

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIFACVEST
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PATRIK ALENCAR RINTZEL

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE
UMA USINA TERMELÉTRICA A BASE DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS**

LAGES
2019

PATRIK ALENCAR RINTZEL

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE
UMA USINA TERMELÉTRICA A BASE DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS**

Trabalho de conclusão de apresentado
ao Centro Universitário
UNIFACVEST como parte dos
requisitos para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador Prof. MSc. Silvio Moraes
de Oliveira

Coorientadora Prof. Nathielle
Waldrigues Branco

LAGES

2019

Monografia apresentada ao Centro Universitário Facvest – UNIFACVEST, como requisito necessário para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Patrick Alencar Rintzel
NOME DO ALUNO

Revisão Bibliográfica para Implementação de uma
Usina Termelétrica a Base de Resíduos Sólidos
Urbanos.
TÍTULO DO TRABALHO

BANCA EXAMINADORA:

MSc Silvio Moraes de Oliveira
Titulação e nome do Orientador (a)

Nathell W. Branco
Titulação e nome do Co-orientador (a).

Françieli Lima de Sá
Titulação e nome do Avaliador (a).

Françieli Lima de Sá
Coordenador (a) Prof. (a). Titulação e nome da Coordenador (a).

Lages, 10 de julho de 2019.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UMA USINA TERMELÉTRICA A BASE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Patrik Alencar Rintzel¹
Prof. MSc. Silvio Moraes de
Oliveira²
Prof. Nathielle Waldrigues
Branco³

RESUMO

O presente trabalho tem como finalidade demonstrar que o Brasil perde grande capacidade de geração de energia na forma de lixo (resíduos sólidos), com um desperdício abusivo de inúmeras fontes de recursos que são mal aproveitadas e poderiam estar auxiliando em um crescimento mais sustentável ecologicamente. Levando-se isso em consideração, atualmente se tem buscado formas de transformar resíduos sólidos em energia. Como grande parte do lixo brasileiro é armazenado em lixões, que por muitas vezes sequer são legalizados, estudam-se maneiras de reutilizá-lo para geração de energia por meio da queima. A forma abordada no presente trabalho é a de uma termelétrica WTE (Waste to Energy), que visa à geração de energia com o uso do lixo como combustível ao invés de outras fontes como carvão mineral ou gases. Para que essa forma de geração de energia seja aplicada no Brasil, estuda-se sua viabilidade e potencial, analisando modelos já existentes e aplicados em outros países, verificando os benefícios e malefícios que esta tecnologia pode trazer.

Palavras-chave: Sustentável. Resíduo sólido. Energia.

¹ Patrik Alencar Rintzel do Curso de Engenharia Elétrica, Disciplina de TCC II, do Centro Universitário UNIFACVEST.

² Prof. MSc. Silvio Moraes de Oliveira

³ Prof. Nathielle Waldrigues Branco

BIBLIOGRAFIC REVIEW FOR IMPLEMENTATION OF A THERMELETRIC COMPANY BASED ON SOLID URBAN WASTE

Patrik Alencar Rintzel¹
Prof. MSc. Silvio Moraes de
Oliveira²
Prof. Nathielle Waldrigues
Branco³

ABSTRACT

The present paper has the proporse to show Brasil lose capacity of generate eletrical energy with the garbage that was produced (solid residue), and reuse with a better mode to an ecologically sustanable growth. Taking this in considering, in the actuality have been searching for a mode of create energy from the garbage. How a great part of the brazilian trash is stored in landfills, that for many times are not even legalized, as the most quantity of solid residues produced in Brazil is deposited in landfills, that for many occasions is not legalized, and it could br produced electrical energy with principle of a thermoelectric. This kind of thermoelectric is called as WTE (Waste to Energy), a generating unit that use solid residues and the gases produced by them as fuel instead coal or any gases that need some process to be created. To prove these kind of energy produce benefits, will be analyzed existents models and the viability that it could bring.

Key words:Sustainable. Solid Residue. Energy.

¹ Patrik Alencar Rintzel of Electrical Engineering Course, of discipline TCC II, of Centro Universitário UNIFACVEST.

² Prof. MSc. Silvio Moraes de Oliveira

³ Prof. Nathielle Waldrigues Branco

Lista de abreviaturas e siglas

CG – Custo de geração;

GN- Gás natural;

ICB – Índice de custo benefício;

PCI – Poder calorífico inferior;

RCD – Resíduo de construção e demolição;

RS – Resíduos sólidos;

RSM – Resíduos sólidos municipais;

RSS – Resíduos de serviço de saúde;

RSU – Resíduos sólidos urbanos;

TIR – Taxa interna de retorno;

UTH – Usina termelétrica híbrida;

VPL – Valor presente líquido;

WTE – Waste To Energy (Lixo para Energia).

Lista de equações

- (1) Coeficiente de depreciação;
- (2) Depreciação Linear;
- (3) Custo dos pneus por km;
- (4) Cálculo da exergia;
- (5) Eficiência exergética;
- (6) Eficiência ecológica;
- (7) Atualização dos custos e investimento total.

Lista de Figuras

Figura 1 – Composição de um aterro sanitário;

Figura 2 – Manual de gerenciamento integrado;

Figura 3 – Esquema de usina de incineração de resíduos sólidos com recuperação de energia;

Figura 4 – Incinerador RSM grelha bruto, WTE;

Figura 5 – Incinerador de câmaras múltiplas;

Figura 6 – Incinerador de Leito Fluidizado;

Figura 7 – Sistema de turbina a gás conectada à caldeira de recuperação;

Figura 8 – Sistema utilizado pela WTE Zabalgardi, Bilbao (Espanha);

Figura 9 – Análise do ciclo a gás;

Figura 10 – Ciclo a vapor do sistema.

Lista de Gráficos

Gráfico 1 – Gráfico da disposição ideal feita com o lixo;

Gráfico 2 – Gráfico obtido através das respostas da pesquisa em redes sociais;

Gráfico 3 – Destinação do lixo de acordo com Abrelpe;

Gráfico 4 – Emissão Anual de metano na atmosfera;

Gráfico 5 – Comparação de investimentos da usina WTE estudada por Carneiro e Zabargarbi.

Lista de Quadros

Quadro 1 – Quantidade de RSU coletado por Regiões e Brasil;

Quadro 2 – Quantidade coletada de RCD pelos municípios no Brasil;

Quadro 3 – Coeficientes de depreciação por ano;

Quadro 4 – Depreciação de acordo com idade do veículo;

Quadro 5 – Destino dos resíduos sólidos urbanos;

Quadro 6 – Exergias de fluxo do ciclo a gás;

Quadro 7 – Exergias de fluxo do ciclo a vapor;

Quadro 8 – Percentuais mássicos a serem destinados em aterros;

Quadro 9 – Propriedades e parâmetros do ciclo a gás obtidos a partir de literatura;

Quadro 10 – Propriedades do ciclo a vapor da usina WTE de Zabargarbi;

Quadro 11 – Energia gerada e Eficiência térmica.

Quadro 12 – Potências exergéticas.

Quadro 15 – Comparação de parâmetros da usina Zabargarbi e o modelo estudado por Carneiro.

Quadro 16 – Custo CG;

Quadro 17 – Comparação de gastos com coleta e processamento dos RSU do estudo de Carneiro;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. Objetivos.....	14
1.1.1. Objetivos gerais	14
1.1.2. Objetivos específicos	14
1.2. Justificativa.....	14
1.3. Metodologia.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. Aspectos culturais.....	16
2.2. Aspectos financeiros de coleta e transporte de resíduos sólidos	26
2.2.1. Planejamento.....	26
2.2.2. Custos fixos.....	28
2.2.3. Custos variáveis	31
2.3. Plantas termelétricas	33
2.4. Caracterização dos RSM e RSS.....	33
2.4.1. Incineração de RSM.....	34
2.4.2. Planejamento para uma unidade de incineração	37
2.5. Funcionamento de uma WTE.....	37
2.5.1. Combustão grelha	37
2.5.2. Incinerador câmaras múltiplas	41
2.5.3. Incineradores de leito fluidizado.....	43
2.6. Análise energética e exergética	44
2.6.1. Descrição de uma planta termelétrica	45
2.6.2. 1ª Lei da termodinâmica – análise energética.....	46
2.6.3. Ciclo a gás.....	47
2.6.4. Ciclo a vapor.....	48
2.6.5. Análise exergética do sistema.....	49

2.6.6.	Análise termoeconômica do sistema.....	51
2.6.7.	Métodos de análise econômica de projetos.....	52
3.	DESCRIÇÃO DOS MODELOS DE WTE	57
3.1.	Usina WTE de Zabalgardi	57
3.2.	WTE proposta por Carneiro	58
4.	CONCLUSÃO.....	63
	REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o desenvolvimento energético e a busca por novas fontes de energia vêm crescendo drasticamente, buscam-se hoje energias renováveis e limpas.

Para desenvolvimento de um país, o setor energético é parte fundamental, visando usar os recursos disponíveis sem que haja grandes desperdícios, procura-se estudar formas de geração de energia renováveis. Uma dessas formas é o *waste to energy (WTE)* do inglês, que significa lixo para energia, é uma forma de gerar energia utilizando o próprio lixo como combustível.

Formas de energia renováveis vêm crescendo desde a década de 90, a fim de obter meios que não degradem o meio ambiente, e de fornecer energia limpa para a população.

Algumas formas vêm se destacando nesse mercado, uma delas como exemplo é a biomassa. A biomassa é definida como qualquer material de origem animal ou vegetal, ou seja, de origem orgânica que pode vir a ser utilizada para produção de calor e desta produzir eletricidade.

Para evitar desperdícios vindos de outras áreas, o lixo se tornou uma possibilidade de geração de energia elétrica. Utilizando o modelo semelhante ao de uma termelétrica, através da queima viu-se a possibilidade de utilizar o lixo como “combustível” e mostrou-se um processo com mais vantagens do que desvantagens.

Muitos países buscam evitar a má administração de seus resíduos, acabam adotando essa forma para reforçar sua produção de energia e evitar com que áreas fossem transformadas em aterros, reaproveitando os resíduos sólidos e dando utilidades a ele. No Brasil infelizmente isso ainda é uma novidade, onde somente uma pequena parte do lixo é reaproveitada.

A WTE é uma forma de recuperar a energia dos resíduos sólidos, além da geração de energia elétrica, com esse processo também possibilita a produção de outros combustíveis, como o metano, metanol, etanol e outros sintéticos.

A incineração nas WTE auxilia no reaproveitamento do lixo para geração da energia elétrica e diminui de 70% a 90% do volume do lixo com a queima, dependendo do material. Possibilita que suas cinzas sejam reaproveitadas em diversos setores. Há pesquisas que visam implementar as cinzas na construção civil, tentando diminuir a

quantidade de areia no preparo da argamassa, como também na recuperação de áreas desmatadas como adubo.

Novas usinas projetadas devem atender os padrões de emissão de gases, sendo assim as novas usinas implementadas devem ser diferentes das antigas, possibilitando maior rendimento e aproveitamento do poder calorífico para a geração de energia.

De acordo com pesquisas, o Brasil se mostra um dos maiores produtores de lixo do mundo, ficando entre os 5 maiores de acordo com diversos pesquisadores, o Brasil estava ocupando a terceira posição mundial, ficando atrás apenas da China e dos Estados Unidos.

São geradas aproximadamente 220 mil toneladas por dia, onde aproximadamente 58% do lixo recebe “destinação adequada” e outros 42% vão para “aterros controlados” espalhados pelo país, porém apenas 3% de todo o lixo produzido no Brasil é reaproveitado.

A queima dentro de uma WTE auxilia com a destruição de inúmeras substâncias tóxicas além de compostos biodegradáveis que estariam decompondo à céu aberto, liberando gases como metano que contribui com o efeito estufa.

Existem diversas organizações que são contrárias a implementação dessa tecnologia, pois com a incineração dos resíduos, ocorre a liberação de inúmeros gases que são prejudiciais tanto para a saúde humana como para o meio ambiente

O estudo do modelo de uma termelétrica WTE se mostra relevante ao mostrar resultados positivos, ao utilizar a matéria que seria descartada de forma inadequada para a geração de energia, e reutilização dos restos da incineração, as cinzas demonstram uma solução para os problemas enfrentados com o lixo urbano, além de ser uma forma de energia renovável.

Devido à políticas aplicadas no e as leis de Resíduos Sólidos (lei nº 12.305, 2 de agosto de 2010) faz com que os municípios tenham que regulamentar a destinação dada ao lixo, adotando maneiras ambientais e socialmente corretas.

Para isso tem-se como objetivo mostrar a efetividade de uma usina termelétrica que utiliza lixo urbano para a geração de energia elétrica, buscando uma forma renovável que venha a diminuir desperdícios e aproveitar melhor os recursos disponíveis. Além de contribuir para a reeducação ambiental.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivos gerais

O Brasil possui um grande potencial de geração de energia, seja hidrográfica, eólica ou solar. São as fontes de energias renováveis que vem crescendo para um desenvolvimento sustentável e ecológico.

