiais precisam voltar a linha de produção. Nos países emergentes a venda de sucatas tem um importante papel na renda das classes mais baixas na sociedade e até mesmo por esse motivo o índice de reciclagem nesses países é mais elevado que em países desenvolvidos (CAMPOS, 2014).

A compostagem é a forma mais antiga de tratar os resíduos e de reciclagem (Schleiss et al., 2003). Esse tipo de destinação trata exclusivamente resíduos orgânicos e a dificuldade é garantir tal condição nos centros de compostagem. Muitas vezes as substâncias orgânicas vêm misturadas com plástico, vidro e outras substâncias (Youcai et al., 2003). Segundo relatório do Banco Mundial (*What a Waste 2.0*; 2019) nos países em desenvolvimento os resíduos orgânicos

representam mais de 50% do total dos resíduos municipais (Kaza et al., 2018), portanto a compostagem é uma forma de tratamento de grande impacto que poderia reduzir o volume de resíduos destinados para os aterros sanitários de forma substancial.

Seguindo na hierarquia de tratamentos passamos para a transformação, que segundo Anthony et al. (2003) inclui incineração, destilação e gaseificação. Neste contexto se insere a recuperação energética que procura aproveitar a energia, ou o poder calorífico dos materiais para recuperar a energia armazenada nas substâncias. Os resíduos são considerados por Ludwig & Stuki (2003) como uma fonte de energia renovável já que são classificados como biomassa.

Finalmente a forma de tratamento menos desejada, embora seja a mais utilizada e mais acessível do ponto de vista econômico é a disposição que inclui a incineração sem aproveitamento energético e disposição em aterros sanitários. Esse tratamento não aproveita os materiais e nem a energia neles contida e é a modalidade de tratamento de maior impacto ambiental, com a menor pontuação nos estudos de ciclo de vida (*LCA - Life Cycle Assesement*) Ludwig & Stuki (2003).

2.2. PRINCIPAIS FORMAS DE DESTINAÇÃO

A segunda parte da revisão bibliográfica consiste na apresentação das principais formas de destinação para contextualizar os conceitos apresentados na seção anterior e explorar cada tipo de disposição dos resíduos em relação às suas vantagens e limitações.

2.2.1. Reciclagem

A reciclagem é o reprocessamento de materiais recuperados ao fim do ciclo de vida de um produto, retornando esse material à cadeia produtiva. Além de ser uma das melhores práticas da gestão de resíduos, a reciclagem tem um papel essencial do ponto de vista da eficiência dos recursos (WORRELL & REUTER, 2014). Existe um desafio em relação à separação dos materiais, seja ela mecânica ou manual, além da necessidade de pré-processamento para utilização dos materiais recicláveis.

Essas atividades são feitas em parcerias entre as prefeituras locais e associações de catadores e cooperativas, tendo um auxílio econômico do governo e as receitas geradas com a venda dos materiais recicláveis.

A reciclagem no Brasil está diretamente ligada ao trabalho das cooperativas e dos catadores, gerando benefícios econômicos e sociais para milhares de pessoas. O importante papel das cooperativas e dos catadores foi reconhecido oficialmente na Política Nacional dos

Resíduos Sólidos através dos instrumentos contidos no capítulo III artigo 8º inciso IV da Lei Federal 12.305 (BRASIL, 2010).

Esses agentes têm conseguido se organizar em grupos para representar suas demandas têm atingido grande visibilidade, mas a situação do trabalho ainda está muito ligada a vida nas ruas, violência, uso de drogas e o transporte dos materiais usando “tração humana” (CAMPOS, 2014). Assim, é necessário implementar instrumentos mais eficazes para que esses trabalhadores tenham uma condição de vida mais coerente com o importante papel por eles desempenhado na sociedade.

2.2.2. Compostagem

A compostagem é um método de tratamento para parcela orgânica dos resíduos onde, através de um processo de decomposição aeróbico controlado, os resíduos tem seu volume reduzido e tem como resultado a produção de fertilizante orgânico, podendo ser utilizado então na fertilização de praças públicas e até mesmo doando ou vendendo.

A figura 3 mostra uma das centrais de compostagem instaladas pela prefeitura da cidade de São Paulo. A prefeitura inaugurou a primeira central em 2015, como um projeto piloto, no contexto do programa Feiras e Jardins Sustentáveis para direcionar os resíduos orgânicos de feiras livres para centrais de compostagem.

Figura 3 - Central de compostagem para resíduos das feiras livres (SP)



Fonte: (SÃO PAULO, 2019)

Hoje a cidade conta com 5 centrais de compostagem com essa finalidade; o composto orgânico é utilizado como insumo em jardins e praças públicas, gerando ganhos econômicos para a cidade tanto com a fertilização gratuita como com a redução do volume de resíduos sendo

destinados para os aterros. O adubo também é distribuído gratuitamente aos feirantes, munícipes, visitantes dos pátios de compostagem, escolas.

Segundo a prefeitura as centrais de compostagem têm evitado a disposição em aterros sanitários de aproximadamente 2,8 mil toneladas de resíduos orgânicos todos os anos, uma quantia insignificante em relação ao total gerado, mas que têm potencial de crescer dado o perfil dos resíduos gerados no Brasil com percentual de mais de 50% de resíduos orgânicos.

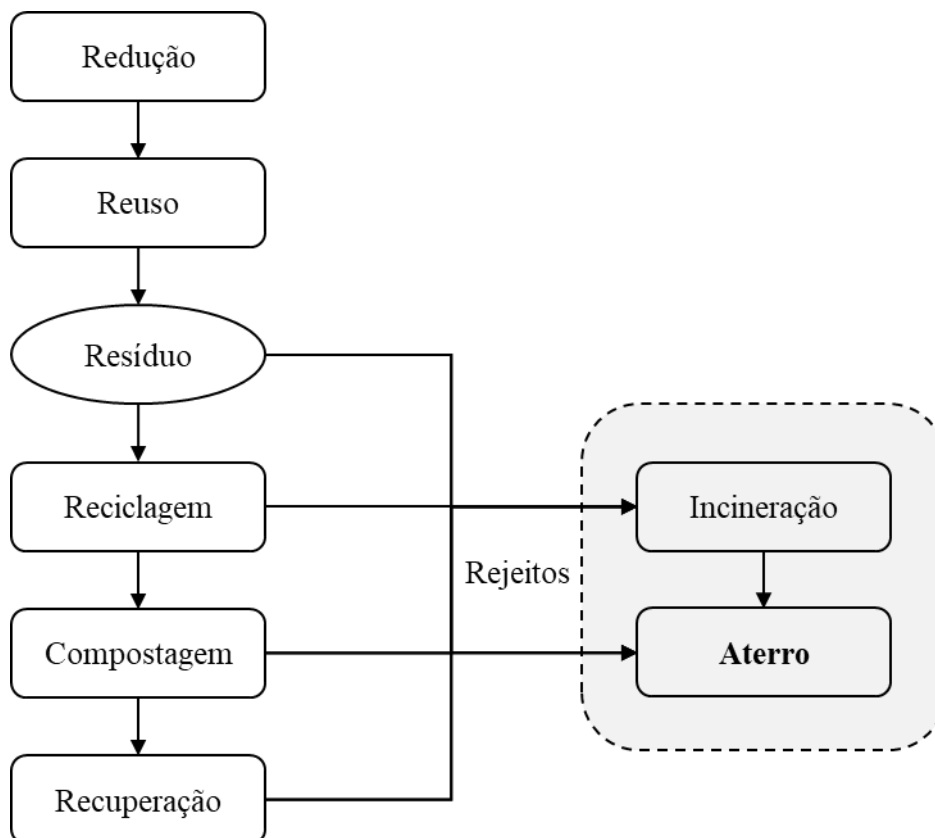
A compostagem implica em alguns problemas quando comparado com outras formas de destinação. Em primeiro lugar a compostagem ocupa mais espaço que outras tecnologias, além de ter um custo elevado de manejo dos resíduos. Existe um risco de contaminação dos resíduos orgânicos, o que poderia trazer problemas de saúde para a população na utilização dos compostos orgânicos oriundos da compostagem.

2.2.3. Aterro

A destinação em aterro inclui os aterros sanitários, controlados e os vazadouros à céu aberto, ou lixões. O princípio da disposição em aterros é isolar e centralizar os resíduos gerados em uma determinada região para impedir que a população tenha contato com o lixo, o que poderia gerar problemas de saúde. Na hierarquia de tratamento de resíduos apresentada na seção 2.2 este é o tratamento menos desejado, pois não há qualquer tipo de redução no volume ou recuperação de materiais ou energia dos resíduos.

É importante salientar que o aterro sempre será necessário e o último estágio de tratamento para outras tecnologias, mesmo na atividade de incineração há rejeitos no final do processo que precisam ser destinados para os aterros. O mesmo acontece na reciclagem e até mesmo na compostagem, como ilustra a figura 4.

Figura 4 – Cadeia simplificada da gestão de resíduos

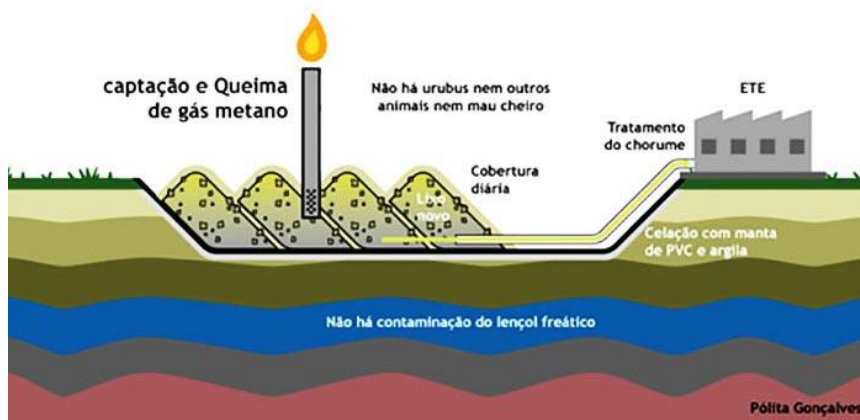


Fonte: adaptado de (WORRELL & REUTER, 2014)

Como mencionado existem basicamente três classificações de aterro, com relação ao grau de isolamento dos resíduos: Aterro sanitário, Aterro controlado e vazadouro à céu aberto ou simplesmente lixão.

No aterro sanitário, ilustrado na figura 5, o resíduo é compactado e coberto com terra em células diárias, há proteção do solo com a colocação de mantas de impermeabilização, que previnem a poluição do solo e das águas subterrâneas. Além disso são instalados sistemas de captação dos líquidos percolados provenientes da decomposição, bem como dos gases (principalmente o metano) para posterior tratamento.

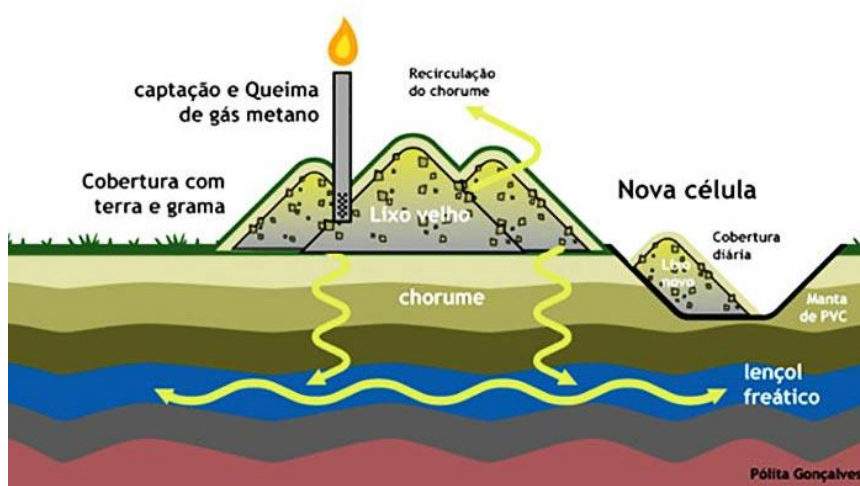
Figura 5 – Esquema de aterro sanitário



Fonte: (GONÇALVES, 2003)

No aterro controlado os resíduos são cobertos com terra diariamente, mas não há isolamento em relação ao solo e tampouco os sistemas de captação de líquidos, em geral os aterros controlados tem sistema de captação dos gases provenientes da decomposição, como mostra o esquema na figura 6.