Com isso em mente deseja-se mostrar um modelo de geração de energia alternativo, que ajude a solucionar problemas com a locação e processos que se dão aos resíduos sólidos urbanos. Estudar modelos adotados em outros países, o funcionamento de uma WTE e a viabilidade de implantação.

1.1.2. Objetivos específicos

- Explicar o funcionamento de uma usina WTE;
- Mostrar o atual sistema adotado para coleta e disposição do lixo;
- Processos dos ciclos para geração de energia elétrica;
- Exemplificar investimentos necessários;
- Comparar modelos existentes;

1.2. Justificativa

Verificou-se por meio deste trabalho, a oportunidade de explorar recursos que são despejados na natureza inadequadamente para a geração de energia. São recursos que estão apenas gerando poluição no meio ambiente e prejudicando não somente áreas como também a saúde de pessoas próximas a locais com problemas de saneamento e coleta de lixo, a ideia é mostrar uma alternativa de investimento com retorno e sustentabilidade.

Com isso em mente, deseja-se apresentar uma forma que solucione os problemas de má administração destes materiais visando implantar uma usina termelétrica que utilize os resíduos sólidos urbanos para a geração de energia elétrica, desenvolvendo assim o sistema renovável de geração e sanar problemas como a locação de espaço para depósito e as formas inadequadas de lidar com o lixo.

1.3. Metodologia

Para a execução do trabalho será feito uma revisão bibliográfica de artigos internacionais e nacionais que falam sobre o estudo e funcionamento das WTE's. Deseja-se com isso apresentar modelos já pesquisados por outros autores e mostrar através disso a viabilidade de implantação dessa tecnologia no país.

Os modelos e propostas apresentados nesse trabalho são de outros autores, demonstrando que é possível reutilizar diversos recursos que atualmente não tomam fins devidos ou que acabam não tendo uso do seu potencial.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aspectos culturais

Como uma usina WTE tem como objetivo reaproveitar resíduos sólidos urbanos, que não recebem os devidos cuidados de administração e auxiliar em um crescimento sustentável da sociedade, torna-se necessário saber um pouco mais sobre os problemas que esses materiais podem causar desde que não tenham o cuidado necessário.

Pelo fato de viver-se numa sociedade que trabalha em uma velocidade surpreendente faz-se muito o uso de produtos industrializados.

Muitas alterações na cultura dão-se pelo tempo, hábitos criados que com a poluição causam a mudança da paisagem e o ecossistema.

[...] as alterações ambientais ocorrem por inúmeras causas, muitas denominadas naturais e outras oriundas de intervenções antropológicas, consideradas não naturais. É fato que o desenvolvimento tecnológico contemporâneo e as culturas das comunidades têm contribuído para que essas alterações no e do ambiente se intensifiquem, especialmente no ambiente urbano. (BELLINI; MUCELIN, 2008, pg 112).

De acordo com uma matéria citada no site da Akatu (2019), onde incentivam o consumo consciente para um futuro sustentável, o Brasil passou a ser o quarto maior gerador de resíduos sólidos do mundo todo, sendo produzida uma quantidade aproximada de 79,9 milhões de toneladas.

Segundo a Abrelpe (2017), cerca de 1692 cidades não têm iniciativas na área, e que esse número vinha caindo. Um dos principais fatores da falta de desenvolvimento das coletas seletivas deve-se a falta de recursos dos municípios e falta de aderência por parte da população.

Um dos grandes problemas é a falta de conhecimento sobre problemas causados pela eliminação adequada do lixo urbano. Isso é um hábito criado devido à falta de orientação na vida das pessoas, gerando assim um indivíduo irresponsável sobre assuntos ambientais.

A má administração destes recursos leva a contaminação do solo, água, e do ar, além de gerarem uma fonte de alimento fácil para animais como roedores, insetos, aranhas entre outras espécies que podem gerar doenças aos humanos, além de prejudicar imensamente o habitat natural de diversas espécies.

Como citado por Bellini e Mucelin (2008).

Entre os impactos ambientais negativos que podem ser originados a partir do lixo urbano produzido estão os efeitos decorrentes da prática de disposição inadequada de resíduos sólidos em fundos de vale, às margens de ruas ou cursos d'água. Essas práticas habituais podem provocar, entre outras coisas, contaminação de corpos d'água, assoreamento, enchentes, proliferação de vetores transmissores de doenças, tais como cães, gatos, ratos, baratas, moscas, vermes, entre outros. Some-se a isso a poluição visual, mau cheiro e contaminação do ambiente. (BELLINI; MUCELIN, 2008, pg 113).

Apesar de um fato visível, é um fenômeno que se passa imperceptível aos olhos da sociedade, vê-se reclamações em todos lugares sobre a má disposição e gerenciamento do lixo, mas devido à outras ocorrências diárias fazem com que a sociedade não tenha consciência em si sobre esses hábitos.

As atividades cotidianas condicionam o morador urbano a observar determinados fragmentos do ambiente e não perceber situações com graves impactos ambientais condenáveis. Casos de agressões ambientais como poluição visual e disposição inadequada de lixo refletem hábitos cotidianos em que o observador é compelido a conceber tais situações como “normais”. (BELLINI; MUCELIN, 2008, pg 114).

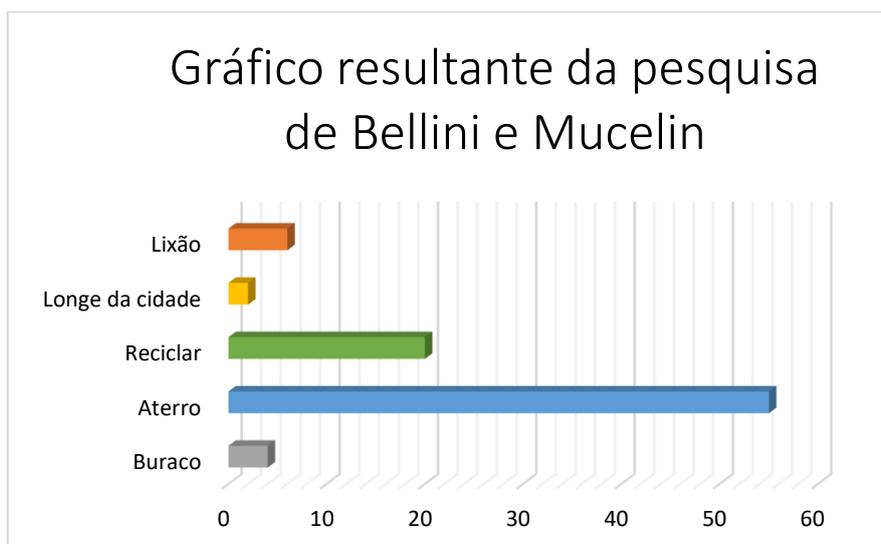
De acordo com pesquisas geridas por Bellini e Mucelin (2008), de 88 entrevistados apenas um disse não saber o fim que o lixo urbano tomava. Porém os outros demais entrevistados tinham opiniões sobre quais eram os melhores fins, lugares ou procedimentos a serem tomadas com os resíduos sólidos urbanos.

O Gráfico 1 apresenta a disposição final obtida da pesquisa feita por Bellini e Mucelin.

Infelizmente vê-se um campo ruim para a realização da reciclagem no país, muitos dos entrevistados por Bellini e Mucelin (2008) tentaram, porém, desistiram no momento quando notaram que o lixo reciclável tomava o mesmo fim que o lixo não reciclável.

É interessante também o fato da grande maioria dos entrevistados, crer que o aterro sanitário seria a melhor destinação ao lixo, um local onde apresenta inúmeros problemas. Isso é apenas um sinal que demonstra falta de informação da população, inclusive de acadêmicos formandos de diversas áreas.

Gráfico 1 – Gráfico da disposição ideal feita com o lixo.



Fonte: Adaptado de lixo e impactos ambientais perceptíveis no ecossistema urbano, BELLINI, MUCELIN (2008).

Porém, como é citado por OLIVEIRA e ROSA.

Definimos reciclar como um ganho de eficiência devido ao menor consumo de recursos naturais pela indústria, otimizando áreas com fins de depósito de lixo ou conservação de energia. Em contraste, a transformação é destinada a obter produtos competitivos – apesar do custo elevado de processamento – devido ao baixo custo da matéria-prima. Isso reduz a demanda por locais de armazenamento de lixo enquanto diminui a proliferação de doenças causada pelo lixo, além de cortar gastos com limpeza. (OLIVEIRA; ROSA, 2003, pg 1482, tradução nossa).¹

Através de pesquisa em redes sociais realizada pelo autor, utilizando a plataforma do *Google Forms*, obtiveram informações demonstrando que muitas pessoas desconhecem a maneira correta de separação do lixo, confirmando que a educação sobre o assunto é extremamente falha.

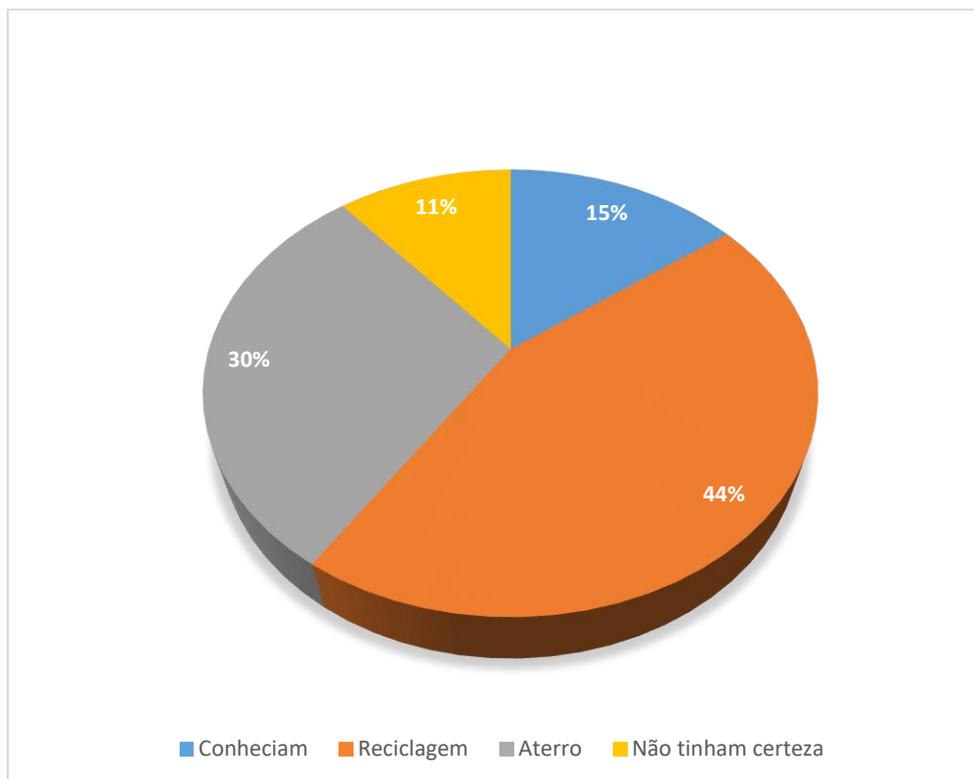
Um ponto em comum, notado através do resultado enquete e pelos entrevistados de Bellini e Mucelin (2008), foi que poucas pessoas conhecem ou sabem da possibilidade de gerar energia utilizando os resíduos sólidos urbanos (RSU's) como combustível.

Dos que responderam à pesquisa em redes sociais, apenas 4 dentre os 27 conheciam sobre a possibilidade de gerar energia a partir da incineração dos RSU's. Doze

¹ We define recycling as a gain in efficiency due to either lower consumption of natural resources by industry, optimizing the areas set aside for garbage dumps, or through energy conservation. In contrast, transformation is designed to obtain products that are competitive—despite higher processing costs—due to negative raw material costs. This curtails the demand for garbage dump sites while lessening the proliferation of diseases caused by rubbish, in addition to cutting clean-up costs.

dos que responderam o questionário acreditavam que a melhor medida a ser adotada é a reciclagem, 8 pessoas acreditavam que o aterro seria a melhor forma de lidar e três pessoas não tinham conhecimento de qual a melhor providência ser tomada, como demonstrado no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Gráfico obtido através das respostas da pesquisa em redes sociais.



Fonte: Gráfico criado a partir dos dados obtidos pela enquete.

O princípio de uma WTE onde prevê a queima dos resíduos sólidos urbanos geraria pontos positivos.

Os benefícios de separação após a coleta podem ser aumentados por sistemas de separação seletivos, que separa esses resíduos. O sucesso da seletividade de coleta para reciclagem também estimula a transformação de biomassa constituída por restos de alimentos, utilizada como combustível. (OLIVEIRA; ROSA, 2003, pg 1483, tradução nossa).²

Com isso em mente, sabendo os níveis de educação sobre esse assunto, seria interessante criar um planejamento e formular um plano de conscientização, ensinando nas escolas de uma forma didática e interativa as formas de cuidados básicos que

² The benefits of post-collection garbage separation can be increased through selective garbage collection systems that separate these solid wastes source. The success of selective garbage collection schemes for recycling also spurs the transformation of biomass consisting of food wastes, used particularly as fuel.

poderiam ser feitos em casa, como as famílias atuais são constituídas por pessoas mais jovens e suscetíveis a aceitar o aprendizado de seus filhos.

Por esta tecnologia ser nova para o Brasil, abre um novo leque nas opções de geração de energia sustentável, gerando benefícios para o meio ambiente e para a sociedade local onde implantado, criando empregos e melhorando a qualidade de vida das pessoas. Sabendo disso pode-se criar diversas estratégias para coleta, separação, distribuição e geração de energia para criação de empregos.

São muitos os problemas causados pela má administração dos resíduos sólidos urbanos, se despejados sem os devidos cuidados na natureza, agrava em impactos no ecossistema.

O Brasil por ter uma faixa extensa de terra, utiliza os aterros sanitários como principal maneira de descarte dos resíduos sólidos urbanos, por ser a maneira fácil de aplicar.

É importante definir alguns aspectos sobre a estrutura de um aterro (ideal) para melhor compreensão do tópico abordado.

Os aterros são geralmente cercados por áreas verdes, com uma média de 50 metros de vegetação ao seu redor, geralmente construídos longe de grandes centros urbanos. Para a construção deve-se primeiramente cavar um buraco no solo, que não ultrapasse 2 metros de distância do lençol freático, após acrescenta-se uma manta de polietileno e camada de pedras pequenas para que os líquidos e gases liberados pela compostagem possam escoar para calhas de concreto e tubos verticais, onde alguns dos gases são liberados na atmosfera e outros recolhidos.

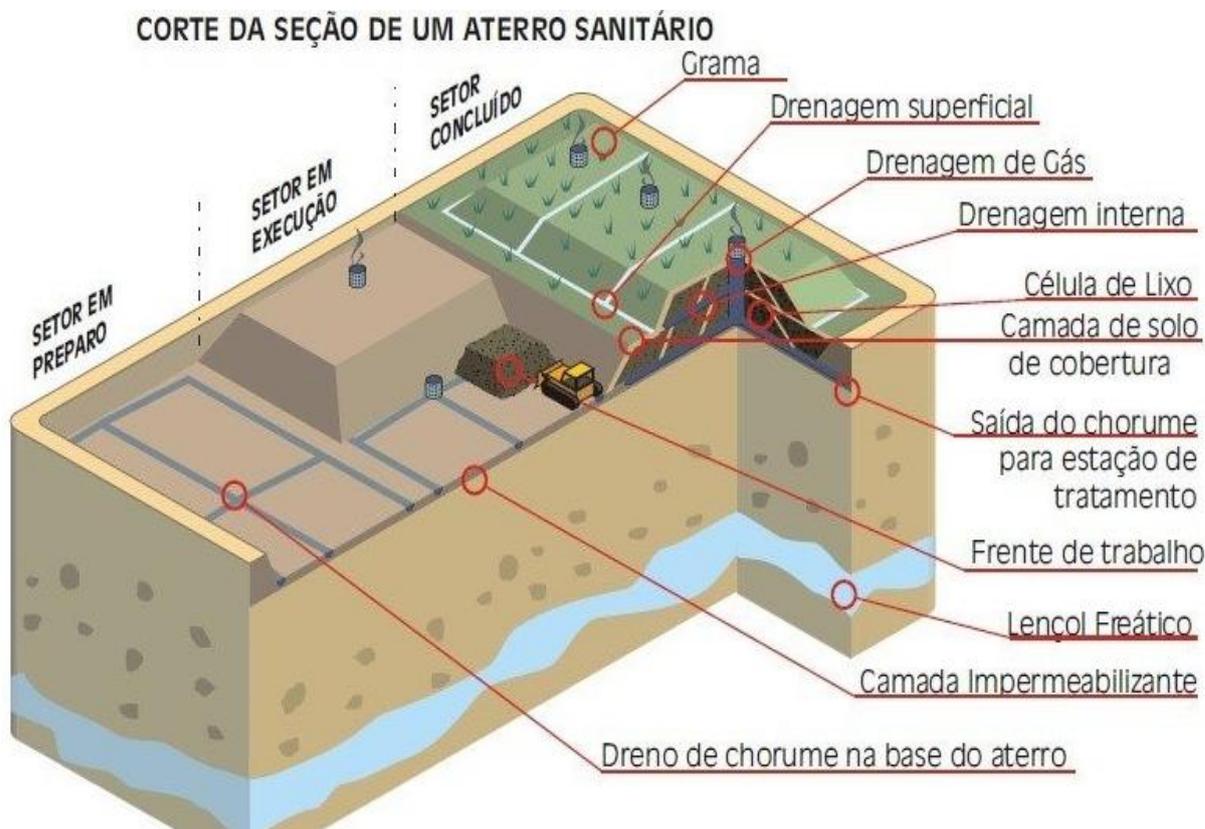
Para o bom funcionamento de um aterro, permite-se um limite máximo de lixo depositado nele, após atingir esse limite deve-se encerrar as atividades no local. Como demonstrado na Figura 1, um esquema de aterro.

O lixo depositado em aterros chega a 99% de todo o lixo produzido no país, sendo apenas 1 a 3% reciclado. Como demonstra o Gráfico 3, obtido a partir dos dados da Abrelpe.

Apesar do lixo ser destinado aos aterros, a Abrelpe (2017), alega que ainda 7 milhões de toneladas não foram coletadas no ano de 2017, ou seja, tiveram um fim desconhecido. A geração de resíduos sólidos urbanos em 2017 foi de aproximadamente

78,4 milhões de toneladas, sendo que a coleta atingiu apenas 91,2% de sua totalidade, ou seja, 8,8% de todo lixo produzido no Brasil não foi coletado, por volta de 6,9 milhões de toneladas.

Figura 1 – Composição de um aterro sanitário.



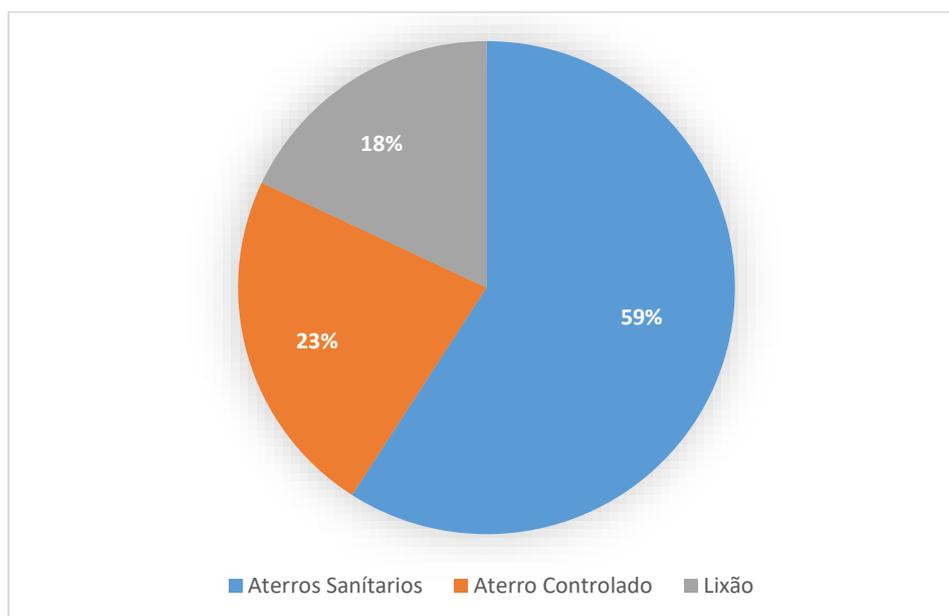
Fonte: Portal Resíduos Sólidos.

Outro problema de acordo com o panorama da Abrelpe (2017), é que 40,9% do que é coletado é descartado incorretamente, está a qual é mandada para lixões ou aterros controlados. Chamam-se assim pois são sistemas sem as proteções adequadas ao solo e águas próximas.

Nos últimos anos o Brasil apresentou um aumento na produção de RSU's, de acordo com a geração de RSU nos anos de 2016 e 2017, houve um crescimento de 0,48% no país todo, chegando a uma produção de 214,868 toneladas por dia. O Quadro 1 apresentam os resultados da pesquisa feita pela Abrelpe (2017).

O Quadro 2 apresenta os dados referentes aos RCD's (Resíduos de construção e demolição), que demonstrou uma diminuição no ano de 2017 em relação à 2016.

Gráfico 3 – Destinação do lixo de acordo com Abrelpe.



Fonte: Adaptado Panorama dos Resíduos Sólidos 2017-Abrelpe

Quadro 1 – Quantidade de RSU coletado por Regiões e Brasil.

REGIÃO	2016	2017
	RSU (t/dia)	RCD (t/dia)
NORTE	12.500	12.705
NORDESTE	43.555	43.871
CENTRO-OESTE	14.175	14.406
SUDESTE	102.620	103.741
SUL	20.987	21.327
BRASIL	193.637	196.050

Fonte: Adaptado panorama Abrelpe.

Quadro 2 – Quantidade coletada de RCD pelos municípios no Brasil.

REGIÃO	2016	2017	
	RCD (t/dia)	RCD (t/dia)	índice
BRASIL	123.619	123.421	0.594

Fonte: Adaptado panorama Abrelpe.

O panorama da Abrelpe (2017), apresenta sobre os resíduos de serviços de saúde (RSS).

Os resultados da pesquisa permitiram concluir que, em 2017, 4.518 municípios prestaram os serviços de coleta, tratamento e disposição final de 256.941 toneladas de RSS, o equivalente a 1,2 kg por habitante/ano. O dado atual representa uma diminuição na geração de 0,04% em relação ao total gerado em 2016, e queda de 0,8% no índice per capita. De acordo com dados fornecidos pelas empresas do setor, a capacidade instalada em equipamentos para tratamento de RSS por diferentes tecnologias aumentou e alcançou 1.007,3 toneladas diárias. (ABRELPE, 2017. Pg 48).

De acordo com o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), na resolução N° 358/2005. Classifica o RSS em cinco grupos distintos, sendo eles:

- **GRUPO A:** Resíduos que apresentam agentes biológicos e podem apresentar riscos de infecção.
- **GRUPO B:** Resíduos que contenham substâncias químicas, como inflamabilidade, corrosividade, reatividade e toxicidade, podem causar riscos à saúde pública ou ambiental.
- **GRUPO C:** Materiais que contenham radionuclídeos em quantidades superiores aos limites especificados na norma Nuclear-CNEN.
- **GRUPO D:** Resíduos sem risco biológico, químico ou radiológico à saúde ou meio ambiente.
- **GRUPO E:** Materiais perfurocortantes ou escarificastes.

Para os materiais que necessitem tratamento especiais, devem ser separados e tomados os devidos cuidados, agora para resíduos como do grupo D, que se equiparam aos resíduos residenciais, também podem ser utilizados para a geração de energia.

Um dado interessante, segundo coluna da G1, é que existem aproximadamente 1,5 mil unidades de incineração de resíduos sólidos para gerar energia ou calor no mundo. E ainda que não esteja superada a discussão que envolve a emissão de substâncias nocivas, cujo as quais são geradas pela queima do lixo. Em países que a queima de resíduos sólidos urbanos é liberada, a queima é feita mantendo a temperatura acima dos 900°C para eliminar o risco de contaminação dos RSS.

Alguns países com políticas ecológicas mais firmes, como por exemplo a Alemanha, requerem tecnologias que assegurem a qualidade dos gases emitidos.

A matéria orgânica descartada nos aterros, leva em média seis meses para compostagem, onde ocorre a liberação do chorume. Como está sempre presente no processo e pode obter-se um aproveitamento energético da produção do metano, é importante deixar claro algumas informações sobre o mesmo.

O gás metano é produzido em diversos setores, como pecuária, minas de carvão, minas de petróleo, agricultura e dos resíduos orgânicos produzidos nos polos urbanos, sabendo disso, uma das maneiras de se controlar é através de queima.

Gráfico 4 – Emissão Anual de metano na atmosfera.



Fonte: Adaptado Instituto Max Planck de Física Nuclear.

Para a atmosfera, a simples queima do gás, mesmo sem aproveitamento energético, já beneficia o meio ambiente, pois transforma o CH_4 em CO_2 . Sendo que o metano é aproximadamente 20 vezes mais prejudicial que o dióxido de carbono (CO_2). O metano tem como efeito negativo, a contribuição para o aquecimento global.

Ao ser inalado pode causar asfixia e perda de consciência, parada cardíaca e em alguns casos até mesmo prejudicar o sistema nervoso central.

Existem programas de incentivo para o tratamento do metano, um deles chamado de crédito de carbono, que é quando uma certificadora da ONU mede a quantidade de carbono queimada e converte para um valor de mercado para os países ricos que

participam do Protocolo de Kyoto, e assumiram compromisso de reduzir a emissão desse gás.