Figura 6 – Esquema de aterro controlado

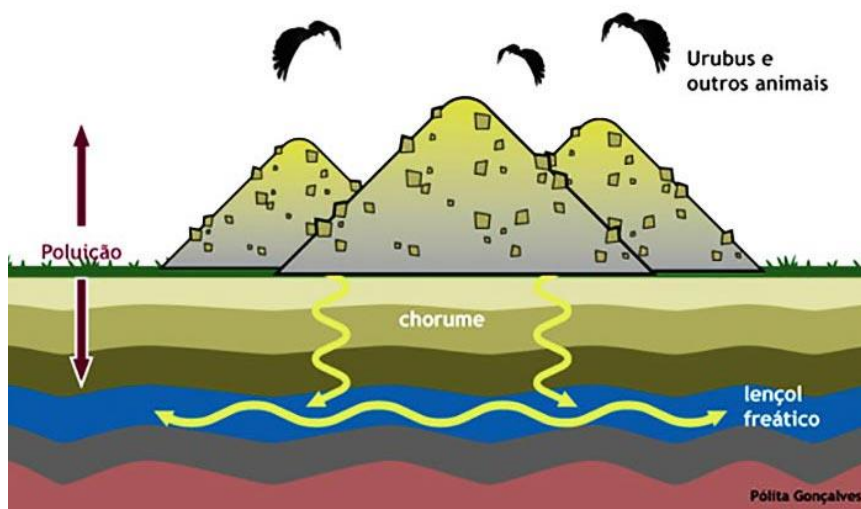


Fonte: (GONÇALVES, 2003)

O lixão ou vazadouro (figura 7) é basicamente um local onde o lixo é despejado, sem nenhum tipo de cobertura ou acondicionamento. Tal situação é extremamente nociva para a população vizinha desses locais devido à proliferação de vetores de transmissão de doenças e

os maus odores exalados. Esse tipo de destinação também incorre em um problema social, pois atrai catadores que podem se contaminar com as substâncias tóxicas desses resíduos.

Figura 7 – Esquema de lixão



Fonte: (GONÇALVES, 2003)

Essas classificações não são estritas, o importante é salientar a existência de níveis de isolamento, de forma que a destinação em aterros pode ser ambientalmente aceitável, ou totalmente inadequada a depender das instalações de cada tipo de aterro.

Independente da natureza do aterro, é uma disposição que exige grande extensão de terra, o custo de implementação é evidentemente maior para o aterro sanitário e diminui para os aterros controlados e lixões. Um fator importante é o cuidado pós encerramento necessário para que a área não gere problemas ambientais. Por último, os aterros localizam-se em regiões afastadas dos locais de origem dos resíduos, isso faz com que o custo de transporte seja elevado.

2.2.4. Incineração

A incineração é uma forma de destinação que proporciona uma redução substancial dos resíduos sólidos municipais. A incineração pode ser feita com ou sem recuperação energética. Além disso as cinzas restantes podem ser utilizadas como matéria prima de materiais de construção.

As instalações de incineração podem ser localizadas próximas as cidades sem gerar impactos, isso porque as instalações contam com sistemas de purificação dos gases expelidos ao fim do processo. Esse fato faz com que os custos de transporte para essa forma de destinação sejam menores quando comparados a outras tecnologias.

A aceitação do público é um fator importante, mesmo que as unidades de recuperação energética não representem perigo à saúde da população vizinha, esse tipo de instalação tende a gerar uma aversão do público. Nos países europeus, por ser uma tecnologia mais conhecida, o grau de aceitação é mais alto, mesmo assim existem iniciativas para aproximar a população da tecnologia, como na Dinamarca onde a planta de incineração com recuperação energética Copenhill (figura 8) foi construída integrada a uma pista de gelo artificial. A planta tem capacidade para tratar 400 mil toneladas de resíduos anualmente e fornece eletricidade para 62.500 residências.

Figura 8 – Unidade de recuperação energética Copenhill



Fonte: (Copenhill, 2017)

A incineração é uma das tecnologias com maior custo de implementação, e depende de economias de escala para ser economicamente viável. Além disso, as instalações mais modernas necessitam de operadores com alto grau de especialização, o que tende a encarecer os custos de operação e manutenção. Como já mencionado é necessário ter sistemas de purificação dos gases de saída dos processos de combustão, além disso os rejeitos que não forem comercializados precisam ser dispostos em aterros.

Um risco a ser monitorado é a possibilidade de usinas de incineração captarem materiais que poderiam ser reciclados, rompendo a hierarquia apresentada anteriormente. Para mitigar esse risco é importante que as políticas públicas criem instrumentos adequados para que haja incentivos alinhados a hierarquia de tratamento dos resíduos sólidos.

2.2.5. Quadro resumo: vantagens e desvantagens dos tipos de destinação

A tabela 3, a seguir, sintetiza as principais vantagens e desvantagens das tecnologias de destinação descritas nos itens anteriores.

Tabela 1 – Principais vantagens e desvantagens dos tipos de destinação

Destinação	Vantagens	Desvantagens
Reciclagem	- Reaproveita materiais já processados reduzindo a necessidade de processos e extração de recursos naturais	- Depende da separação dos materiais para aumentar o grau de reciclabilidade e o valor econômico dos materiais recicláveis
Compostagem	- Converte resíduos orgânicos em fertilizantes naturais - Reduz a quantidade de resíduos a serem depositados em aterro	- Ocupa mais espaço do que algumas tecnologias de gestão de resíduos - Custos de implementação e manutenção podem ser altos - Composto orgânico pode conter contaminantes, como metais pesados que prejudiquem a saúde humana se usados como fertilizantes
Aterro	- Solução universal que permite eliminação dos resíduos finais - Custo relativamente baixo e de fácil implementação - Complementa com outras tecnologias o destino dos resíduos - Gás de aterro pode ser um subproduto para uso doméstico ou industrial	- Exige grandes extensões de terra para sua implementação - Não há redução dos RSU, e os resíduos não são convertidos em recursos reutilizáveis - Se mal operado pode trazer problemas ambientais, como poluição das águas subterrâneas, ar e solo - Necessita de cuidados pós-encerramento - A não aceitação pública e a limitação do espaço fazem com que os aterros sejam implementados longe da origem dos resíduos incorrendo em maiores custos e poluição no transporte
Incineração	- Tecnologia que mais reduz o volume de RSU (~90%) - Cinzas podem ser usadas em materiais de construção - Fonte de energia para geração de vapor e/ou eletricidade - Instalações de incineração podem ser localizadas próximas das regiões onde o lixo é gerado reduzindo o custo de transporte	- Alto custo de implementação em comparação com as outras tecnologias - Alto grau de especialização para operação dos equipamentos - Equipamentos de controle de poluição são necessários para tratar os gases de combustão e as cinzas precisam ser dispostas em aterros - Pode desencorajar a reciclagem e a redução de resíduos - Pode gerar aversão pública, principalmente por ser uma tecnologia pouco utilizada no Brasil

Fonte: adaptado de (CHENG; HU, 2010)

A tabela mostra que a gestão dos resíduos está longe de ser um problema de fácil resolutividade, visto que cada forma de destinação implica em limitações e impactos no meio ambiente. Resgatando os conceitos apresentados na revisão bibliográfica pode-se inserir as alternativas de disposição na hierarquia proposta por Anthony et al. (2003).

3. GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL

A gestão de resíduos é contextualizada à realidade brasileira, primeiro do ponto de vista regulatório e em seguida considerando os dados nacionais agregados sobre geração, coleta e destinação dos resíduos sólidos urbanos.

3.1. Ambiente regulatório

O ambiente regulatório é apresentado, primeiro em relação às responsabilidades das esferas públicas, em seguida à Política Nacional dos Resíduos Sólidos é explorada em relação a seus objetivos, principais resultados e últimos desenvolvimentos.

3.1.1. Responsabilidades

A Constituição Federal através do artigo 24 confere a competência à União, aos Estados e ao Distrito Federal para legislar concomitantemente, dentre outros assuntos, sobre proteção do meio ambiente. Cabendo a União estabelecer normas gerais, e os Estados normas suplementares (BRASIL, 1998).

Apesar da Constituição não conferir competência aos Municípios para legislar sobre proteção do meio ambiente, os serviços de coleta e destinação de resíduos domiciliares são de incumbência municipal, pois são serviços públicos locais cujos interesses prevalecem sobre os da União ou dos Estados (BRASIL, 1998).

3.1.2. Política Nacional de Resíduos Sólidos

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) procurou endereçar as lacunas deixadas por legislações que a precederam. A Política Nacional de Resíduos Sólidos foi instituída pela Lei Federal 12.305 (BRASIL, 2010). O princípio da lei é o compartilhamento de responsabilidades entre governo, empresas e população. A nova legislação reforça o aspecto social da reciclagem inserindo as cooperativas de catadores como prestadoras de serviços de limpeza urbana. É importante ressaltar que a política não altera a estrutura de responsabilidades apresentada no item 2.1.1, mas cria ferramentas para que essa estrutura seja mais eficaz.

A lei resgatou a urgência da destinação adequada de resíduos sólidos urbanos impondo um prazo de 4 anos para que os municípios se adequassem, encerrando os lixões sob sua responsabilidade até o ano de 2014. É importante ressaltar que a destinação dos resíduos a céu aberto, denominados lixões, já havia sido definida como um crime ambiental pela Lei Federal 9.605 (BRASIL, 1998), mas infelizmente essa forma de destinação ainda é uma realidade presente em todas as unidades da Federação. Os municípios alegaram a escassez de recursos.

Em 2015 foi feita uma tentativa de adiamento para a eliminação dos lixões para 2018, a proposta foi aprovada em ambas as Câmaras, mas vetada pela presidência da República.

A figura 9 exemplifica a situação crítica da gestão dos resíduos sólidos no Brasil é o caso do chamado Lixão da Estrutural, considerado o maior lixão da América Latina, funcionou por mais de 60 anos a apenas quinze quilômetros do Congresso Nacional e a 6 quilômetros do Parque Nacional de Brasília. O lixão foi encerrado em janeiro de 2018, mas ainda há muitos outros lixões funcionando regularmente no território nacional.

Figura 9 – Lixão da Estrutural próximo à Brasília



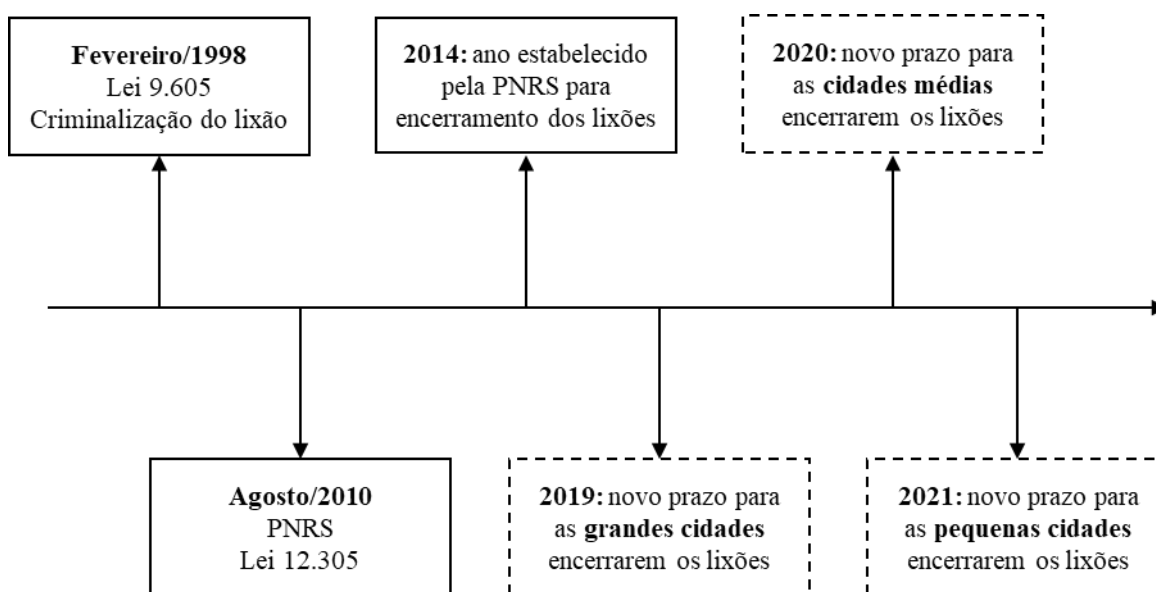
Fonte: (AGÊNCIA SENADO, 2019)

Tramita uma nova proposta de adiamento, já aprovada no Senado e em andamento na Câmara dos Deputados. A proposta foi incorporada na Medida Provisória 868/2018 (MP do Saneamento) através de uma emenda pretende adequar os prazos de encerramento dos lixões à realidade dos municípios, assim ficariam estabelecidos os seguintes prazos: julho de 2018 para capitais e regiões metropolitanas; julho de 2019 para cidades com mais de 100.000 habitantes; julho de 2020 para cidades de 50.000 até 100.000 habitantes; e julho de 2021 para cidades com menos de 50.000 habitantes. Em paralelo há discussões para editar normas complementares sobre o acesso a recursos relacionados ao tema para que os municípios possam destinar de forma correta seus resíduos.

Essas discussões seguem as diretrizes em relação aos instrumentos necessários para o atingimento dos objetivos da PNRS, notadamente a elaboração dos Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos como condição ao acesso dos recursos da União.

A figura 10 representa a linha do tempo com os principais acontecimentos relacionados ao encerramento dos lixões, com os novos prazos limite propostos para as cidades segundo o porte.

Figura 10 – Linha do tempo encerramento dos lixões



Fonte: elaboração própria

O artigo 18, combinado com o artigo 55 (referente a vigência), salienta as exigências dos Planos Municipais para que os municípios acessem esses recursos:

Art. 18. A elaboração de plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos, nos termos previstos por esta Lei, é condição para o Distrito Federal e os Municípios terem acesso a recursos da União, ou por ela controlados, destinados a empreendimentos e serviços relacionados à limpeza urbana e ao manejo de resíduos sólidos, ou para serem beneficiados por incentivos ou financiamentos de entidades federais de crédito ou fomento para tal finalidade. (BRASIL, 2010, N.P.)