Os créditos de carbono são unidades de medidas, correspondentes a uma tonelada de dióxido de carbono (t CO₂e). Isso é utilizado para calcular a redução da emissão dos gases causadores do efeito estufa. Países que tem protocolos de redução desses gases recebem a certificação que contam como créditos de carbono, que podem ser negociados com países que não reduziram as emissões desses gases (metano, ozônio, etc) (eCycle 2010/2019).

Com base nesses dados é possível visualizar mais um ponto positivo de ter usinas que utilizem, também, o gás metano como fonte de queima para geração como reaproveitamento energético.

Além do benefício da queima do gás, tem-se pela queima do lixo, pois além da diminuição da chance de contaminação, a redução do metano na atmosfera, reaproveitamento energético, se reduz o volume ocupado, aproximadamente 70% a 90% do volume do lixo, podendo reaproveitar as cinzas para a construção de rodovias, e se for de matéria puramente orgânica, para revitalização de áreas degradadas.

Para a produção do pavimento (estrutura composta por camadas de materiais compactos), a cinza é utilizada no revestimento, onde é destinada a melhorar a superfície de rolamento construída que recebe diretamente a ação do tráfego (BARROS e MELLO, 2017).

A cinza vegetal contém cálcio, magnésio, fósforo, além de outros elementos utilizados no desenvolvimento das plantas. Também apresentam micronutrientes essenciais para o desenvolvimento dos seres vivos, como Zn, Mg Fe, Cu e B (DAROLT e OSAKI, 1991).

Dito isso, vê-se que o sistema de uma WTE apresenta mais pontos positivos ao reutilizar os resíduos sólidos na queima, além da possibilidade de reutilizar os gases naturais e permitir fazer o controle deles, também reaproveita os resquícios, como as cinzas, em diversos setores.

2.2. Aspectos financeiros de coleta e transporte de resíduos sólidos

Essa parte do trabalho tem como objetivo apresentar aspectos os financeiros, por exemplo, gastos de coleta, eficiência ecológica, custo aproximado de equipamentos e da produção de energia elétrica considerando a eficiência ecológica.

2.2.1. Planejamento

Deve-se planejar um modelo de gerenciamento dos RSU para controlar as ações tomadas em relação a coleta. É de suma importância fazer um diagnóstico da situação para criação de um bom modelo de gerenciamento, sabendo da dimensão dos problemas, prognósticos para o futuro e recursos necessários para o trabalho e a ser realizado (CEMPRE, 2018).

As ações prioritárias para os modelos de gerenciamento do lixo devem ser:

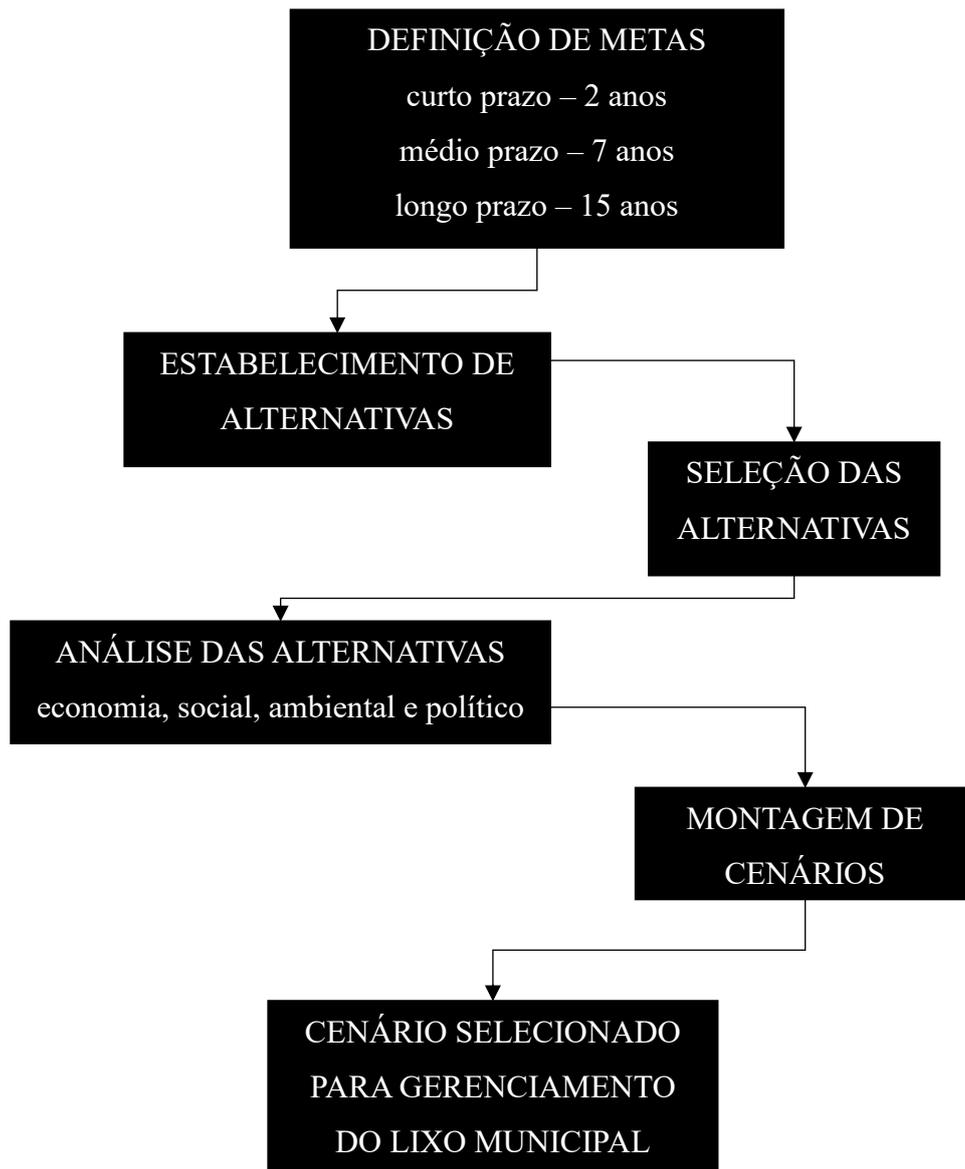
- Coletar todo o lixo gerado de responsabilidade da prefeitura;
- Dar um destino adequado para todo lixo;
- Buscar formas de segregação e tratamento para o lixo do seu município;
- Fazer campanhas e implantar programas voltados à sensibilização e conscientização da população;
- Incentivar medidas que visem diminuir a geração de lixo;

No caso de implantação de uma WTE, seria o local adequado para depósito do RSU, e assim utilizar seus recursos, para definir um modelo de gerenciamento, como mostra na Figura 2.

O desenvolvimento do plano de gerenciamento, deve-se analisar também o plano diretor da cidade, e assim seguir a ordem da Figura 2. O plano diretor deve apresentar estratégias de melhoria contínua, podendo estes fazer usos de ferramentas como Kanban, Kaizen, etc.

Para a preparação adequada do RSU, os sistemas de coleta, transporte e os serviços de limpeza devem ter produtividade e qualidade com um baixo custo.

Figura 2 – Manual de gerenciamento integrado.



Fonte: Adaptado Cempre, 2018.

Assume que coletores de rua devem ter o desempenho acompanhado, para que a vida útil dos materiais utilizados na reciclagem, atendam as normas internacionais para que assim sejam embalados (CEMPRE, 2018).

Para fazer o planejamento do transporte, que se faz rota por rota, precisa-se determinar as condições de operação e custo para noção básica e comparar as alternativas que venham aparecer no futuro.

É necessário conhecer os seguintes elementos para o planejamento do transporte: fluxos nas diversas ligações da rede; nível de serviço atual; nível de serviço desejado; características ou parâmetros sobre a carga; e tipos de equipamento disponíveis e suas características (capacidade, fabricante, etc.). E

no que se refere às características ou parâmetros de carga, os principais elementos a considerar são: peso e volume; densidade média; dimensões da carga; dimensões do veículo; nível de periculosidade; estado físico e compatibilidade das cargas (por exemplo, a coleta do lixo de serviços de saúde deve ser separada do lixo domiciliar), (CEMPRE, 2018, pg 43).

Os custos são definidos como diretos, onde entram os gastos como depreciação dos equipamentos, salários de motoristas e ajudantes, cobertura de riscos, combustível, entre outros, e indiretos, onde envolvem custos que não entram diretamente na operação de coleta, ou seja, são gastos como contabilidade, administração geral. Aproximadamente 85% dos gastos correspondem aos custos diretos, e os outros 15% aos indiretos (CEMPRE, 2018).

Os planejamentos de coleta e transporte devem ser muito bem estudados, em caso onde feito um planejamento ineficiente podem acarretar em custos elevados apenas nessa etapa de todo processo.

As dificuldades de um gerenciamento eficiente deste sistema podem levar a custos elevados. O município de São Paulo, por exemplo, gastou em 2012 mais de 93 milhões de reais (por mês) para a coleta, transporte, tratamento e destinação final dos resíduos domiciliares, executados por empresas particulares sob regime de concessão. Foram gastos mais 84 milhões de reais (por mês) com varrição de logradouros públicos, coleta e transporte de grandes objetos, limpeza de monumentos e coleta manual e mecanizada de entulhos (CEMPRE, 2018, pg 43).

Para a coleta devem ser definidos pontos relevantes para coletar, como por exemplo, em garagens de veículos, pontos de descarga, grandes centros produtores de RSU, etc. (CEMPRE, 2018).

Deve-se separar a cidade em setores de coleta, estes podem ser agrupados em seções ou regiões ao respeito dos fatores administrativos e operacionais. Para cada seção é necessário estabelecer uma frequência de coleta. “Exemplificando: para um setor cuja coleta é realizada duas vezes por semana, deve definir que os dias da semana serão segundas e quintas-feiras; terças e sextas-feiras ou quartas-feiras e sábados” (CEMPRE, 2018, pg 56).

2.2.2. Custos fixos

Nos custos fixos, adentram os seguintes tipos de gastos: água, energia elétrica, telefone, gás, uniformes, materiais utilizados no escritório, serviços contratados, depreciação dos caminhões (sem contar pneus e combustíveis), etc.

- **Custos relacionados aos veículos**

São gastos relacionados aos caminhões, sendo estes: depreciação dos veículos, seguros, IPVA, etc.

A depreciação dos veículos representa a perda de valor em relação ao uso durante o tempo. Admite-se que em cinco anos é possível obter o custo de depreciação do equipamento, “O valor a ser depreciado é normalmente 80% do preço do veículo novo (sem pneus e câmaras), considerando-se um valor residual, ou seja, valor do bem ao final da sua vida útil quando deve ser substituído, de 20%. Em alguns casos, pode-se considerar a depreciação de até 90% do preço do veículo novo” (CEMPRE, 2018, pg 64).

De acordo com a CEMPRE (2018), adota-se um coeficiente de depreciação para cada idade de veículo, calculado pela soma dos anos.

Quadro 3 – Coeficientes de depreciação por ano.

Ano	Coeficiente
0 a 1	0,2667
1 a 2	0,2133
2 a 3	0,16
3 a 4	0,1067
4 a 5	0,0533
Mais de 5	0

Fonte: Adaptado Cempre, 2018.

Há também o método linear que pode ser calculada pela equação 1.

$$Dep = \frac{1 - \frac{VR}{100}}{VU}$$

(1)

Sendo:

Dep = coeficiente anual de depreciação;

VR = valor residual, que consiste de uma porcentagem do preço do veículo;

VU = Vida útil do veículo em anos.

- **Remuneração do capital**

Na remuneração do capital relacionado aos veículos, adotando o método da soma dos dígitos, é adotado uma taxa de 12,7% anual, que dividido nos meses dá-se aproximadamente à 1% ao mês (CEMPRE, 2018).

Quadro 4 – Depreciação de acordo com idade do veículo.

Ano	Depreciação
0 a 1	1
1 a 2	0,7333
2 a 3	0,52
3 a 4	0,36
4 a 5	0,2533
Mais de 5	0,2

Fonte: Adaptado Cempre, 2018.

A remuneração da frota é obtida pela soma dos valores mensais de remuneração de cada veículo. Está se obtém através da multiplicação do valor do equipamento novo pelo fator respectivo a sua idade, o resultado obtido multiplica-se por 1%, ao qual corresponde a taxa de juros ou custo de oportunidade de capital (CEMPRE, 2018).

Caso seja calculada pela depreciação linear, adota-se a Equação 2.

$$RC = \frac{2+(VU-1)*\left(1-\frac{VR}{100}\right)}{2VU} \quad (2)$$

Sendo:

RC = coeficiente anual de remuneração de capital;

VR = valor residual, expresso como porcentagem do veículo novo;

VU = vida útil em anos, referente ao veículo.

Além dos gastos de depreciação dos equipamentos de coleta e transporte, tem os demais gastos como mencionado anteriormente, como seguro obrigatório, IPVA dos caminhões, licenciamento, etc.

- **Custos com instalações e equipamentos**

Para gastos referentes às instalações e aos equipamentos, deve-se obter através do balanço das empresas, pois estes variam seus preços, como em uma instalação não há uma depreciação significativa dentro de um curto período de tempo (aproximadamente 50 anos), está não afeta tanto quanto outros bens, “é possível que, ao invés de uma depreciação, haja uma valorização em função de alteração do uso do solo (CEMPRE, 2018, pg 65).

- **Custos relacionados à mão-de-obra**

Dentro dessa, cabe os salários, encargos e benéficos dados aos funcionários, sendo eles motoristas e coletores, cujo entram na mão-de-obra diretamente relaciona à coleta, ou aos mecânicos, fiscais e administradores, responsáveis pela mão-de-obra indireta (CEMPRE, 2018).

2.2.3. Custos variáveis

De acordo com o manual da CEMPRE (2018), nesta parte adentram gastos como combustíveis, óleos para lubrificação, graxas, filtros, pneus, câmeras, protetores, etc.

- **Custo por quilômetro percorrido (\$/km)**

Pode-se obter o custo do quilometro percorrido da seguinte maneira, dividem-se a quantidade gasta por cada veículo pela quantidade de quilômetros rodados, o valor de consumo obtido é multiplicado pelo valor de cada item gasto (combustível, pneu, etc.). Após a obtenção do valor de todos insumos gastos em cada veículo, soma-se o gasto que se obteve de cada um (CEMPRE, 2018).

Para se calcular o custo dos pneus, utiliza-se a Equação 3:

$$CUSTO PNEUS POR KM = \frac{N*CN+R(CR)}{VN+R(VR)} \quad (3)$$

Onde:

N = quantidade de rodas do veículo;

R = quantidade de recapagens;

VN = vida útil de um pneu novo em km;

VR = vida útil do pneu recapado em km;

CN = custo de um pneu novo;

CR = custo de recapagem.

- **Gasto de operação dos veículos por hora (\$/h)**

“Nessa categoria enquadram-se, por exemplo, lubrificantes, fluido hidráulico consumido pela caçamba e peças que foram substituídas” (CEMPRE, 2018, pg 66). O gasto dá-se pela quantidade de itens consumidos para cada veículo pela quantidade de horas operadas. O consumo por hora deve ser multiplicado pelo valor de cada item e no fim o valor obtido e somado pela quantidade de todos os veículos.

- **Comparação entre cidades**

Deve ser feita algumas considerações quando comparado valores entre cidades, sendo elas as seguintes (CEMPRE, 2018).

- Em cidades maiores o custo unitário de coleta é menor, devido a economia em escala;
- Cidades de aspectos semelhantes podem apresentar variação de preço, devido a: distância da área de descarga, densidade populacional, etc.;
- A qualidade necessária na execução dos serviços pode não ser representado pelo custo comparado;
- Valores de outras cidades podem servir como indicadores não-conclusivos;
- Devido ao valor elevado de coleta, independente do modelo de gestão adotado, é importante a apropriação dos custos.

Além dos custos de coleta e transporte apresentados acima, existem outros que podem ser acrescentados, como custos unitários, onde estão relacionados custos quilométricos, tonelada, de pessoa atendida, desempenho, utilização do veículo, manutenção, etc.

2.3. Plantas termelétricas

As termelétricas são grandes emissoras de óxidos de carbono (CO e CO₂), óxidos sulfúricos (SO e SO₂) e óxidos nitrosos (NO e NO₂). Devido a esta alta taxa de poluição das termelétricas, foi feito estudos nos países da Romênia, Cardu e Baixa.

“Analisaram o impacto ambiental causados pelos resíduos oriundos das termelétricas com turbinas a gás associadas com turbinas a vapor de condensação, operando em regime de cogeração e utilizando diversos combustíveis como: carvão, óleo e gás natural. Na análise, foram consideradas as emissões de: CO₂, SO₂ e NO₂ isolado, e realizada uma comparação de concentração de cada um destes produtos com as normas existentes naquele país.” (VILLELA, 2007, pg 24).

Devido a isso foram desenvolvidos estudos que buscavam aprimorar a tecnologia utilizada no processo, cujo quais diminuíssem a emissão de poluentes e com baixo custo de investimento. As pesquisas promoveram métodos otimizados dos sistemas energéticos, devido a utilização de aspectos econômicos e projeção matemática das plantas termelétricas (VILLELA, 2018).

As termelétricas abordadas nesse trabalho consistem em utilização dos RSU's e do gás natural, por isso se caracterizam como UTH's (Usinas Termelétricas Híbridas), que utilizam como combustível aproximadamente 80% de gás natural e 20% de RSU (OLIVEIRA e ROSA, 2001). “A atratividade da alternativa híbrida é muito próxima à da usina a gás natural e pode dispor da comercialização dos certificados de emissões evitadas de gases do efeito estufa como fonte de receita adicional” (OLIVEIRA e ROSA, 2001, pg 2-3).

2.4. Caracterização dos RSM e RSS

De acordo com CARNEIRO, a variação de região para região, os componentes dentro do RSM, está relacionada geralmente ao seu nível de desenvolvimento econômico, sanitário, tecnológico e costumes. Saber as características químicas permite a seleção adequada dos processos de tratamento e quais as técnicas utilizadas para disposição final (CEMPRE, 2018).

- O poder calorífico inferior (PCI), “indica a quantidade de energia útil que pode ser liberada durante a queima do resíduo. Quanto maior o PCI, maiores serão as potências liberadas no interior do incinerador e maiores as temperaturas atingidas” (CEMPRE, 2018, pg 199);

- A análise imediata irá determinar os teores da água, cinzas e matéria volátil do resíduo;
- A análise elementar irá determinar os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio para avaliar a quantidade de ar necessária para combustão completa;
- Os teores de elementos tóxicos presentes nos resíduos, como por exemplo o mercúrio, cádmio, chumbo, cromo, cloro, etc. podem determinar o percentual de geração e formação de compostos tóxicos, possibilitando dimensionar adequadamente o sistema de limpeza dos gases emitidos.
- Determinar os sólidos totais voláteis, determinando o teor de cinzas, para saber o montante de material a ser descartado em aterros;
- O potencial de hidrogeniônico (pH), cujo o qual está relacionado a velocidade de degradação da matéria dos resíduos e indica a alcalinidade ou acidez dos RSU's.

2.4.1. Incineração de RSM

De acordo com a Cempre (2018), o tratamento térmico pode ser classificado como de alta ou baixa temperatura, onde tratamentos de alta temperatura sobrepõem a temperaturas acima de 500°C com objetivo de destruição ou remoção da fração orgânica do resíduo, com redução de 70 a 90% de massa e volume.

“A energia contida nos resíduos, nestes processos, pode ser parcialmente aproveitada, podendo gerar energia elétrica, água quente e vapor, ou combustíveis alternativos, auxiliando na redução do custo operacional do tratamento térmico ” (CEMPRE, 2018, pg 195).

De acordo com a Cempre (2018), utilizam alguns outros processos de decomposição térmica, como citado:

Os processos de decomposição térmica de resíduos operam a temperaturas em torno de 600°C e ocorrem em reatores onde os teores de oxigênio ficam abaixo do estequiométrico (quantidade de ar necessária para a combustão completa do resíduo). Dentre os processos de decomposição térmica existentes, destacam-se: pirólise, gaseificação e liquefação (CEMPRE, 2018, pg 195).

Os tratamentos giram em torno dos 100°C, visando a limpeza dos RS, por isso emprega-se tratamento apenas aos RSS, onde a massa dos resíduos e conteúdo de matéria orgânica não se alteram de forma significativa, mas se reduz o seu volume (CEMPRE, 2018).

O Quadro 5 apresenta o destino que os RSU's recebem nos respectivos países.

Os tratamentos giram em torno dos 100°C, visando a limpeza dos RS, por isso emprega-se tratamento apenas aos RSS, onde a massa dos resíduos e conteúdo de matéria orgânica não se alteram de forma significativa, mas se reduz o seu volume (CEMPRE, 2018).

É importante que a temperatura dentro de uma câmara de incineração mantenha-se elevada, recomenda-se uma temperatura de aproximadamente 1200°C, para que os resíduos sejam rapidamente decompostos. Para isso recomenda-se que o teor de oxigênio dentro da câmara seja próximo de 7%, pois o oxigênio reage com os compostos orgânicos gerando CO₂ e H₂O, e isso interfere na velocidade de decomposição da matéria orgânica. Porém teores elevados de oxigênio podem reduzir a temperatura da câmara (CEMPRE, 2018).

Quadro 5 – Destino dos resíduos sólidos urbanos.

País	Aterros/Lixões (%)	Incineração com recuperação de energia (%)	Compostagem + Reciclagem (%)
Brasil	87	-	13
Bélgica	5	36	60
República Tcheca	83	13	4
Alemanha	1	35	65
Irlanda	62	3	35
Espanha	57	9	34
França	36	32	33
Portugal	65	19	17
Suécia	3	49	48
México	76,5	-	9,6

Fonte: Adaptado Cempre, 2018.

Apesar de condições adequadas, ainda se tem um determinado tempo para ocorrer a decomposição.

Variando com a temperatura, teor de oxigênio e turbulência. Em geral, as câmaras de combustão de volumes maiores também levam a tempos de residência maiores. Os tempos de residência em câmaras de combustão de incineradores têm variado de 0,8 a 2,0 segundos (CEMPRE, 2018, pg 196).

Devido a compostos não encontrados em combustíveis habituais, na presença dos RSM e RSS.

“Como metais pesados e compostos clorados, e que levam à formação de compostos poluentes mesmo com a adoção de boas técnicas de combustão, todo equipamento de incineração deve ser equipado com um sistema eficiente de limpeza de gases independentemente do porte e projeto do incinerador” (CEMPRE, 2018, pg 196).

Para incineração segura de resíduos, em termos ambientais, é possível realizar com a instalação de filtragem dos gases.

“As tecnologias de limpeza hoje disponíveis permitem atingir padrões de emissão abaixo dos exigidos pelas legislações mais restritivas e, contrariamente ao conceito geral existente, a incineração em equipamentos mais modernos pode apresentar vantagens, em termos ambientais, em relação a outros meios de disposição, como, por exemplo, o aterro” (CEMPRE, 2018, pg 196).

[...] a matéria orgânica presente no resíduo, ao ser decomposta, libera gás metano que, se não queimado, tem um potencial 21 vezes maior que o gás carbônico em relação ao efeito estufa, além de emitir outros gases que contribuem para a formação de compostos poluentes atmosféricos, bem como efluentes líquidos (chorume) que podem contaminar lençóis freáticos. Alguns países inclusive já apresentam restrições ao aterro de resíduos com teores de material orgânico elevados [...] (CEMPRE, 2018, pg 196).

O processo de incineração, de acordo com a Cempre (2018), apresenta vantagens e desvantagens. Segue algumas vantagens:

- Apresenta uma redução da massa de 70% e volume 90%, diminuindo quantidade de resíduos encaminhado a aterros;
- Pode-se gerar energia elétrica;
- Ao se utilizar tecnologias para a limpeza dos gases emitidos durante a combustão, apresenta um nível de poluição menor do que outras maneiras de incineração;
- Contribuição para redução do efeito estufa, cabido a combustão de materiais de fonte renovável e à redução na emissão do metano e contaminação de lençóis freáticos, como ocorre em aterros;
- Esterilização dos resíduos;
- Destoxicação, onde produtos orgânicos como óleo ascarel e produtos aromáticos são destruídos, devido a isso a incineração é bastante utilizada para descontaminação do solo com excedente de químicos e tratamento de resíduos industriais.

Desvantagens:

- Apresenta custos elevados desde a instalação até sua operação, porém é algo que se aproxima, atualmente, do custo utilizado para instalação de aterros;

- Exigência de mão de obra qualificada;
- Possível presença nos materiais que geram compostos tóxicos e corrosivos.

2.4.2. Planejamento para uma unidade de incineração

É importante fazer planejamentos de longo prazo para implantação de incineradores, incluindo nas termelétricas que fazem uso dos resíduos sólidos como fonte de combustível, visando respeitar questões ambientais e econômicas.

Alguns pontos importantes para fazer o planejamento de uma unidade são os seguintes, de acordo com a Cempre (2018):

- Fazer a instalação próxima do centro de geração dos resíduos, ou seja, próximo às cidades, polos industriais, etc. Aproveitando assim para geração de energia elétrica, reduzindo o custo da incineração;
- Definir um responsável pelas atividades decorrentes na unidade, inclusive pelos riscos ligados;
- Selecionar um fornecedor e coordenador experiente;
- Firmar contratos de longo prazo para venda de energia elétrica;
- Realizar financiamento com taxas compatíveis;
- Desenvolver programas visando reciclagem e influenciar a redução de produção do volume dos resíduos;
- Vender transparência, mostrando as ações realizadas com âmbito de reduzir riscos ambientais.