A aprovação do plano não garante o recebimento dos recursos, é necessário que os pleitos atendam as seguintes condições:

- O objeto do pleito está identificado no plano;
- Há previsão de atender a essa necessidade;
- Há definição clara das responsabilidades; e

- Há condições operacionais e previsão de recursos financeiros para a manutenção e/ou continuidade da atividade.

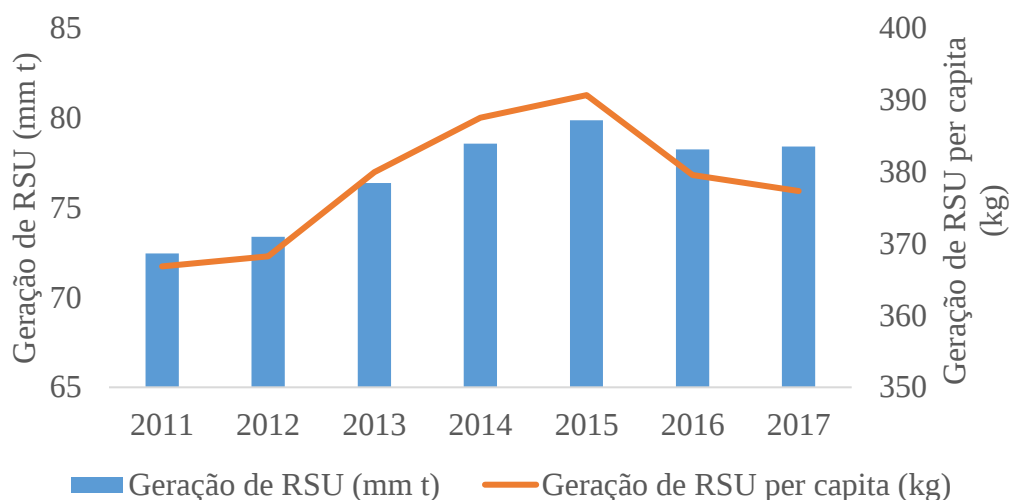
A PNRS é marco regulatório abrangente que tem como objetivo uniformizar os princípios e alinhar as políticas de gestão de resíduos com as esferas estaduais e principalmente municipais em todo território nacional. O caso dos lixões mostra que é necessário que os instrumentos da política, em especial os mecanismos econômicos, sejam utilizados de forma mais eficaz para disponibilizar os recursos necessários para melhorar a qualidade da gestão dos resíduos nos municípios.

Finalmente é importante notar que a lei incluiu em diversos trechos a utilização da recuperação energética dos resíduos como uma forma ambientalmente adequada para a destinação final dos rejeitos. Como discorrido a esfera competente para legislar sobre a destinação de recursos é a municipal, mas a legislação federal cria uma prerrogativa que sustenta alternativas relacionadas a recuperação energética.

3.2. Geração

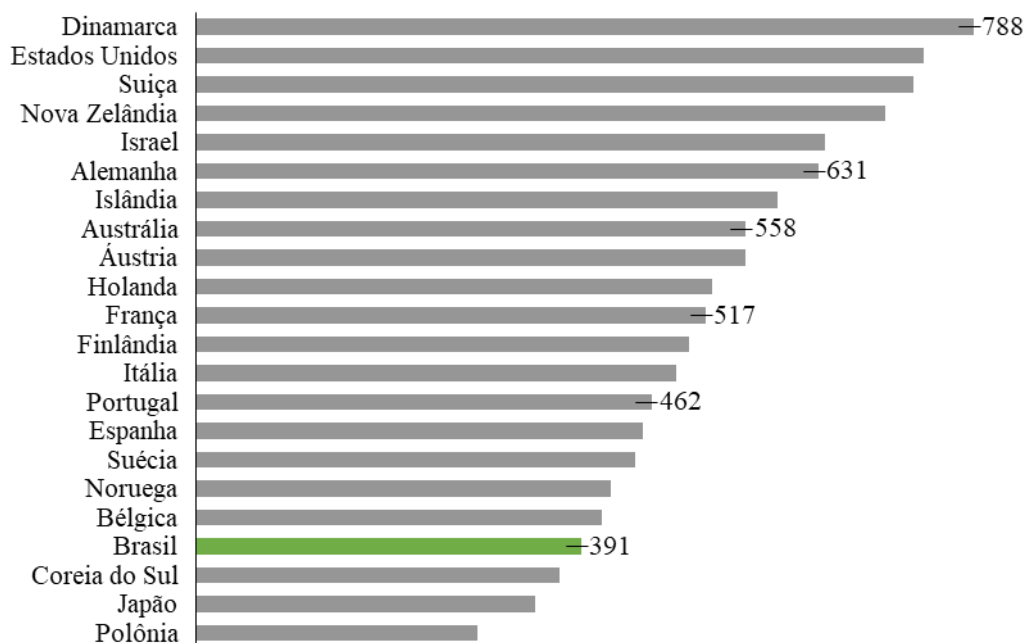
Em 2017 os brasileiros geraram no total 78,4 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, dos quais 71,6 milhões de toneladas foram coletadas (91,2% de cobertura). Portanto, 6,9 milhões de toneladas não foram objeto de coleta, consequentemente, tiveram destino impróprio (ABRELPE, 2018).

A figura 11 mostra a geração de resíduos no Brasil de 2011 a 2017, com um crescimento moderado da geração, com taxa de crescimento anual composta (TCAC) de 1,3%, e uma manutenção da cobertura da coleta em aproximadamente 90% do total gerado. Em termos per capita a geração (kg/habitante/ano) teve uma TCAC de 0,5% isso mostra que em termos de geração o Brasil apresenta um crescimento principalmente causado pelo aumento populacional (TCAC de 0,9%). A tendência é que a população brasileira cresça a taxa cada vez menores (IBGE, 2018).

Figura 11 – Gráfico de geração de RSU

Fonte: (ABRELPE, 2018)

A comparação com países desenvolvidos ilustrada na figura 12 mostra que a geração per capita brasileira é significativamente menor. Segundo relatório do Banco Mundial existe uma tendência onde o aumento do nível de renda do país é acompanhado pelo aumento da geração de resíduos per capita.

Figura 12 – Geração per capita países selecionados (kg/ano/habitante)

Fonte: (OCDE e ABRELPE, 2018)

O fenômeno da urbanização torna o desafio mais complexo para as gestões municipais que já gastam uma parcela significativa de seu orçamento para gerir os resíduos municipais (KAZA et al., 2018).

No entanto com o aumento da conscientização em relação ao problema do lixo e o aprendizado com países em estágios mais avançados de desenvolvimento, é provável que o desenvolvimento brasileiro aconteça de forma mais sustentável e racional em relação a geração de resíduos.

Outro fator importante para caracterizar a geração de RSU é a análise da composição gravimétrica dos resíduos, ou seja, a determinação dos constituintes e de suas respectivas percentagens em peso e volume (ABNT, 2004).

Tabela 2 – Composição dos resíduos coletados no Brasil - 2008

Materiais	Participação (%)
Metais	2,9
Papel	13,1
Plástico	13,5
Vidro	2,4
Matéria orgânica	51,4
Outros	16,7

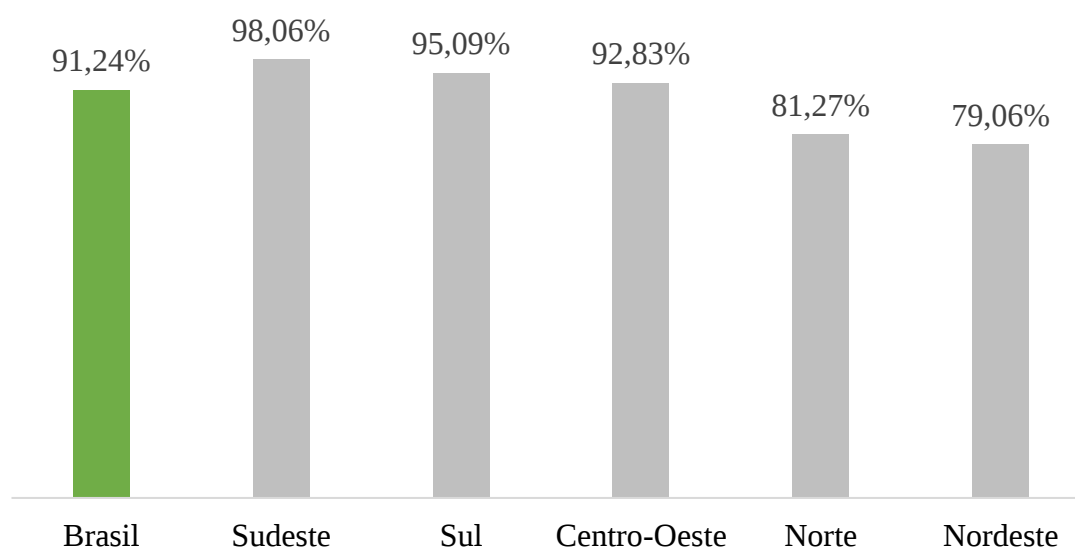
Fonte: (IBGE, 2008)

A tabela 1 mostra que o lixo gerado no Brasil é principalmente composto de matéria orgânica (51,4%), seguido por plástico e papel, ainda segundo levantamento do IBGE 31,4% do lixo pode ser caracterizado como reciclável. A caracterização do lixo gerado é importante porque afeta decisões relacionadas tanto a coleta quanto a destinação final dos resíduos.

3.3. Coleta

Os níveis de coleta no Brasil são satisfatórios atingindo 91,24%, mas com menor penetração nas regiões Norte e Nordeste, como mostra a figura 13.

Figura 13 – Índice de cobertura da coleta de RSU (%)



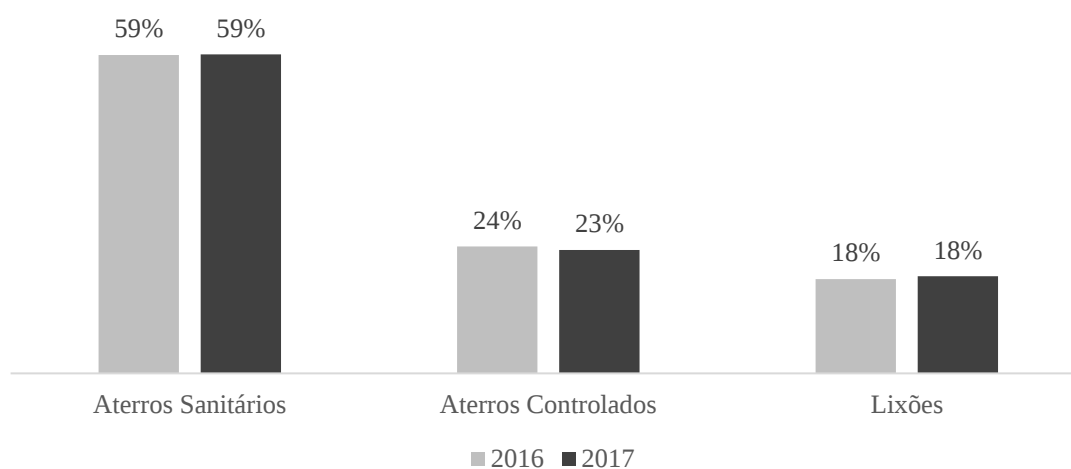
Fonte: (ABRELPE, 2018)

Em relação a gestão do lixo o principal ponto de melhoria seria ampliar a coleta seletiva, com baixo nível de penetração, mesmo nas regiões mais desenvolvidas do país.

Os dados em relação a coleta seletiva são bastante contrastantes, relatórios analisados por Conke e Nascimento (2017) apresentaram índices de cobertura variando de 60% a 14%. Os resultados do estudo revelaram um índice de cobertura de 41% em termos de municípios cobertos, mas apenas 10% em relação ao potencial de todo resíduo que poderia ser reciclado (CONKE; NASCIMENTO, 2018).

3.4. Destinação

O perfil de destinação dos RSU no Brasil em 2017 (figura 14) mostra uma concentração em aterros sanitários (59,1%) seguido por aterros controlados (22,9%) e por último os lixões que ainda representam 18% do total de resíduos coletados.

Figura 14- Destinação dos resíduos no Brasil (% t/ano)

Fonte: (ABRELPE, 2018)

Quando comparado com outros países, a destinação em aterros (agrupando aterros sanitários, aterros controlados e lixões) é a segunda maior ficando abaixo somente do México (EPE, 2014).

Tabela 3 - Destinação dos resíduos em países selecionados

País	Reciclagem	Compostagem	Recuperação Energética	
			¹	Aterro sanitário
Holanda	39%	7%	42%	12%
Suíça	31%	11%	45%	13%
Dinamarca	29%	2%	58%	11%
Estados Unidos	24%	8%	13%	55%
Austrália	20%	<<1%	<1%	80%
Alemanha	15%	5%	30%	50%
Japão	15%	-	78%	7%
Israel	13%	-	-	87%
França	12% ²	Não informado	40%	48%
Brasil	<8%	2%	-	>90%
Reino Unido	8%	1%	8%	83%
Itália	3%	10%	7%	80%
Suécia	3%	5%	52%	40%
México	2%	-	-	98%

Fonte: (EPE, 2014)

- (1) Principalmente incineração
- (2) Inclui compostagem
- (3) Inclui aterros controlados e lixões

O gráfico da figura 14 mostra que o Brasil ainda tem uma grande quantidade de resíduos destinados de forma inadequada destoando do perfil de outros países com destinação mais diversificada como mostra a tabela 2. O levantamento mostra taxas elevadas de reciclagem e incineração quando comparado aos números do Brasil. A compostagem também aparece como uma alternativa, o que poderia ser melhor aproveitado no Brasil dada a grande parcela de resíduos orgânicos gerada.

4. RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA

A recuperação energética consiste no tratamento térmico aproveitando o poder calorífico dos resíduos. Nesta seção destaca-se as principais aplicações, além da descrição de três tecnologias selecionadas que se enquadram no conceito de recuperação, ou aproveitamento energético.

4.1. Principais aplicações

A recuperação energética é utilizada principalmente para a geração de energia. O calor gerado pela queima dos resíduos em altas temperaturas é utilizado para aquecer uma caldeira e gerar vapor, que por sua vez é usado para movimentar turbinas e gerar energia elétrica.

Nos países do hemisfério norte utiliza-se o calor gerado na caldeira para os sistemas de calefação - serviço de pouca utilidade no Brasil, por óbvio. Além disso, pode-se utilizar o vapor gerado na caldeira para processos industriais como prensas - muito utilizado, por exemplo, na indústria de papel e celulose para utilidades.

4.2. Tecnologias selecionadas de recuperação energética

Serão apresentadas três tecnologias para geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos:

1. Recuperação energética do biogás
2. Incineração com recuperação energética
3. Gaseificação

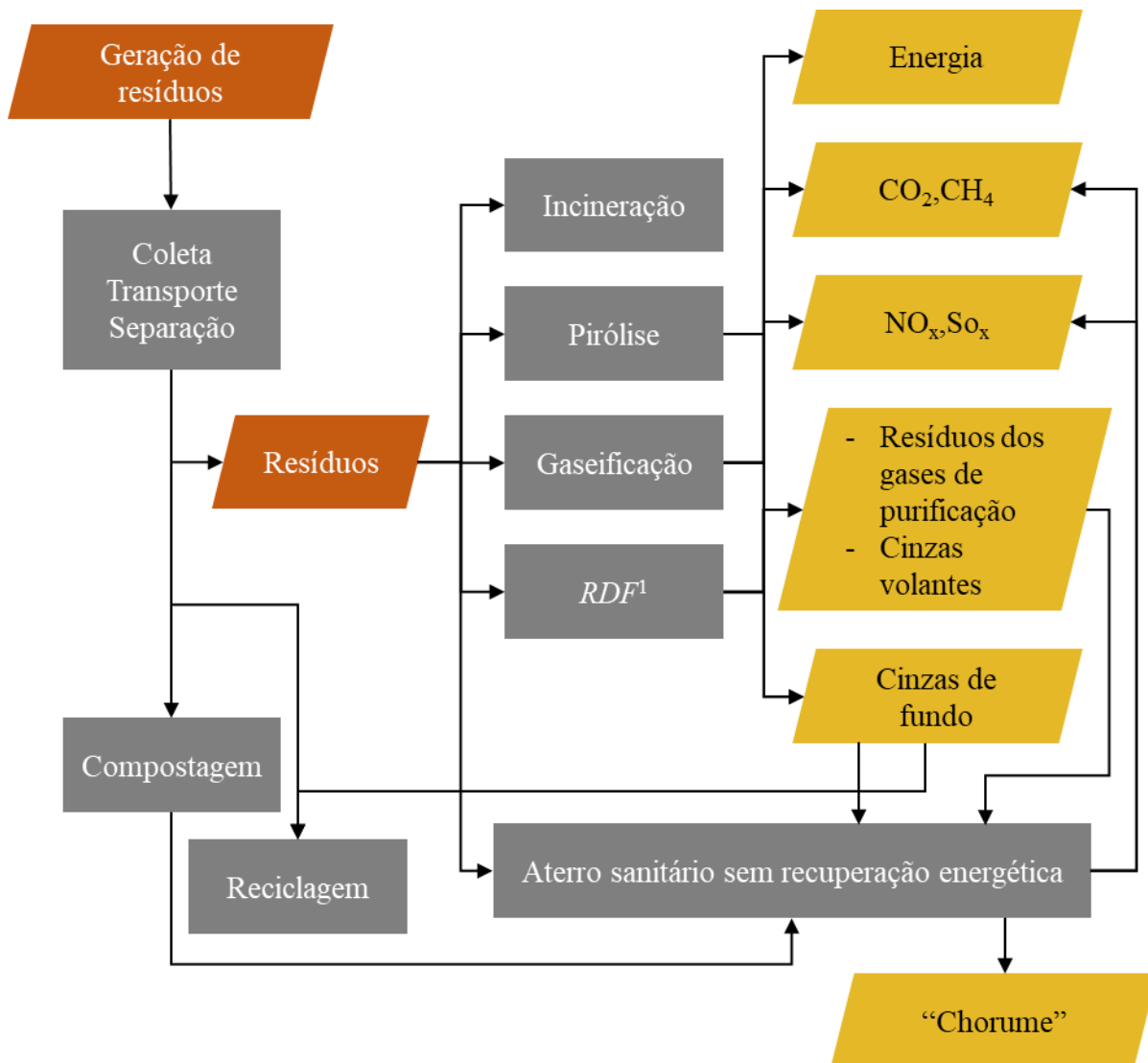
A tecnologia de aproveitamento do biogás é definida como um tratamento bioquímico, já que se aproveita da decomposição natural dos materiais. O gás de aterro é uma alternativa que pode ser aplicada a curto e médio prazo para os gases gerados nos aterros sanitários e controlados já existentes. É utilizada em aterros de diversos países, e consiste na recuperação do biogás oriundo da decomposição natural dos restos orgânicos.

A incineração com recuperação energética dos RSU pode ser classificada como um processo termoquímico e caracteriza-se pela recuperação dos gases de escape do processo, os quais são encaminhados para uma caldeira de recuperação de calor, onde é produzido vapor d'água para mover uma turbina. As tecnologias de gaseificação, assim como a incineração, envolvem processos termoquímicos; o gás pode ser queimado em um ciclo de vapor, ou em um motor de combustão interna, bem como usado para outras finalidades, como o uso industrial ou

residencial. Essa tecnologia ainda é incipiente com baixa implementação (CODIGNOLE et al., 2015).

A figura 15 representa o fluxo dos resíduos em sistemas de recuperação energética, bem como os rejeitos e substâncias geradas no processo. A representação inclui também a relação destas tecnologias com outras formas de destinação.

Figura 15 - Fluxo dos resíduos para tecnologias de recuperação energética



Fonte: adaptado de (HARAGUCHI; SIDDIQI; NARAYANAMURTI, 2019)

(1) *RDF: refuse derived fuel*

4.2.1. Recuperação Energética do Biogás

A recuperação energética do biogás consiste na queima do gás metano (CH₄), ou gás de aterro, captado através de dutos no processo de decomposição anaeróbica dos resíduos

destinados em aterros sanitários. A energia térmica gerada na queima é convertida em energia elétrica. A recuperação energética através do biogás é uma solução complementar à destinação em aterros sanitários, como mostra a figura 16.

Figura 16– Complementariedade entre aterros sanitários e usinas de biogás

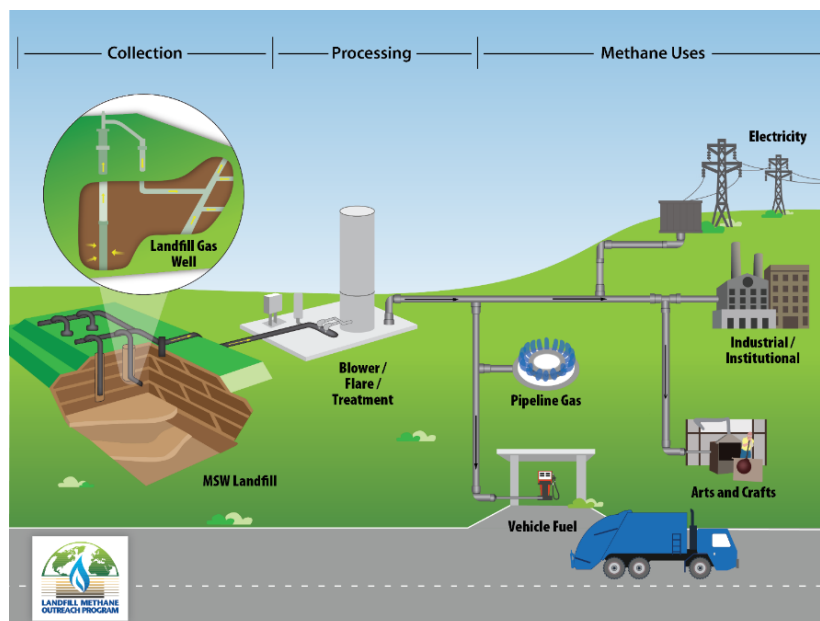


Fonte: (EPA, 2019)

A utilização do metano no processo de recuperação energética, além de aproveitar o potencial calorífico do gás, tem um forte apelo ambiental, pois o gás metano é um dos gases que mais contribuem para o efeito estufa. Estima-se que o metano capture 28 vezes mais radiação que o CO₂ (MYHRE, 2013), contribuindo, assim, de forma mais acelerada para o aquecimento global.

Um sistema padrão de coleta de biogás tem três componentes centrais: poços de coleta e tubos condutores, um sistema de tratamento e um compressor. A figura 17 representa um sistema típico de aproveitamento do biogás dos RSU.

Figura 17 – Cadeia de aproveitamento do gás de aterro



Fonte: (EPA, 2019)

La Rovere et al. (2006) apontam iniciativas em andamento no Brasil (NovaGerar em Nova Iguaçu-RJ e Vega Bahia em Salvador-BA) que visam a recuperação de biogás de aterros sanitários, e que podem gerar reduções certificadas de emissão (RCEs) na ordem de 2,3 milhões de toneladas de CO₂ equivalente/ano, com receita potencial de US\$ 11,4 milhões/ano.

4.2.2. Incineração com recuperação energética

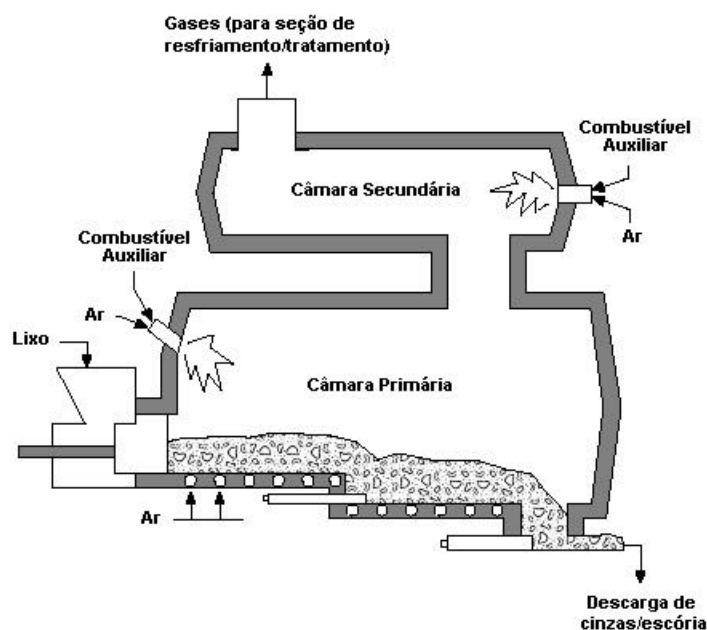
A incineração ou combustão dos resíduos sólidos urbanos é um dos processos termoquímicos que tem como objetivo reduzir tanto o volume quanto a massa dos resíduos através de sua completa oxidação. A recuperação energética é feita através da geração de energia em Ciclos de *Rankine*, com vapor gerado nas caldeiras conduzido a turbinas movidas à vapor gerando energia elétrica (DALMO et al., 2019). A incineração é considerada a forma mais confiável e economicamente viável de produção de energia através de resíduos (CARNEIRO; GOMES, 2019). Ainda segundo Cucchiella et al. a tecnologia de incineração também se destaca do ponto de vista ambiental quando comparada à outras tecnologias de recuperação energética de resíduos sólidos (CUCCHIELLA; D'ADAMO; GASTALDI, 2017).

O processo de reciclagem energética começa com um pré-tratamento do resíduo bruto coletado, para a separação, por catação manual ou mecânica, de componentes com valor comercial (papel, vidros, plásticos, alumínio, metais e outros).

O material restante pode sofrer moagem, secagem, compostagem e enfardamento, para otimizar a queima. O incinerador, de alimentação manual ou mecânica (com esteiras e dosadores adequados), pode ser de câmaras múltiplas (com grelhas móveis) ou rotativo, dependendo de sua capacidade.

A concepção moderna de incineração de RSU é uma queima extremamente controlada e envolve tipicamente duas câmaras de combustão, esquematizado na figura 18.