2.5. Funcionamento de uma WTE

Para o bom entendimento do funcionamento de uma WTE é bom conhecer os tipos de incineradores utilizados para a combustão dos RSM. Os modelos mais conhecidos, como citado no manual de Cempre (2018), os seguintes:

2.5.1. Combustão grelha

Este é o modelo mais utilizado, atualmente, para realizar a incineração dos resíduos sólidos municipais.

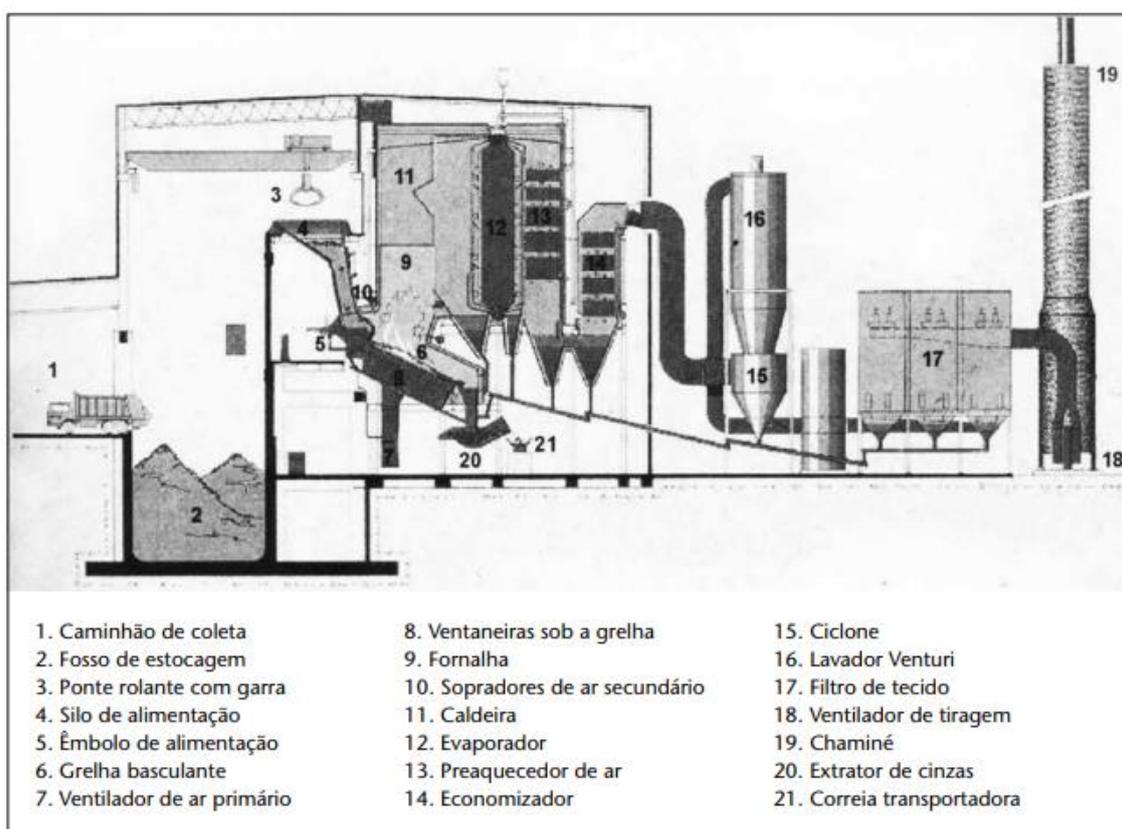
Os incineradores com combustão em grelha podem incinerar RSM no estado bruto ou numa forma beneficiada, denominada combustível derivado de resíduos (CDR), resultado de um processo prévio de separação de materiais recicláveis do RSM, semelhante ao empregado na compostagem, gerando um

material com granulometria menor e mais uniforme que o resíduo bruto, e mais adequado para a incineração (CEMPRE, 2018, pg 200).

Para este modelo, de acordo com a Cempre (2018), geralmente são utilizados equipamentos de combustão em paralelo, com capacidade variável de 50 a 1000 t/dia. “[...] as mais recentes têm a câmara de combustão revestida com parede de água, visando a recuperação de energia, e sistemas de limpeza de gases” (CEMPRE, 2018, pg 200).

A Figura 3 mostra o modelo e partes de uma usina incineradora de RSU.

Figura 3 – Esquema de usina de incineração de resíduos sólidos com recuperação de energia.



Fonte: Cempre, 2018.

Os RSM, são descarregados em um fosso após ter sido feita a pesagem do RSM bruto, onde é revolvido por garras suspensas para homogeneização da carga. Estas garras carregam para o silo de alimentação onde os resíduos são descarregados na câmara de combustão (CEMPRE, 2018).

A grelha instalada move o resíduo através da câmara de combustão, expondo à alta temperatura.

“Durante este deslocamento, o material vai se aquecendo e passa por secagem, perda de compostos orgânicos voláteis, combustão do resíduo carbonoso, e sai da câmara de combustão, ao fim da grelha, com uma pequena quantidade de material orgânico ainda presente, na forma de carvão. Este tipo de grelha pode operar com materiais com granulometrias bastante variadas, o que o torna bastante adequado à incineração de RSM em estado bruto.” (CEMPRE, 2018, pg 201).

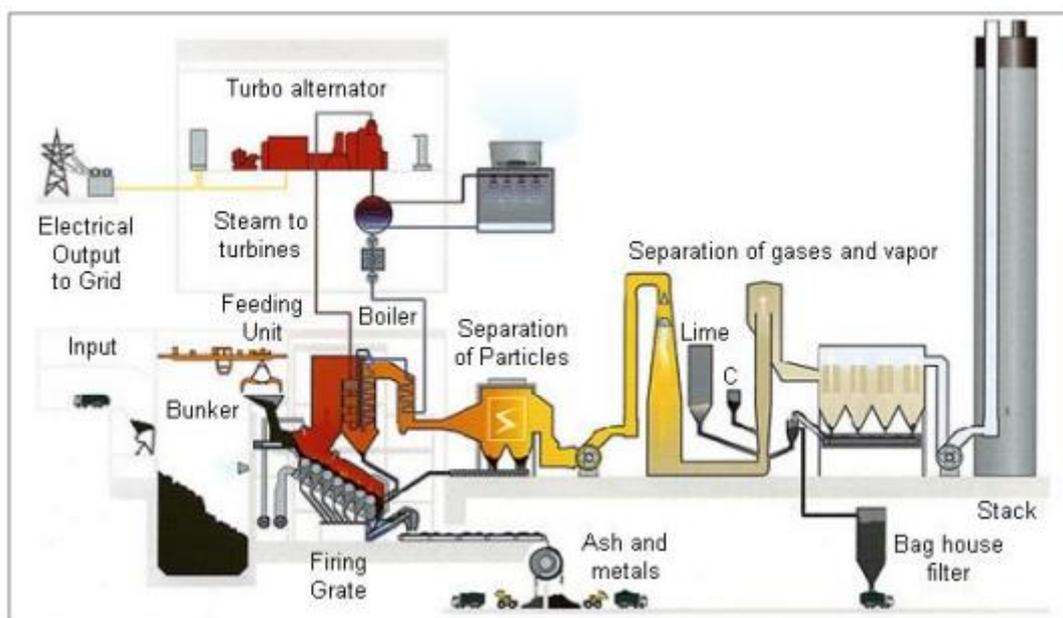
O ar é introduzido por baixo da grelha, aproximadamente 60%, e o restante entra junto com a carga. Este ar forçado, normalmente preaquecido, auxilia no resfriamento, secagem e combustão dos RSM.

“O ar introduzido por sobre a grelha é injetado em alta velocidade para criar uma região de elevada turbulência e promover a sua mistura com os gases e vapores combustíveis gerados durante a decomposição térmica do RSM. A temperatura na região sobre a grelha atinge cerca de 1200°C, decompondo a maioria dos compostos orgânicos a CO₂ e água.” (CEMPRE, 2018, pg 201).

Os gases entram em contato com o incinerador para auxiliar no aumentando o calor que é gerado com a queima do lixo, a água que é aquecida com tubulações que passam internamente transforma-se vapor que é utilizado geração de energia elétrica. Porém ao queimar esses gases, formam-se outros gases que são corrosivos, como: cloro, ácido fluorídrico, ácido clorídrico, etc. Devido a isso as tubulações devem ser revestidas com materiais refratários e anticorrosivos para proteção contra a corrosão e para manter a temperatura, estas devem permanecer restritas a 420°C. (CEMPRE, 2018)

A Figura 4 apresenta o modelo de um incinerador tipo grelha bruto.

Figura 4 – Incinerador RSM grelha bruto, WTE.



Fonte: Carneiro (2015).

Segundo a Cempre (2018), os gases que são gerados na combustão saem aproximadamente a 420°C e precisam passar por uma troca de calor, sendo resfriados a aproximadamente 250°C, e assim, sendo encaminhados para a sessão de tratamento, para remover partículas do material, dioxinas, metais pesados que possivelmente podem ser encontrados.

Pode-se mesclar o uso do vapor gerado, utilizando apenas para geração de energia, ou de forma parcial, gerando energia e provendo vapor para indústrias instaladas próximas ao incinerador, este fornecimento de vapor denomina-se cogeração.

Para a geração exclusiva de energia elétrica, o vapor será expandido ao entrar na turbina e condensado ao sair. Na cogeração o gás terá que manter uma pressão, geralmente a mais utilizada é 3 atm por ser usada em processos industriais, que ao sair da parte de geração.

Uma unidade com sistema de cogeração, por reutilizar o vapor após a geração, consegue atingir um nível de rendimento maior que de uma usina que é utilizada exclusivamente para geração de energia. O percentual de uma unidade incineradora com sistema de cogeração consegue chegar a 60% de rendimento energético do vapor, enquanto uma unidade com foco em geração atinge apenas 22% (CEMPRE, 2018).

Falar sobre os custos e investimentos sobre um incinerador do tipo grelha é relativo, pois varia de sua capacidade. Assim como o custo de incineração variam, também, da capacidade do incinerador, poder calorífico do RSM e do valor da energia elétrica (CEMPRE, 2018).

De acordo com a Cempre (2018), a unidade geradora se São Paulo:

Para uma unidade de incineração com capacidade de 1800 t/dia de RSM na cidade de São Paulo, o que representa cerca de um décimo do total gerado por dia, com PCI em torno de 6,3 MJ/kg e gerando energia elétrica a uma eficiência de cerca de 18,5%, estima-se que o investimento direto seja cerca de US\$ 90 milhões. Para um preço de venda de energia elétrica de US\$ 50,00/MWh, calcula-se que o preço de disposição de RSM fique em torno de US\$ 27,00/t, incluindo a remuneração do capital e o custo de disposição das cinzas geradas em aterros sanitários, a um custo de US\$ 20,00/t. Se o PCI do RSM for maior de 7,2 MJ/kg, o custo de incineração cai para US\$ 25,00/t. Estes valores são próximos do custo de disposição de RSM via aterro sanitário. (CEMPRE, 2018, pg 202).

É possível ainda diminuir o valor da incineração, no caso de aquecimento para utilização industrial, devido ao fato de aumentar a eficiência energética.

“O investimento inicial cai para cerca de US\$ 73 milhões e, assumindo que o preço de venda por tonelada de vapor gerado seja de US\$ 13,40/t (base de cálculo: óleo combustível a US\$ 192,50/t), o custo de incineração para RSM com poder calorífico inferior (PCI) de 6,3 MJ/kg fica em torno de US\$ 12,40/t. Para o PCI maior, o custo cai ainda mais, chegando a US\$ 9,40/t, cerca de 2 vezes menor que o custo em aterros sanitários.” (CEMPRE, 2018, pg 202).

De acordo com a Cempre (2018), para implantação de uma unidade semelhante à de São Paulo, com capacidade de 1800t/dia de RSM leva um período aproximado, entre 5 e 8 anos, incluindo o tempo para estudo e definição do local, obtenção da permissão e execução, período de construção.

2.5.2. Incinerador câmaras múltiplas

Este incinerador consiste em pequenas unidades de incineração de resíduos sólidos, com uma capacidade 0,2 a 200 t/dia. O RSM que entra na primeira câmara por um embolo, é movimentado por grelhas que movimentam a carga para os próximos êmbolos. A alimentação do ar é feita pela parte inferior, sendo normalmente abaixo da quantidade estequiométrica requerida, assim mantendo apenas uma temperatura média de 600°C (CEMPRE, 2018).

Esta técnica auxilia no controle da combustão e minimiza a emissão de material particulado (arrasta pouco material sólido da primeira câmara). O resíduo sólido vai se consumindo e ao fim da primeira câmara as cinzas são descarregadas e apagadas em tanques de água. Os gases não queimados vão para a segunda câmara, onde são misturados com os gases de um queimador auxiliar. Estes gases devem entrar em alta velocidade para provocar turbulência elevada na segunda câmara e, conseqüentemente, garantir uma boa mistura destes gases com os da primeira câmara (CEMPRE, 2018, pg 203).