Figura 18 - Esquema representativo de dupla câmara de combustão



Fonte: (OLIVEIRA, 2004)

A câmara primária é a receptora direta do RSU. Nesse dispositivo, a temperatura de operação varia tipicamente entre 500°C e 900°C. Em todas as configurações, a alimentação de oxigênio nessa câmara é sub-estequiométrica, evitando-se assim gradientes elevados de temperatura. Nessas condições controladas, evita-se a volatilização de grandes quantidades de metais presentes no RSU. Além disso, minimiza-se a formação de óxidos nitrosos, que surgem apenas sob temperaturas mais elevadas. Ao final da operação, a parte sólida é reduzida a cerca de 10% do volume original e tem o aspecto de cinza.

A fase gasosa gerada na câmara primária é encaminhada para a câmara secundária. Nesse caso, a atmosfera é altamente oxidante e a temperatura varia entre 1000-1250°C. Os gases gerados na câmara anterior são oxidados a CO₂ e H₂O. Nessa temperatura, a probabilidade de

existência de moléculas com grande número de átomos como dioxinas e furanos, compostos altamente nocivos aos seres humanos, é mínima (OLIVEIRA, 2004).

Os gases de exaustão gerados na incineração são resfriados em trocadores de calor, que permitem também reaproveitar a energia térmica, e são neutralizados quimicamente em colunas lavadoras – a água arrasta partículas sólidas presentes nos gases e forma lamas e suspensões, que depois recebem tratamento adequado. O uso de outros lavadores, filtros e precipitadores permite que os gases emitidos na incineração de RSU obedeçam às exigências da legislação ambiental (OLIVEIRA, 2004).

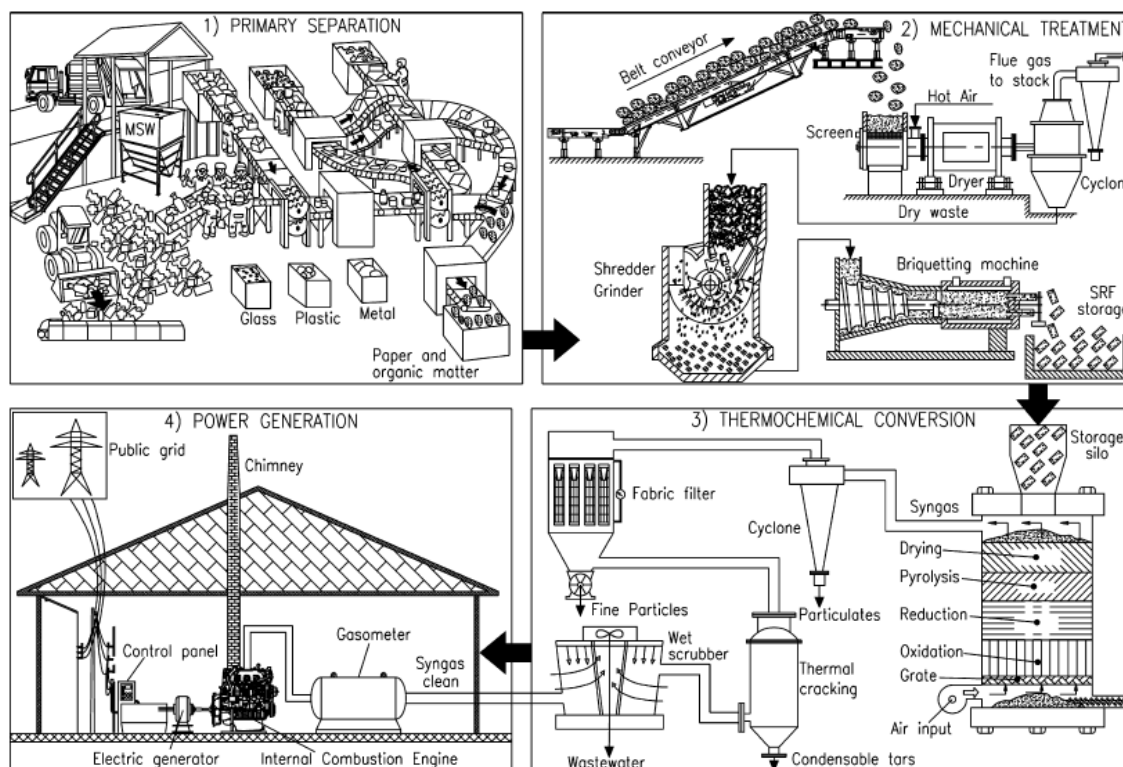
No Brasil a reciclagem energética ainda é muito criticada, principalmente por ser confundida com a simples incineração dos resíduos – que não aproveita o calor da queima para gerar energia e, ainda, não emprega tecnologia adequada para evitar a emissão de gases prejudiciais à saúde e ao meio ambiente.

Nos últimos anos houve avanços tanto em relação a taxa de recuperação de energia quanto em relação a redução de emissões (CASTALDI & THEMELIS, 2010). Criando um ambiente favorável para expansão da recuperação energética como uma forma de destinação do lixo.

4.2.3. Gaseificação

A gaseificação é um processo de oxidação parcial a elevadas temperaturas (600 – 1700°C) que converte componentes orgânicos em um Gás de Síntese, que consiste principalmente de CO e H₂, uma pequena parcela de CH₄, pequenas quantidades de diferentes hidrocarbonetos, impurezas inorgânicas e particulados (ARAFAT; JIJAKLI, 2019).

Figura 19 – Fluxo do processo de recuperação energética através da gaseificação



Fonte: extraído de (CODIGNOLE et al., 2015)

O processo, reproduzido na figura 19, inicia na separação dos materiais recicláveis (plásticos, vidros e metais). No estudo de Codignole et al. os materiais selecionados para o processo de gaseificação foram os papéis e os materiais orgânicos. O primeiro passo é pré processar os materiais e produzir o chamado combustível recuperado sólido (em inglês *solid recovered fuel* - SRF). O autor diferencia o SRF do combustível derivado de lixo (em inglês *refuse derived fuel*) pelo fato do SRF não conter lixo contaminante.

Em seguida o SRF é introduzido no processo de conversão térmica para ser transformado no Gás de Síntese que vai alimentar o motor de combustão interna e converter a energia térmica em elétrica.

A partir da descrição operacional do processo de gaseificação o autor passa para avaliação financeira da implementação de uma planta de geração de energia no Brasil usando o SRF, avaliando diversos cenários e os investimentos necessários, bem como os custos de operação e manutenção e finalmente as receitas, com a taxa de destinação, venda de recicláveis, e inclui também receita com venda de créditos de carbono.

Como mencionado o processo de geração de energia através da gaseificação ainda não é um processo consolidado, principalmente quando comparado ao processo de incineração tradicional, mas os resultados do trabalho de Codignole et al. são promissores, comprovando através do valor presente líquido positivo dos fluxos de caixa do projeto a viabilidade do empreendimento.

4.3. Utilização no Brasil

Como mencionado anteriormente, o tratamento térmico de resíduos sólidos tem pouca representatividade nas formas de destinação dos resíduos gerados no país, a incineração estava confinada à destinação de resíduos perigosos, como os resíduos hospitalares. No entanto podemos destacar algumas iniciativas que adotaram os conceitos da recuperação energética para endereçar a questão do lixo.

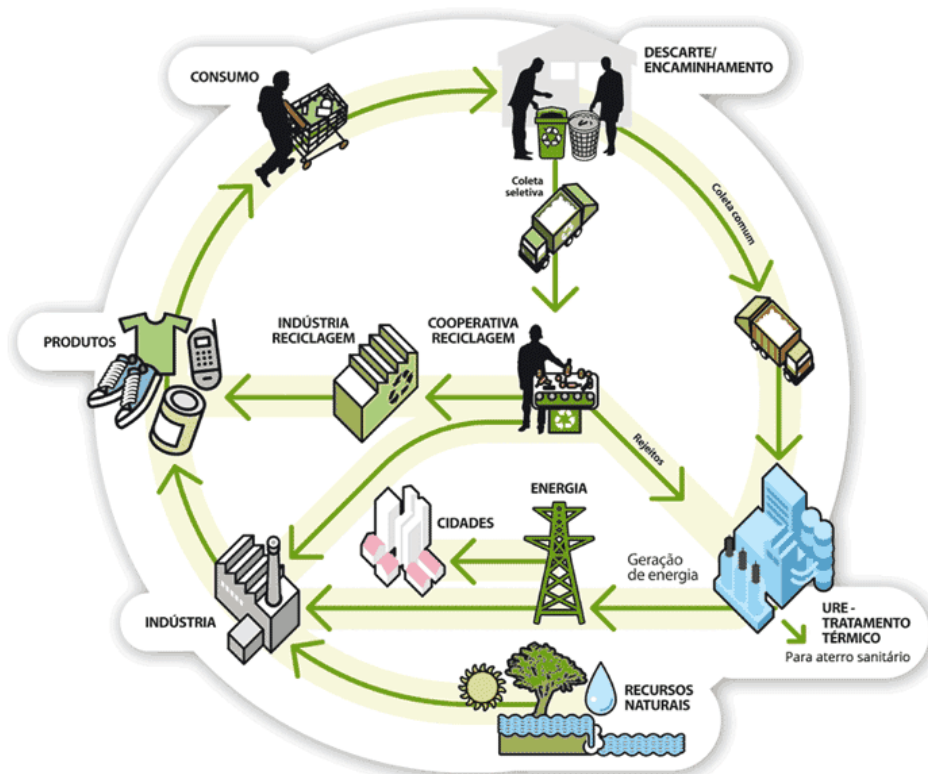
4.3.1. Usina Verde

O primeiro caso é o da Usina Verde, um projeto piloto financiado pela iniciativa privada e desenvolvido em parceria com a COPPE/UFRJ. Em funcionamento desde 2004, a unidade de recuperação energética (URE) fica na Ilha do Fundão e recebe diariamente 30 toneladas de resíduos pré-tratados, provenientes do aterro sanitário da Comlurb (Companhia Municipal de Limpeza Urbana). O sistema de geração elétrica é constituído por uma caldeira de recuperação de calor e turbina a vapor com potência de 440 kW.

4.3.2. URE Barueri

A segunda iniciativa se trata de uma URE no município de Barueri-SP. O empreendimento aguarda emissão de alvará de construção para iniciar as obras. A planta terá capacidade de receber 825 toneladas de resíduos por dia e potência instalada de 20 MW. O projeto é uma Parceria Público-Privada entre a Prefeitura de Barueri e a empresa de soluções ambientais Foxx-Haztec.

Figura 20 – Ciclo positivo do resíduo



Fonte: (FOXX-HAZTEC, 2019)

A usina fará o tratamento térmico dos resíduos que não forem encaminhados à coleta seletiva e cooperativas de reciclagem. Contribuindo desta forma com o “ciclo positivo do resíduo” representado na figura 20.

4.3.3. Usina de lixo – GTL Energia

O último projeto é a usina de lixo superadiabática da empresa GTL Energia. A empresa emprega o processo de gaseificação superadiabática com recuperação energética através da queima do gás, segundo a empresa o processo de gaseificação apresenta melhores resultados em relação a incineração tradicional. O processo de gaseificação permite aumentar o poder calorífico dos resíduos mesmo os que têm alto teor de umidade. Outra característica é a modularidade, cada módulo tem capacidade de absorver 2,1 toneladas de resíduos por hora produzindo aproximadamente 3MWh de energia.

Figura 21 – Usina de lixo superadiabática



Fonte: (GTL Energia, 2019)

A figura 21 mostra os sistemas do módulo de gaseificação da usina de lixo superadiabática da GTL Energia, com o sistema de alimentação do processo, incineração, tratamento dos gases e exaustão dos gases de saída.

5. ANALISE ECONÔMICO-FINANCEIRA

O foco da análise será da tecnologia de incineração com recuperação energética introduzida no item 5.3.2, conhecida como unidade de recuperação energética. A usina será localizada na cidade de São Paulo - SP.

5.1. Metodologia

Como já apresentado na introdução, o estudo econômico-financeiro se apoiará em referências bibliográficas para embasar as premissas operacionais. As premissas financeiras serão baseadas em informações de mercado de empresas similares, ou seja, com o mesmo perfil de negócio que as Usinas de Recuperação Energética. As premissas macroeconômicas foram retiradas do Banco Central.

Os valores obtidos nas referências bibliográficas foram atualizados pela inflação, usando o Índice Nacional de Preços ao Consumidor – Amplo (IPCA-A). Todos os valores foram referenciados em dezembro de 2019, utilizando valores realizados de IPCA até 2018 e a mediana das expectativas de mercado para o índice em 2019 obtida do Boletim Focus publicado no dia 25 de outubro de 2019.

Para os valores expressos em moeda estrangeira aplicou-se a taxa de câmbio do período em que a publicação foi feita.

O critério de avaliação da viabilidade econômico-financeira se baseia na metodologia de Fluxo de Caixa Descontado (FCD) usando valores constantes, referenciados em 2019. O projeto será avaliado em um prazo de 30 anos, considerado o tempo de vida médio de plantas desta natureza (TOLMASQUIM, 2016). Foi considerado um tempo de construção de 3 anos.

O modelo de Fluxo de Caixa Descontado calcula o valor presente líquido (VPL) do projeto através da soma dos fluxos de caixa (FC) líquidos de cada período (n) em anos descontando por uma taxa adequada (t); esta taxa é denominada de taxa de desconto do projeto. O cálculo é representado pela equação abaixo:

Equação 1 – Cálculo do valor presente líquido (VPL)

$$VPL = \sum_{n=1}^t \frac{FC_n}{(1 + t)^n} \quad (1)$$

A viabilidade é verificada nos casos em que o valor presente líquido for maior do que zero ($VPL > 0$).

Além do cálculo do VPL é importante considerar a taxa interna de retorno do projeto (TIR). A Taxa interna de retorno é definida como a taxa de desconto aplicada que resulta em VPL nulo (VPL=0), assim analogamente a equação (1) e substituindo a taxa de desconto t pela TIR temos:

Equação 2 – Cálculo da taxa interna de retorno (TIR)

$$VPL = \sum_{n=1}^t \frac{FC_n}{(1 + TIR)^n} = 0 \quad (2)$$

O cálculo da TIR é importante para analisar de forma relativa projetos de diferentes naturezas e comparar empreendimentos em relação a taxa de retorno implícita nos fluxos obtidos.

5.2. Premissas

Como mencionado, as premissas para o estudo de viabilidade econômico-financeiro foram obtidas através de informações públicas obtidas de relatórios do Banco Central, IBGE, BNDES e pesquisa bibliográficas.

5.2.1. Premissas macroeconômicas

As premissas assumidas macroeconômicas foram retiradas do Boletim Focus do Banco Central, com projeções até 2021, para o fim do período, e mantido constante para os períodos seguintes. A tabela 4 resume as projeções das premissas macroeconômicos.

Tabela 4 – Projeção de indicadores macroeconômicos

	2019	2020	2021	2022	...
IPCA-A	3,29%	3,60%	3,75%	3,75%	3,75%
PIB	0,91%	2,00%	2,50%	2,50%	2,50%
SELIC - Meta	4,50%	4,50%	6,50%	6,50%	6,50%

Fonte: Banco Central (Boletim Focus – 25/10/2019)

5.2.2. Capacidade de destinação

A unidade de recuperação energética teórica consiste em um sistema de triagem para separar os materiais recicláveis e o restante dos materiais segue para o processo de incineração. A unidade foi dimensionada para processar 1.000 toneladas diárias de resíduos sólidos urbanos. Assume-se que a capacidade seja 100% aproveitada por contratos de destinação com a prefeitura no período analisado.

Utilizando as informações da composição média dos RSU no Brasil, considera-se que 81% dos resíduos recebidos sejam tratados termicamente, enquanto os 19% são reciclados gerando receitas adicionais para o empreendimento.

5.2.3. Capacidade de geração elétrica

O cálculo do potencial elétrico teórico de uma URE parte do poder calorífico dos materiais que compõe os resíduos sólidos. Assim com a composição gravimétrica dos resíduos apresentada na seção 3.2 e o poder calorífico de cada material calcula-se o potencial calorífico total dos resíduos. Dependendo do PCI (Potencial Calorífico Inferior) as plantas de incineração podem gerar de 0,3 a 0,7 MWh/tonelada de RSU (KLINGHOFFER & CASTALDI, 2013). O PCI dos resíduos tende a ser mais baixo quanto maior for a umidade dos resíduos. Como no Brasil mais de 50% dos resíduos são orgânicos adota-se o valor inferior de 0,3 MWh/t para a taxa de conversão dos resíduos em energia.

A massa de resíduos incinerada considerada é de 810 toneladas diárias, considerando a parcela de resíduos destinados que não podem ser reciclados.

A multiplicação da taxa de conversão pela massa de resíduos resulta na geração anual de 8.620 MWh de energia elétrica, considerando 340 dias operacionais no ano.

5.3. Fontes de receita

As fontes de receita do empreendimento são:

1. Receita de destinação
2. Receita com energia
3. Receita com recicláveis

5.3.1. Receita de destinação

A receita com a destinação do lixo é calculada multiplicando a massa de resíduos destinada pela taxa negociada com o município.

Equação 3 – Receita com destinação

$$R_{d,n} = M_d * P_{d,n} \quad (3)$$

Onde $R_{d,n}$ é a receita de destinação em um determinado ano n expressa em Reais, M_d é a massa destinada expressa em toneladas, considerada constante de acordo com a capacidade de processamento de 1.000 toneladas estipulada na seção 6.2.2 e $P_{d,n}$ o preço cobrado pela destinação expresso em R\$/tonelada.

O preço de destinação considerado foi de R\$ 100,00/tonelada para o primeiro ano do projeto aumentando linearmente ao longo do prazo do projeto até atingir R\$ 180,00/tonelada. O valor de R\$ 100,00 por tonelada foi obtido dos estudos de Codignole et al. (2015) e está em linha com os valores atualizados pela inflação da pesquisa do SNIS (2011).

O valor terminal de R\$ 180,00/tonelada foi estimado seguindo os padrões internacionais. Os preços de destinação no Brasil são baixos quando comparados a países do hemisfério norte justamente pelo fato de destinar de forma inadequada, principalmente em aterros controlados e lixões, práticas há anos proibidas nesses países (EPE, 2014). Assume-se, portanto, a convergência dos preços de destinação no Brasil para os preços praticados nos países desenvolvidos.

5.3.2. Receita com energia

A receita com a venda de energia foi calculada multiplicando o preço de energia (P_e) pela energia gerada (E_g), discutida no item 6.2.2 no valor anual de 88.914 MWh.

Equação 4 – Receita com energia

$$R_e = P_e * E_g \quad (4)$$

A análise considerou que a energia seria vendida no mercado livre no Ambiente de Contratação Livre (ACL), através de contratos bilaterais, já que os preços para essa modalidade são superiores aos praticados no Ambiente de Contratação Regulada (ACR) através dos leilões (EPE, 2014). O preço da energia (P_e) considerado para venda foi R\$ 180,00. Esse valor reflete a estimativa do valor médio do preço de energia de biomassa negociados no mercado livre. No ambiente regulado o valor no leilão de 27 de junho de 2019 foi de R\$ 179,87/MWh (EPE, 2019), portanto a estimativa de R\$ 180,00 é uma estimativa conservadora para o preço da energia.

5.3.3. Receita com recicláveis

A venda de materiais recicláveis considerou o percentual de 19% do total de resíduos destinados compostos de plástico (14%), metais (3%) e vidro (2%). A quantidade foi obtida multiplicando esses percentuais pela massa total de resíduos. Assim a receita com a venda de recicláveis foi obtida multiplicando a massa de cada material (m_r) pelo preço médio de mercado dos recicláveis (P_{m_r}).

Equação 5 – Receita com recicláveis

$$R_r = P m_r * m_r \quad (5)$$

A tabela 5 ilustra o cálculo da venda de recicláveis para um ano genérico.

Tabela 5 – Cálculo da receita com recicláveis

Material	Percentual	Massa (kt)	Preço (R\$/t)	Receita (kR\$)
Plástico	14%	46	1.108	50.864
Metais	3%	10	150	1.484
Vidro	2%	8	190	1.550

Fonte: elaboração própria e (CEMPRE, 2012)

5.4. Custos de operação e manutenção

O custo da separação dos materiais foi considerado como R\$ 80/tonelada baseado em valores da Central Mecanizada de Triagem ponte pequena (LOGA, 2019). Os custos de operação e manutenção com a operação de incineração foram considerados como 3,5% do valor total do investimento (TOLMASQUIM, 2003). Além disso existem os custos de disposição dos rejeitos da incineração, como já mencionado representam 10% do total de massa incinerado, esses rejeitos serão destinados a uma taxa equivalente a cobrada de R\$ 100,00/tonelada no início do projeto e R\$ 180,00/tonelada no último ano, crescendo linearmente no período.

5.5. Depreciação

A depreciação dos equipamentos será linear atingindo o valor terminal nulo ao final do projeto.

5.6. Impostos

Foram consideradas as alíquotas padrão. Para os impostos diretos foi considerada a alíquota de 1,65% para o PIS e 7,6% para o COFINS totalizando 9,25% de impostos que incidem sobre a receita bruta. O imposto de renda (IR) foi considerado com 25% e a contribuição social sobre o lucro líquido (CSLL) de 9% totalizando 34%.

5.7. Investimentos

Considerou-se um investimento para planta de incineração de R\$ 6.780,00/kW (EPE, 2008). Para uma potência de 35 MW o valor total do investimento para planta de incineração/geração atinge R\$ 237,6 milhões. Para a planta de triagem mecanizada foram considerados investimentos na ordem de R\$ 30 milhões considerando valores divulgados para

construir outras centrais de triagem na cidade de São Paulo. Assim o investimento total é de R\$ 267,6 milhões.

O prazo de construção da planta foi definido em 3 anos. Além dos investimentos de implementação da planta foram considerados investimentos anuais equivalentes à depreciação, para manter o nível de eficiência operacional da planta.

5.8. Estrutura de capital

A estrutura de capital do projeto será 20% capital próprio dos acionistas e 80% de dívida. O financiamento proposto para modelagem é um empréstimo junto ao BNDES denominado BNDES Finem para projetos infraestrutura de geração de energia a partir de fontes renováveis.

O cálculo da taxa de juros desta linha de financiamento é disponibilizado pelo BNDES reproduzido na figura 22.

Figura 22 – Composição da taxa de juros do financiamento

ITENS FINANCIADOS	Empresas		
	Custo financeiro	Remuneração do BNDES	Taxa de risco de crédito
Energia solar >	TLP	0,9% ao ano (a.a.)	Variável conforme risco do cliente e prazos do financiamento
Energia de resíduos sólidos >		1,3% ao ano (a.a.)	
Demais fontes >			

Fonte: (BNDES, 2019)

A TLP (Taxa de Juros de Longo Prazo) considerada foi a de IPCA+1,80%, disponível no site do BNDES para contratos assinados em novembro de 2019. O IPCA considerado foi de 3,29% estimado para 2019 obtido das expectativas de mercado publicadas pelo Banco Central. Considerando que o projeto apresenta um nível de risco baixo, dado que as receitas são previsíveis pois estão atreladas a contratos de destinação com as prefeituras e contratos de venda de energia, foi considerado o valor de 3% para a taxa de risco de crédito. Assim o custo total da dívida ficou em 8,99% ao ano.

A amortização deve ocorrer dentro do limite máximo de 24 anos e o período de carência será de 6 meses após o início da operação em 2023, contando com o prazo de construção estabelecido de 3 anos.

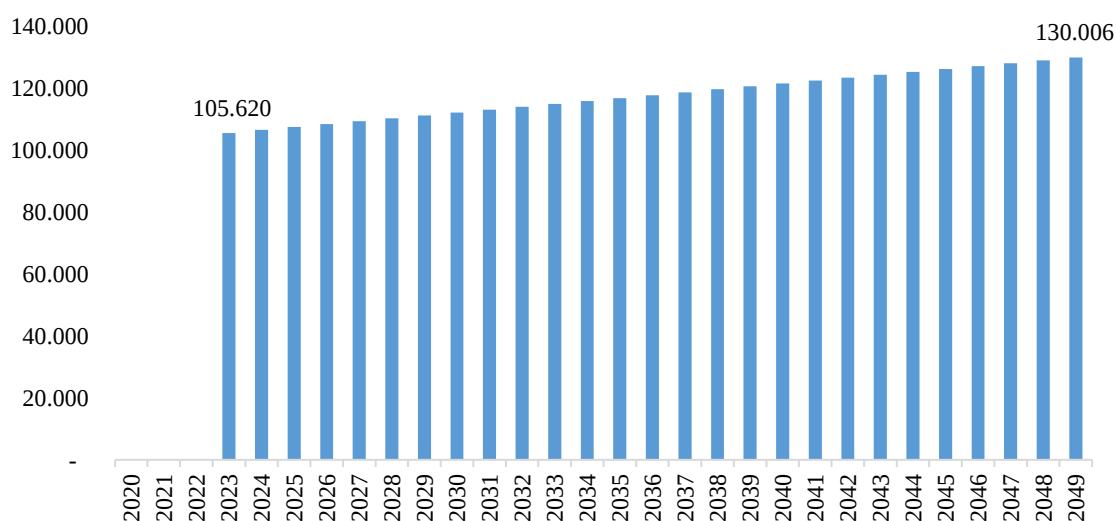
5.9. Taxa de desconto

A taxa de desconto na metodologia de Fluxo de Caixa Descontado representa o custo de oportunidade do investidor. A taxa de desconto considerada foi de 10%, valor utilizado para empreendimentos de termo geração a partir de biomassa (TOLMASQUIM, 2016).