Nas primeiras câmaras o nível de oxigênio deve ser mantido elevado para melhor combustão, o excesso de ar na primeira câmara fica entre 100 e 200%, assim atingindo uma temperatura próxima de 1200°C.

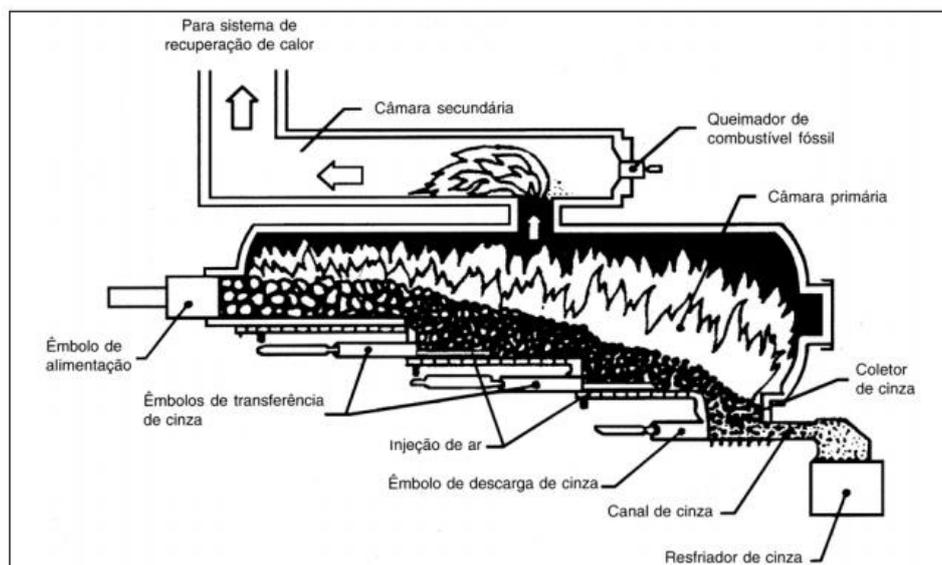
“Ao final da segunda câmara pode-se colocar dispositivos de recuperação de calor, sendo os mais comuns geradores de vapor e de água quente. Devido às baixas pressões de vapor gerados e aos custos elevados de unidades de geração de energia elétrica, estes tipos de equipamentos não são utilizados para geração de potência.” (CEMPRE, 2018, pg 203).

A Figura 5 mostra o funcionamento de um incinerador de câmaras múltiplas.

De acordo com a Cempre (2018), unidades menores desse modelo operam de forma descontínua, sendo alimentados manualmente, constituídas por apenas uma câmara e sobre uma grelha única. Porém unidades como essa acabam não recebendo tecnologia

de recuperação de energia e tendo a recuperação da cinza feita somente após ter-se completada o ciclo de incineração (aproximadamente 10 horas de operação).

Figura 5 – Incinerador de câmaras múltiplas.



Fonte: USEPA 1990.

Unidades como essa, por apresentarem uma característica construtiva simples e um limite de queima diário menor, é utilizada principalmente para incineração de RSS. Mas por causa de sua simplicidade a recuperação dos gases não se dá apenas pela adoção de boas técnicas de combustão (CEMPRE, 2018).

Devido a emissão desses gases ficar muito acima, mesmo quando adotado boas práticas e técnicas de combustão. “[...] razão pela qual muitos deles ou têm sido reformados para a instalação de sistemas de limpeza de gases mais eficientes ou simplesmente colocados fora de operação.” (CEMPRE, 2018, pg 204).

Por serem incineradores menores estes apresentam um investimento menor para sua instalação, mas como o ganho dessa tecnologia está na quantidade de RSM queimada, acaba por elevar o preço de queima.

Uma prática adotada para incineradores projetados para incineração de RSM com sistemas de limpeza de gases adequados aos padrões exigidos, foi queimar RSS juntamente ao RSM, porém este apresentou aumento na quantidade de poluentes emitidos, mas ainda dentro do padrão permitido (CEMPRE, 2018).

2.5.3. Incineradores de leito fluidizado

Este é um incinerador bastante utilizado na indústria, que teve um desenvolvimento significativo nas últimas décadas, várias pesquisas foram realizadas sobre para melhoria de sua eficiência.

É um incinerador bastante utilizado na indústria química para queima de lodos de esgoto resultante de RSM, seu tamanho fica entre o incinerador de grelha e o de câmaras múltiplas.

“Este tipo de sistema de combustão somente a pouco tempo começou a ser aplicado na incineração de resíduos perigosos. O incinerador de leito fluidizado deve apresentar um leito circulante ou borbulhante. Ambos os tipos, [...], consistem de um vaso de combustão parcialmente cheio com partículas de areia, alumina, carbonato de cálcio ou outro material. O ar de combustão é fornecido através de uma placa distribuidora na base do combustor a uma taxa suficiente para fluidizar o leito. As temperaturas de operação são normalmente mantidas entre 760 e 871C e o excesso de ar requerido é aproximadamente de 25% a 150%. (MARTINS, 2001, pg 29).

Seu funcionamento para os resíduos sólidos, de acordo com a CEMPRE (2018), dá-se pela seguinte maneira.

“ [...] Um material fino inerte, normalmente areia, é mantido em suspensão por uma corrente de ar injetada na base do leito, chamado de ar de fluidização, [...]. Este leito se comporta como um líquido e, no início de operação, ele é aquecido por queimadores auxiliares localizados acima do leito. Quando a temperatura atinge cerca de 400°C, inicia-se a alimentação de resíduo sólido, que pode ser feita acima ou dentro do leito. A agitação no interior do leito, por ser muito intensa, distribui o resíduo sólido de maneira uniforme por todo o leito. As partículas de resíduo sólido alimentadas trocam calor de forma intensa com a areia, que constitui cerca de 95% em massa do leito, e se aquece, seca e entra em combustão rapidamente. Atingida a temperatura de operação, em torno de 600°C, desliga-se os queimadores auxiliares. A partir daí a operação consiste em alimentar continuamente o resíduo, retirando sempre a cinza gerada. ” (CEMPRE, 2018, pg 205).

As cinzas são retiradas no sistema de limpeza dos gases ou removidas pela parte inferior do leito através de descargas programadas. A matéria orgânica, sendo sólida ou gasosa, é queimada na região superior do leito de areia, nesta região, injeta-se ar com turbulência elevada para a combustão do material que não queimou na fase anterior, podendo fazer com que a temperatura dos gases aumente até 900°C.

As vantagens apresentadas por esse incinerador são, de acordo com Martins (2001):

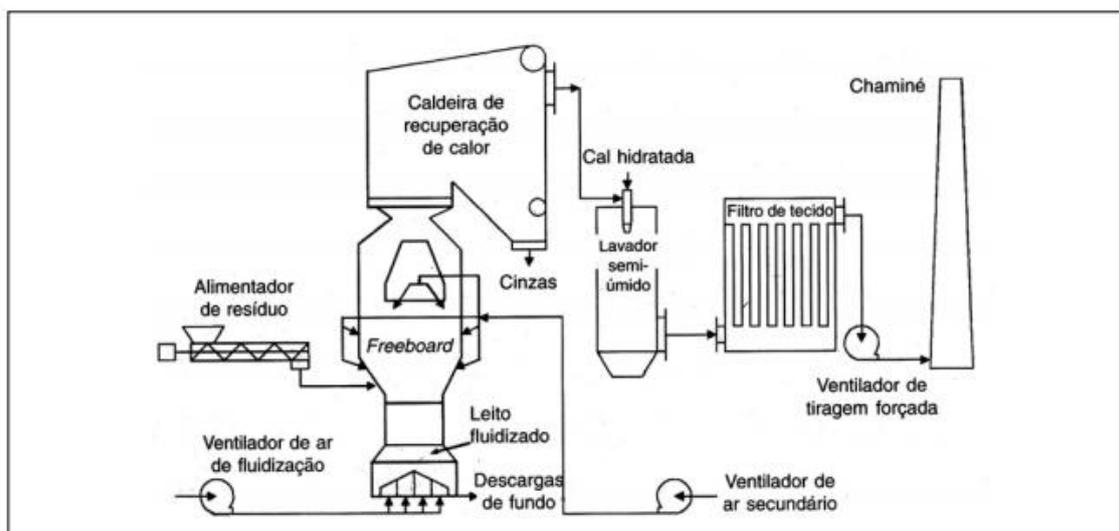
- Simples operação e controle automático;

- Equipamento projetado para processos contínuos e em grande escala;
- Possibilita alta taxa de transferência de calor em comparação aos outros;
- Habilita rápida mistura entre sólidos, o que possibilita condições isotérmicas ao longo do reator.

As desvantagens apresentadas por esse incinerador são:

- Atrito entre partículas e paredes do equipamento;
- Custos altos com energia e operação;
- Se a temperatura for muito elevada e haver descontrole na fluidização acarretará em aglomerados que obstruem partes do equipamento ou do distribuidor, que interromperá a distribuição;
- Não recomendados para processos que envolvam partículas muito finas, pois pode requerer que a temperatura seja diminuída, reduzindo sem rendimento.

Figura 6 – Incinerador de Leito Fluidizado.



Fonte: Cempre, 2018.

2.6. Análise energética e exérgica

Aqui é apresentada uma análise dos pontos termodinâmicos de usinas de incineração do tipo waste-to-energy (WTE) utilizadas. Um sistema a ser mencionado é a usina de Zabalgardi, que fica localizada na província de Bilbao – Espanha, cuja qual é uma das plantas referências no mundo que utilizam, o qual apresenta dois ciclos, os quais são apresentados a seguir.

2.6.1. Descrição de uma planta termelétrica

O seguinte esquema apresenta alguns dos principais componentes de uma planta térmica: Câmara de combustão, turbina a gás, caldeira de recuperação, compressor, bomba e condensador.

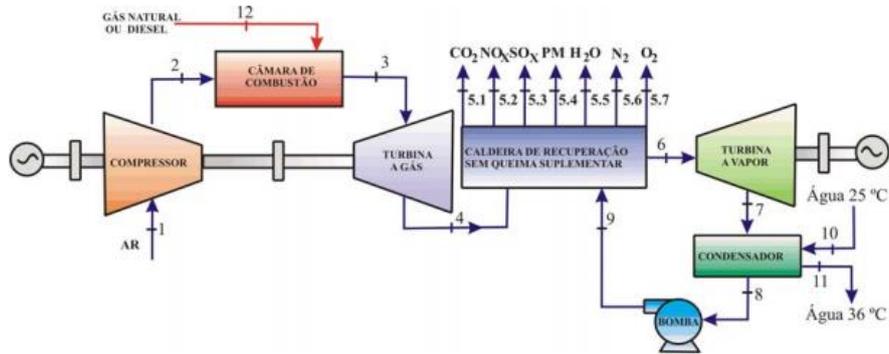
Nas condições normais, o ar que entra no compressor será comprimido até a pressão de combustão sendo enviado para a câmara de combustão, cujo onde o combustível é queimado sobre uma pressão constante, os gases produzidos durante a combustão então se expandem na turbina, gerando assim, energia elétrica. A seguir os gases vão para a caldeira de recuperação, onde o vapor é reaquecido e mandado para a turbina, produzindo mais energia elétrica (VILLELA, 2007).

A Figura 7 demonstra o sistema de turbina a gás conectada a caldeira de recuperação, enquanto a Figura 8 apresenta o modelo adotado na usina de Zabargarbi na Espanha.

O próximo sistema apresentado é o da WTE de Zabargarbi, já mencionado. Segundo Carneiro (2015), o sistema é definido em dois ciclos, sendo eles:

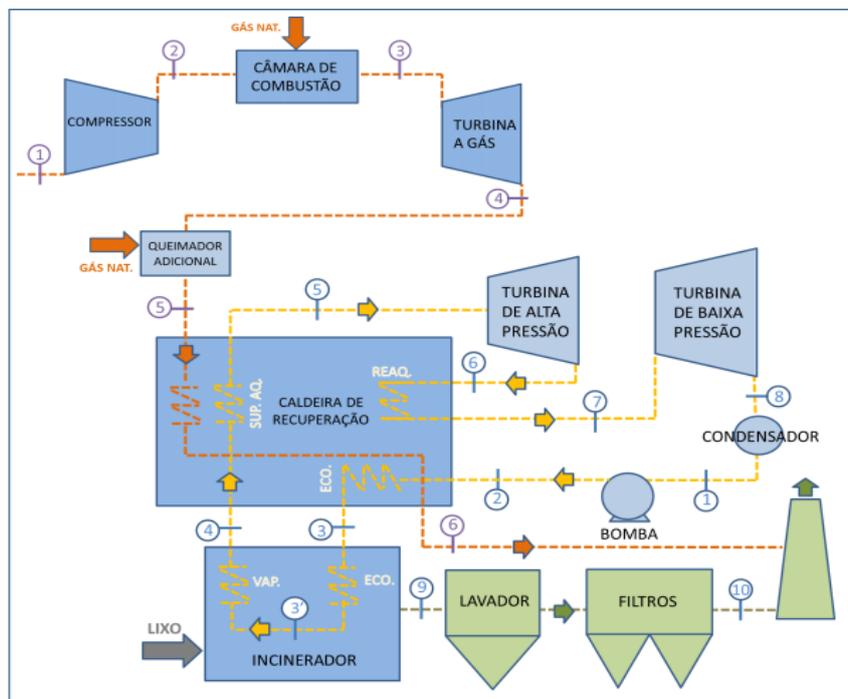
- Ciclo de potência a gás:
 - Compressor;
 - Combustor a gás natural;
 - Turbina a gás (potência geradora de 43MW);
 - Queimador adicional de gás natural;
- Ciclo de potência a vapor:
 - Caldeira tipo grelha móvel para incineração dos RSM;
 - Incinerador com boiler com economizador e evaporador, revestido com inconnel 625;
 - Sistema de controle de poluição atmosférico;
 - Turbina a vapor de dois estágios (capacidade geradora de 56,5 MW);
 - Condensador;
 - Bomba;
 - Caldeira de Recuperação.