5.10. Principais resultados financeiros

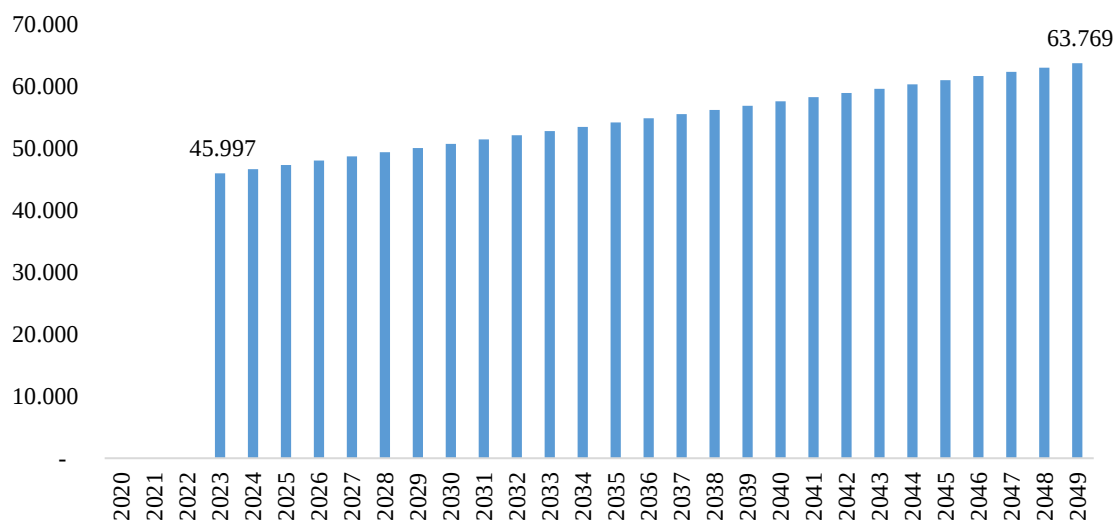
As receitas anuais totalizaram R\$ 105.620 mil para o primeiro ano de operação, terminando no último ano de análise em R\$ 130.006 mil. As receitas com recicláveis e com a venda de energia foram constantes, isso porque, o volume de recicláveis e o preço dos materiais foi considerado constante ao longo do projeto e da mesma forma a energia produzida e o seu preço foram considerados constantes. Já a receita de destinação cresce devido ao aumento da taxa de destinação, assumido como premissa conforme discutido na seção 5.3.1. As receitas com a venda de recicláveis representam 51% do total, seguida pela receita com destinação, 35% e a venda de energia com 14%. A figura 23, a seguir, mostra a evolução das receitas ao longo do horizonte de tempo definido.

Figura 23 – Receitas do projeto



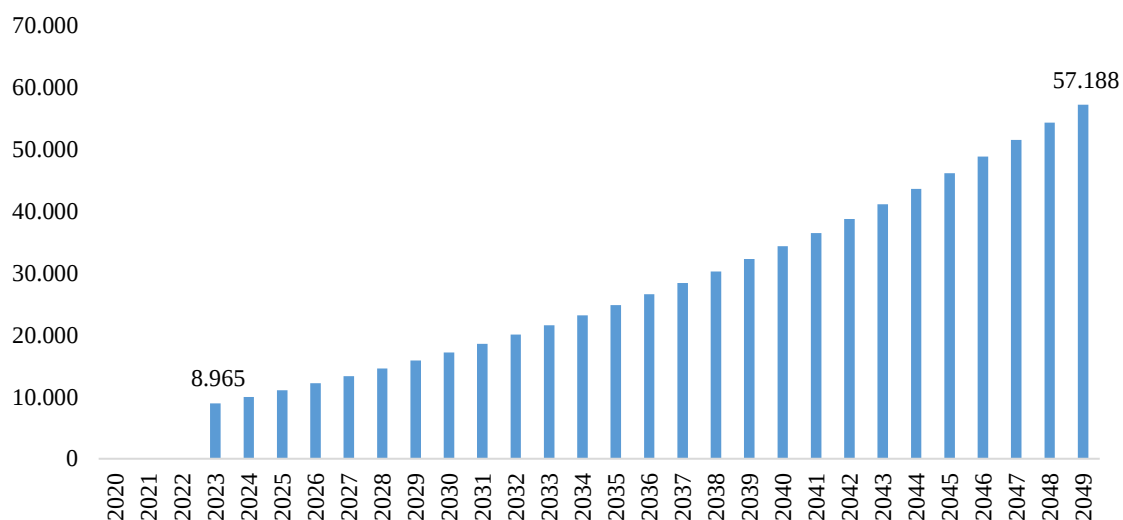
Fonte: elaboração própria

Considerando os custos já descritos chegamos ao lucro antes de juros, impostos, depreciação e amortização (LAJIDA) representado na figura 24, uma métrica muito utilizada por analistas para estimar a geração de caixa de um empreendimento. A margem LAJIDA variou de 44% a 50%. O custo mais relevante que acaba penalizando o grande volume com a venda de recicláveis é o próprio custo de triagem dos materiais que representa mais de 50% dos custos totais.

Figura 24 – Lucro antes dos juros, impostos, depreciação e amortização do projeto

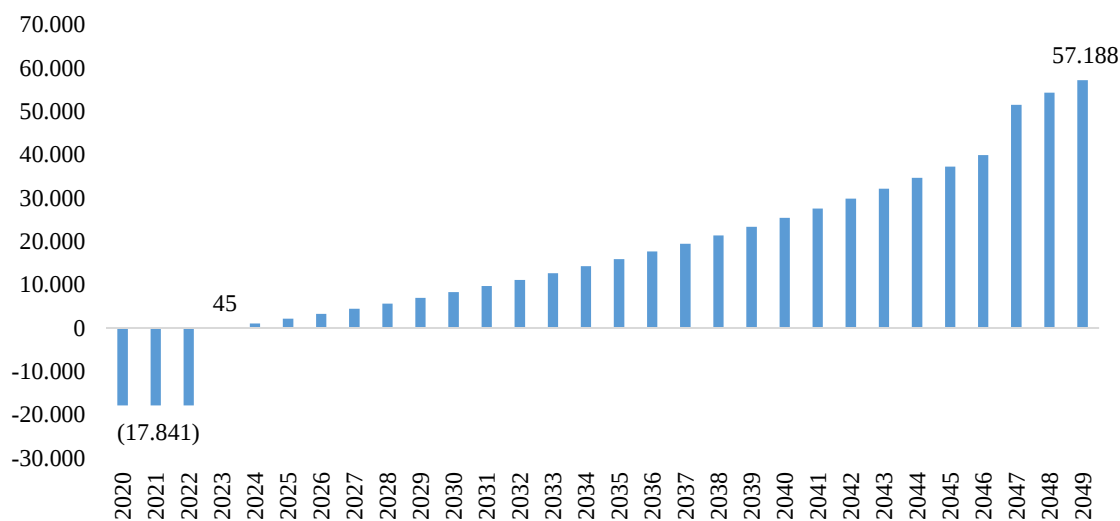
Fonte: elaboração própria

A partir do LAJIDA acrescentando o resultado financeiro líquido (receitas financeiras e despesas financeiras) e a depreciação chegamos ao lucro tributável, ou lucro antes do imposto de renda (LAIR) e após a aplicação da alíquota de IR chegamos ao lucro líquido (Figura 25).

Figura 25 – Lucro líquido

Fonte: elaboração própria

Considerando os fluxos de investimento do projeto, mas com a alavancagem definida em 80%, chegamos ao valor do desembolso dos acionistas de R\$ 17.841 mil nos três primeiros anos chegamos aos fluxos para o cálculo da taxa interna de retorno (TIR) e o valor presente líquido (VPL) do projeto, os fluxos estão representados na figura 26.

Figura 26 – Fluxo de caixa livre do projeto

Fonte: elaboração própria

A TIR implícita aos fluxos no período do projeto foi de 13,84%. O valor presente líquido (VPL), utilizando a taxa de desconto definida no item 5.9 de 10% ao ano foi de R\$ 32.759 mil.

Assim, vemos que o projeto apresenta geração de caixa expressiva, com margem LAJIDA superior a 40%, mas o resultado acaba penalizado pela intensidade de capital do empreendimento que exige investimentos elevados. Assim, o projeto resulta em VPL positivo, mas relativamente baixo quando comparado aos investimentos e taxa interna de retorno (TIR) é atrativa quando comparada à taxa de juros básica da economia atualmente e a outros ativos de risco.

6. CONCLUSÃO

O objetivo deste Trabalho de Formatura é avaliar a viabilidade econômico-financeira do projeto de uma unidade de recuperação energética considerando essa tecnologia como uma nova forma de destinação de resíduos sólidos urbanos (RSU).

Incorporando o conceito de Desenvolvimento Sustentável, o estudo econômico-financeiro mostra que os projetos de unidade de recuperação energética são viáveis do ponto de vista econômico-financeiro e podem ser considerados como alternativas ambientalmente superiores para destinação de resíduos sólidos no Brasil.

O empreendimento apresenta um VPL positivo e uma taxa interna de retorno (TIR) atrativa. Portanto o empreendimento é viável do ponto de vista econômico-financeiro, e tem uma taxa de retorno que torna o investimento em projetos desta natureza competitivos quando comparado a outros investimentos.

A tecnologia analisada foi a incineração, a mais disseminada nos países desenvolvidos. É possível que o emprego de tecnologias mais adequadas ao perfil de geração de resíduos no Brasil, como a gaseificação, aumente a atratividade do ponto de vista financeiro e operacional. Outra forma aumentar a atratividade seria incorporar a venda das reduções certificadas de emissões (RCEs) como fonte de receita.

O estudo possui limitações já que se baseia em estudos bibliográficos que podem não estimar propriamente a realidade brasileira, ou seja, os valores obtidos para custos e investimentos serem maiores na realidade e as receitas menores. Outro fator que insere limitações é o fato deste tipo de solução praticamente inexistir no Brasil, fazendo com que os parâmetros adaptados de outros países tenham baixa representatividade.

O trabalho se concentrou na gestão dos resíduos sólidos e, portanto, não se aprofundou nos aspectos energéticos do tema, como diversificação da matriz, segurança energética e outros benefícios do ponto de vista da geração de energia.

Finalmente o estudo procurou mostrar através de um panorama inicial da situação alarmante do ponto de vista da gestão de resíduos no Brasil que existem alternativas para resolver a questão do lixo no Brasil utilizando tecnologias que obtiveram êxito em muitos países e ainda mais, procurar alternativas regionais que possam melhorar a gestão dos resíduos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.007: Amostragem de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo, 2018.

AGÊNCIA SENADO, 2019. Disponível em: www12.senado.leg.br/emdiscussao/edicoes/pacto-federativo/propostas-1/aprovado-mais-prazo-para-fim-dos-lixoes. Acesso em 11 de novembro de 2019.

ANTHONY R.V. et al., 2003. Recycling, Thermal Treatment and Recovery. In: Ludwig C., Hellweg S., Stucki S. (eds) **Municipal Solid Waste Management**. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 44-127.

ARAFAT, H. A.; JIJAKLI, K. Modeling and comparative assessment of municipal solid waste gasification for energy production Modeling and comparative assessment of municipal solid waste gasification for energy production. **Waste Management**, v. 33, n. 8, p. 1704–1713, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.04.008>.

BANCO CENTRAL, 2019. **Focus - Relatório de Mercado – 25/10/2019**. Disponível em: bcb.gov.br/publicacoes/focus/25102019. Acesso em 30/10/2019.

BRASIL, Constituição, 1988, Capítulo II - DA UNIÃO, Art. 24. Disponível em: planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em 06 de outubro de 2019.

BRASIL, Constituição, 1988, Capítulo IV - DOS MUNICÍPIOS, Art. 30. Disponível em: planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em 06 de outubro de 2019.

BRASIL, 2010. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasil: 2010. Disponível em: planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em 06 de outubro de 2019.

BRASIL, 1998. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, que dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasil: 1998. Disponível em: planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9605.htm. Acesso em 06 de outubro de 2019.

BNDES, 2019. BNDES Finem - Geração de energia. Disponível em: bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finem-energia. Acesso em 05 de novembro de 2019.

CAMPOS, H. K. T. Resources , Conservation and Recycling Recycling in Brazil : Challenges and prospects. “**Resources, Conservation & Recycling**”, v. 85, p. 130–138, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.017>.

CARNEIRO, M. L. N. M.; GOMES, M. S. P. Energy, exergy, environmental and economic analysis of hybrid waste-to-energy plants. **Energy Conversion and Management**, v. 179, n. May 2018, p. 397–417, 2019.

CASTALDI, M.; THEMELIS, N., 2010. The Case for Increasing the Global Capacity for Waste to Energy (WTE). Waste and Biomass Valorization.

CEMPRE - COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM, 2012. Pesquisa Ciclosoft. Disponível em: <http://cempre.org.br/ciclosoft/id/3>. Acesso em 11 de novembro de 2019.

CHENG, H.; HU, Y. Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 3816–3824, 2010.

CODIGNOLE, F. et al. Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil Chamber for Commercialization of Electrical Energy Guarantee Fund for Length of Service National Policy on Solid Waste. **Energy Conversion and Management**, v. 103, p. 321–337, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.074>.

CONKE, L. S.; NASCIMENTO, E. P. do. A coleta seletiva nas pesquisas brasileiras : uma avaliação metodológica. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 10, n. 1, p. 199–212, 2018.

COPENHILL, 2019. Disponível em: <https://www.copenhill.dk/en>. Acesso em 11 de novembro de 2019.

CUCCHIELLA, F.; D’ADAMO, I.; GASTALDI, M. Sustainable waste management: Waste to energy plant as an alternative to landfill. **Energy Conversion and Management**, v. 131, p. 18–31, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.012>.

DALMO, F. C. et al. Energy recovery overview of municipal solid waste in São Paulo State, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 461–474, 2019. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.016>.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2019. Disponível em: <https://www.epa.gov/lmop>. Acesso em 11 de novembro de 2019.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro, 2014.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro, 2014.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS. Rio de Janeiro, 2008.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Informe Resultado da Habilitação Técnica e Vencedores- Leilão A-4 de 2019. Rio de Janeiro, 2019.

FOXX-HAZTEC, 2019. Disponível em: <http://haztec.com.br/solucoes-ambientais-completas/index.php/solucoes/unidades-de-recuperacao-energetica>. Acesso em 11 de novembro de 2019.

GONÇALVES, P. A reciclagem integradora dos aspectos ambientais, sociais e econômicos. Rio de Janeiro: DPA, 2003. 184 p.

GTL ENERGIA, 2019. Disponível em: <http://gtlenergia.com.br/usina-de-lixo-sueradiabatica/>. Acesso em 24 de outubro de 2019.

HARAGUCHI, M.; SIDDIQI, A.; NARAYANAMURTI, V. Stochastic cost-benefit analysis of urban waste-to-energy systems. v. 224, 2019.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Nacional do Saneamento Básico (PNSB). Rio de Janeiro, 2008.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>. Acesso em 11 de novembro de 2019.

KAZA, S.; YAO, L.; BHADA-TATA, P.; VAN WOERDEN, F., 2018. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development Series. Washington, DC: World Bank.

KLINGHOFFER, N.B., CASTALDI, M.J., 2013. Waste to Energy Conversion Technology. Woodhead Publishing Series in Energy.

LA ROVERE, E. L.; COSTA, C. V.; DUBAUX, C. B., 2006. Aterros sanitários no Brasil e o mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL): oportunidade de promoção de desenvolvimento sócio-ambiental. Simpósio Internacional de Tecnologias de Tratamento de Resíduos Sólidos, Rio de Janeiro, Brasil, 24-27 Abril.

LOGA, 2019. Disponível em: <https://www.loga.com.br/content.asp?CP=LOGA&cod=1180>. Acesso em 11 de novembro de 2019.

LUDWIG, C. & STUCKI, S., 2003. Concluding Remarks In: Ludwig C., Hellweg S., Stucki S. (eds) Municipal Solid Waste Management. Springer, Berlin, Heidelberg

MARTINS, G.A., PINTO, R.L. Manual para elaboração de trabalhos acadêmicos. São Paulo. Atlas, 2001. 94 p.

MYHRE G, et al. Anthropogenic and natural radiative forcing, climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. New York: Cambridge University Press; 2013.

OCDE, 2019. Municipal Solid Waste (Indicator). Disponível em: <https://data.oecd.org/waste/municipal-waste.htm>. Acesso em 24 de outubro de 2019.

SÃO PAULO (cidade), 2019. Secretaria Municipal das Subprefeituras. Disponível em: prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/subprefeituras/noticias/?p=284634. Acesso em 11 de novembro de 2019.

SCHLEISS K. et al., 2003. Biological and Bio-Mechanical Processes In: Ludwig C., Hellweg S., Stucki S. (eds) Municipal Solid Waste Management. Springer, Berlin, Heidelberg.

SNIS [Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento]. Disponível em www.snis.gov.br. Acesso em 06 de outubro de 2019.

TOLMASQUIM, M.T. et al. Fontes Renováveis de Energia no Brasil. Rio de Janeiro: Livraria Interciência Editora, 2003.

TOLMASQUIM, M.T. Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear / Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord). – EPE: Rio de Janeiro, 2016

WORREL, E.; REUTER, M.A. Handbook of recycling: state-of-the-art for practitioners, analysts, and scientists. Part I: recycling in context/ Chapter 2: Definitions and Terminology, p. 9-16, 2014.

YOUCAI Z. et al., 2003. Recycling, Waste Disposal: What are the Impacts? In: Ludwig C., Hellweg S., Stucki S. (eds) Municipal Solid Waste Management. Springer, Berlin, Heidelberg.

8. APÊNDICE A – PREMISSAS MACROECONÔMICAS E OPERACIONAIS

			2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Premissas macro										
PIB			2,0%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%
IPCA-A			3,6%	3,8%	3,8%	3,8%	3,8%	3,8%	3,8%	3,8%
SELIC			4,5%	6,5%	6,5%	6,5%	6,5%	6,5%	6,5%	6,5%
Premissas Operacionais										
Massa de resíduos destinada	mil t		-	-	-	340	340	340	340	340
Tarifa de destinação	R\$/t		100	103	106	108	111	114	117	119
Receita com resíduos	mil R\$		-	-	-	36.814	37.752	38.690	39.628	40.566
Massa de recicláveis	mil t		-	-	-	64	64	64	64	64
Massa de plástico	mil t	14%	-	-	-	46	46	46	46	46
Massa de metal	mil t	3%	-	-	-	10	10	10	10	10
Massa de vidro	mil t	2%	-	-	-	8	8	8	8	8
Plástico	R\$/t	1.108	-	-	-	50.864	50.864	50.864	50.864	50.864
Metal	R\$/t	150	-	-	-	1.484	1.484	1.484	1.484	1.484
Vidro	R\$/t	190	-	-	-	1.550	1.550	1.550	1.550	1.550
Receita com recicláveis	mil R\$		-	-	-	53.898	53.898	53.898	53.898	53.898
Massa incinerada	mil t		-	-	-	276	276	276	276	276
Massa de rejeitos da incineração	mil t	10%	-	-	-	28	28	28	28	28
Quantidade de energia gerada	MWh		-	-	-	83	83	83	83	83
Taxa de conversão	MWh/t	30%								
Preço da energia	R\$/MWh	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Receita com venda de energia	mil R\$		-	-	-	14.908	14.908	14.908	14.908	14.908

9. APÊNDICE B – DEMONSTRAÇÃO DE RESUTADO

			2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Demonstração de resultado										
Receita bruta	mil R\$		-	-	-	105.620	106.558	107.496	108.434	109.372
Deduções			-	-	-	(9.506)	(9.590)	(9.675)	(9.759)	(9.843)
Impostos diretos		9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%
Receita líquida			-	-	-	96.114	96.968	97.821	98.675	99.529
Custo de separação	R\$/t	80	-	-	-	(27.200)	(27.200)	(27.200)	(27.200)	(27.200)
Custo de incineração/geração	% do invest	3,5%	-	-	-	(9.367)	(9.367)	(9.367)	(9.367)	(9.367)
Custo de destinação			-	-	-	(2.989)	(3.065)	(3.142)	(3.218)	(3.294)
Despesas administrativas	% da receita	10,0%	-	-	-	(10.562)	(10.656)	(10.750)	(10.843)	(10.937)
LAJIDA			-	-	-	45.997	46.680	47.364	48.047	48.731
<i>mg LAJIDA</i>						44%	44%	44%	44%	45%
(+) Depreciação e Amortização						(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)
Resultado operacional			-	-	-	36.085	36.769	37.452	38.136	38.819
Receitas financeiras			-	-	-	3	73	212	424	712
Despesas financeiras			-	-	-	(22.504)	(21.702)	(20.900)	(20.098)	(19.296)
Lucro tributável			-	-	-	13.584	15.139	16.764	18.462	20.235
Impostos			-	-	-	(4.619)	(5.147)	(5.700)	(6.277)	(6.880)
Alíquota		34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%
Lucro líquido			-	-	-	8.965	9.992	11.064	12.185	13.355
<i>mg Líquida</i>						8%	9%	10%	11%	12%

2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038
110.310	111.248	112.186	113.124	114.062	115.000	115.938	116.875	117.813	118.751	119.689
(9.928)	(10.012)	(10.097)	(10.181)	(10.266)	(10.350)	(10.434)	(10.519)	(10.603)	(10.688)	(10.772)
9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%
100.382	101.236	102.089	102.943	103.796	104.650	105.503	106.357	107.210	108.064	108.917
(27.200)	(27.200)	(27.200)	(27.200)	(27.200)	(27.200)	(27.200)	(27.200)	(27.200)	(27.200)	(27.200)
(9.367)	(9.367)	(9.367)	(9.367)	(9.367)	(9.367)	(9.367)	(9.367)	(9.367)	(9.367)	(9.367)
(3.370)	(3.446)	(3.522)	(3.599)	(3.675)	(3.751)	(3.827)	(3.903)	(3.979)	(4.056)	(4.132)
(11.031)	(11.125)	(11.219)	(11.312)	(11.406)	(11.500)	(11.594)	(11.688)	(11.781)	(11.875)	(11.969)
49.414	50.098	50.782	51.465	52.149	52.832	53.516	54.199	54.883	55.567	56.250
45%	45%	45%	45%	46%	46%	46%	46%	47%	47%	47%
(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)
39.503	40.186	40.870	41.553	42.237	42.921	43.604	44.288	44.971	45.655	46.338
1.080	1.531	2.069	2.697	3.420	4.242	5.168	6.201	7.348	8.612	10.000
(18.494)	(17.692)	(16.890)	(16.088)	(15.286)	(14.484)	(13.682)	(12.880)	(12.079)	(11.277)	(10.475)
22.089	24.025	26.048	28.162	30.371	32.678	35.089	37.608	40.240	42.990	45.864
(7.510)	(8.169)	(8.856)	(9.575)	(10.326)	(11.111)	(11.930)	(12.787)	(13.682)	(14.617)	(15.594)
34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%
14.579	15.857	17.192	18.587	20.045	21.568	23.159	24.822	26.559	28.374	30.270
13%	14%	15%	16%	18%	19%	20%	21%	23%	24%	25%

2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049
120.627	121.565	122.503	123.441	124.379	125.317	126.255	127.193	128.131	129.069	130.006
(10.856)	(10.941)	(11.025)	(11.110)	(11.194)	(11.279)	(11.363)	(11.447)	(11.532)	(11.616)	(11.701)
9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%
109.771	110.624	111.478	112.331	113.185	114.038	114.892	115.745	116.599	117.452	118.306
(27.200)	(27.200)	(27.200)	(27.200)	(27.200)	(27.200)	(27.200)	(27.200)	(27.200)	(27.200)	(27.200)
(9.367)	(9.367)	(9.367)	(9.367)	(9.367)	(9.367)	(9.367)	(9.367)	(9.367)	(9.367)	(9.367)
(4.208)	(4.284)	(4.360)	(4.436)	(4.512)	(4.589)	(4.665)	(4.741)	(4.817)	(4.893)	(4.969)
(12.063)	(12.157)	(12.250)	(12.344)	(12.438)	(12.532)	(12.625)	(12.719)	(12.813)	(12.907)	(13.001)
56.934	57.617	58.301	58.984	59.668	60.351	61.035	61.719	62.402	63.086	63.769
47%	47%	48%	48%	48%	48%	48%	49%	49%	49%	49%
(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)
47.022	47.706	48.389	49.073	49.756	50.440	51.123	51.807	52.491	53.174	53.858
11.516	13.167	14.959	16.897	18.990	21.242	23.662	26.257	29.605	33.133	36.850
(9.673)	(8.871)	(8.069)	(7.267)	(6.465)	(5.663)	(4.861)	(4.059)	(4.059)	(4.059)	(4.059)
48.866	52.002	55.279	58.703	62.281	66.019	69.924	74.005	78.036	82.248	86.649
(16.614)	(17.681)	(18.795)	(19.959)	(21.176)	(22.446)	(23.774)	(25.162)	(26.532)	(27.964)	(29.461)
34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%
32.251	34.321	36.484	38.744	41.105	43.572	46.150	48.843	51.504	54.284	57.188
27%	28%	30%	31%	33%	35%	37%	38%	40%	42%	44%

10. APÊNDICE C – DEMONSTRAÇÃO DE FLUXO DE CAIXA

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Demonstração de fluxo de caixa								
Fluxo de caixa operacional	-	-	-	18.877	19.903	20.976	22.096	23.267
Lucro líquido	-	-	-	8.965	9.992	11.064	12.185	13.355
D&A	-	-	-	9.912	9.912	9.912	9.912	9.912
Fluxo de caixa de investimentos	(89.205)	(89.205)	(89.205)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)
Investimento total	(89.205)	(89.205)	(89.205)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)
Investimentos de manutenção	-	-	-	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)
Investimentos de implementação	267.615	(89.205)	(89.205)	-	-	-	-	-
Fluxo de caixa de financiamentos	89.205	89.205	89.205	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)
Captações	71.364	71.364	71.364	-	-	-	-	-
Amortizações	-	-	-	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)
Aportes do acionista	17.841	17.841	17.841	-	-	-	-	-
Fluxo de caixa livre	-	-	-	45	1.071	2.144	3.264	4.435

2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038
24.490	25.768	27.104	28.499	29.956	31.479	33.071	34.733	36.470	38.285	40.182
14.579	15.857	17.192	18.587	20.045	21.568	23.159	24.822	26.559	28.374	30.270
9.912	9.912	9.912	9.912	9.912	9.912	9.912	9.912	9.912	9.912	9.912
(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)
(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)
(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5.658	6.936	8.271	9.666	11.124	12.647	14.238	15.901	17.638	19.453	21.349

2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049
42.163	44.233	46.396	48.656	51.017	53.484	56.062	58.755	61.415	64.195	67.100
32.251	34.321	36.484	38.744	41.105	43.572	46.150	48.843	51.504	54.284	57.188
9.912	9.912	9.912	9.912	9.912	9.912	9.912	9.912	9.912	9.912	9.912
(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)
(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)
(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)	(9.912)
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	(8.921)	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23.331	25.401	27.564	29.824	32.185	34.652	37.229	39.923	51.504	54.284	57.188