Figura 7 – Sistema de turbina a gás conectada à caldeira de recuperação.



Fonte: Villela (2007).

Figura 8 – Sistema utilizado pela WTE Zabalgardi, Bilbao (Espanha).



Fonte: Carneiro (2015)

2.6.2. 1ª Lei da termodinâmica – análise energética

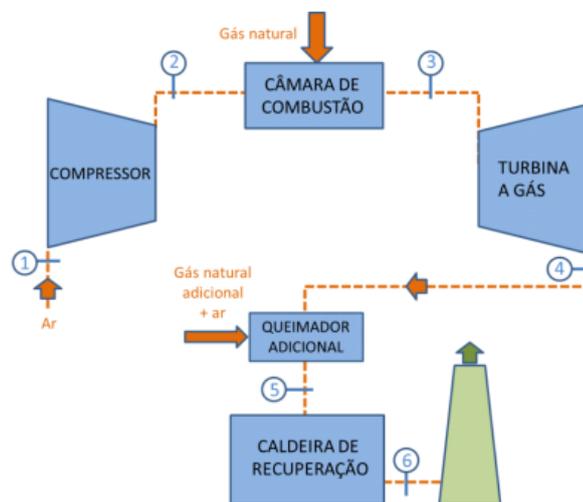
A primeira lei da termodinâmica consiste em fazer um balanço da energia inicial e da final do sistema. A energia fornecida e o trabalho realizado pelo sistema, assim pode-se afirmar que a quantidade de calor recebida, é igual ao trabalho que é realizado por ele acrescentando a variação de energia interna.

Define-se a primeira lei da termodinâmica como lei da conservação de energia, ou seja, a energia total de um sistema se conserva durante um processo. Como por exemplo, quando um sistema recebe calor, este pode realizar trabalho ou variar sua energia interna.

Para o nosso sistema, adota-se que ele opere em regime permanente, ou seja, não perca calor durante o processo. Sendo assim foi feita a avaliação utilizando dados obtidos por carneiro da Usina termelétrica de Zabalgarbi.

O objetivo da primeira análise foi obter o valor das potências elétricas geradas, como mostra o processo na Figura 9.

Figura 9 – Análise do ciclo a gás.



Fonte: Carneiro (2015).

Ao final da turbina, no ponto 4, os gases ainda estarão aquecidos e será direcionado para uma segunda câmara de combustão (queimador adicional), para que ocorra uma segunda combustão, adicionando mais ar e gás natural. No ponto 5, os gases precedentes da segunda câmara de combustão, trocam calor com a água iniciando o ciclo a vapor e enfim liberados pela chaminé no ponto 6 (CARNEIRO, 2015).

2.6.3. Ciclo a gás

O ciclo a gás funciona da seguinte maneira, é injetado ar por meio de um compressor para a câmara de combustão, é então nesse ponto adicionado gás natural. Os gases superaquecidos se expandem com a temperatura necessitando redirecionamento através de tubulação para a turbina a gás e assim produzir energia elétrica. O restante

desses gases após passarem da turbina estarão em uma temperatura abaixo da desejada sendo necessário recuperá-la.

Após a turbina, o gás é redirecionado a um queimador adicional, o qual será injetado mais gás natural e ar para elevação de sua temperatura em um queimador adicional, e assim auxiliarem a combustão na caldeira de recuperação.

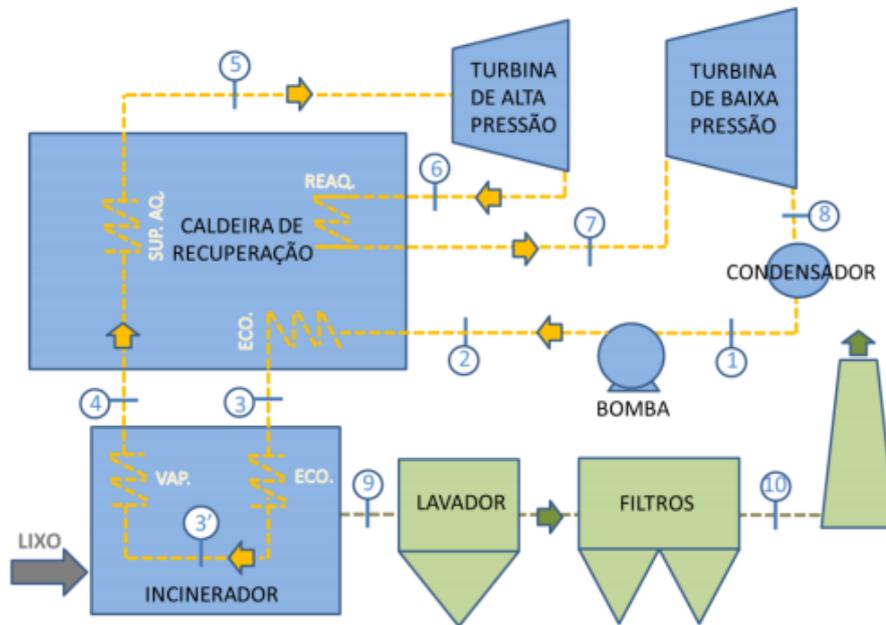
2.6.4. Ciclo a vapor

A análise energética do ciclo do vapor tem como finalidade obter a potência elétrica gerada, eficiência térmica no ciclo e o diagrama T x s (CARNEIRO, 2015).

Na Figura 10, o diagrama apresenta o ciclo que o vapor faz até a geração de energia elétrica.

1. No ponto 1 o condensador faz que a água esteja no estado líquido saturado;
2. A pressão do líquido é elevada, pela bomba, para uma condição de líquido comprimido no segundo ponto;
3. É instalado um economizador no ponto 3 para elevar a temperatura do líquido comprimido;
4. A reação de combustão, no incinerador, entre os resíduos sólidos e o ar eleva a temperatura do líquido através de um boiler, fazendo com que o líquido se transforme em vapor no quarto ponto;
5. O vapor é superaquecido no ponto 5 (Caldeira de recuperação), sendo direcionada para a turbina de alta pressão, onde ocorre a primeira expansão;
6. No ponto 6, o vapor expandido na turbina de alta pressão é redirecionado para a caldeira de recuperação para entrar na turbina de baixa pressão;
7. O ar se expande na turbina de baixa pressão até a condição do ponto 8, então é encaminhado para o condensador, quando se reinicia o ciclo;
8. Os poluentes que saem da combustão no incinerador, são direcionados para o sistema de lavagem e filtros no ponto 9, e sendo liberados pela chaminé no ponto 10.

Figura 10 – Ciclo a vapor do sistema.



Fonte: Carneiro (2015).

2.6.5. Análise exergetica do sistema

Consiste em analisar a quantidade máxima de trabalho possível de se obter do sistema, quando este entra em equilíbrio com sua vizinhança. Exergia consiste em quantificar o potencial de uso, está a qual não é preservada e sim destruída dentro do sistema. “Desta forma, a análise térmica ou energética reflete a Lei da Conservação de Energia, já a análise exergetica determina a quantidade de exergia perdida em razão das irreversibilidades do sistema [...].” (CARNEIRO, 2015, pg 82).

- Irreversibilidade interna: atrito e transferência de calor dentro do sistema;
- Irreversibilidade externa: transferência do calor para a vizinhança.

Para esta análise assume-se as seguintes hipóteses, de acordo com Carneiro (2015):

- Operação em regime permanente;
- Cada componente é modelado de acordo com o volume de controle;
- Os gases do ciclo a gás são modelados como ar;
- A energia cinética e potencial não varia (serão valores desprezíveis);
- A vizinhança é constituída por água e ar nas seguintes condições:
- Compressores, condensadores, bombas e turbinas operam adiabaticamente;

- Perdas de calor pelas paredes da caldeira de recuperação;
- Perdas de calor pelas paredes do incinerador desprezíveis.

Para o cálculo da exergia adota-se como um sistema ideal, ou seja, será definido como um valor de exergia positivo ou igual a zero.

$$\psi_d = \psi_{entrada} - \psi_{saída} \quad (4)$$

Determina-se então a irreversibilidade do sistema analisado, será calculado as potências exérgicas de fluxo, para todos os pontos dos ciclos a gás e a vapor.

O quadro 6 mostra a exergias do ciclo a gás referente a cada ponto.

Quadro 6 – Exergias de fluxo do ciclo a gás.

PONTOS	T (°c)	P (bar)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg)	ψ (kJ/kg)	ψ (kW)
1	20	1,01	293,6	6,84	0	0
2	581	29,39	881,73	6,99	545,91	67.059,94
3	1252	29,24	1.665,86	7,66	1.131,88	141.485
4	455	1,31	743,9	7,71	197,6	24.700,59
5	600	1,31	903,1	7,9	298,47	65.585,19
6	150	1,01	414,8	7,21	22,73	4.995,44

Fonte: Adaptado Carneiro (2015).

São calculadas a exergia no ciclo a vapor, para isso considera-se três novos pontos. O ponto “gin” representa as condições do ambiente próximo à região de chama durante a combustão no incinerador. A temperatura é aproximada pela temperatura da chama de combustão, próxima de 1400°C. O ponto “win” e “wout” representam as condições de entra e saída da água do condensador para refrigeração (CARNEIRO, 2015).

O ponto 9 representa os gases de combustão do lixo do incinerador na saída. A vazão destes depende da vazão mássica do lixo e de ar que adentram o incinerador auxiliando a combustão do lixo com excesso de ar dos valores de 100 a 200%. Para esta situação fazer a análise da usina proposta por Carneiro foi utilizado o valor de 110%. Assim com a vazão mássica do lixo, podendo calcular a vazão mássica do ar utilizado como apresentado no Quadro 7 (CARNEIRO, 2015).

Pode-se calcular as destruições de exergia devido às irreversibilidades internas, as fontes de irreversibilidade externa são correspondentes à perda de exergia para o ambiente

externo, ou seja, a exergia perdida com o sistema da água de refrigeração do condensador, com os gases de exaustão do incinerador e da caldeira de recuperação (CARNEIRO, 2015).

De acordo com Vilella (2007), a eficiência exergética é definida como sendo a razão entre exergia total que sai pela exergia que entra.

$$\varepsilon = \frac{\psi_{produto}}{\psi_{combustivel}} \quad (5)$$

Onde:

$\psi_{produto}$: potência exergética que sai do volume de controle como produto útil;

$\psi_{combustivel}$: potência exergética que entra no volume de controle para uso no processo como combustível.

Quadro 7 – Exergias de fluxo do ciclo a vapor.

PONTOS	T (°c)	P (bar)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg)	Ψ (kJ/kg)	Ψ (kW)
1	0,1	45	188,4	0,64	4,08	291,99
2	107	46	201,9	0,65	15,09	1.079,12
3	105	90	385,00	1,19	40,51	2.896
3'	103	313,2	1.420,00	3,38	431,75	30.873,35
4	100	311,1	2.725	5,61	1.082,14	77.380,35
5	97	538	3.474	6,74	1.502,23	107.419,19
6	3	133,5	2.706,30	6,95	673,26	48.142,60
7	2	239,6	2.950	7,67	705,01	50.413,11
8	0,15	53,41	2.530,60	7,81	243,69	17.426
gin	1,01	1.400	1.847	8,74	996,71	87.500,01
9	1,01	200	475,8	7,33	40,32	8.832,43
win	4	25	105,2	0,37	0,44	1.190,59
wout	1,5	40	167,7	0,57	2,79	7.476,19

Fonte: Adaptado Carneiro, 2015.

2.6.6. Análise termoeconômica do sistema

São muitos os aspectos que devem ser levados em consideração para a tomada de decisões sobre um investimento, tanto como do ponto de vista técnico como também do ponto econômico. O funcionamento de uma análise econômica se baseia em matemática

financeira, cujo a qual se refere ao valor (dinheiro) ao tempo, o que é válido quando se fala de projetos que envolvam o consumo de energia (SALES, 2008).

Alguns pontos importantes para o estudo econômico:

- É inútil avaliar a vantagem de se comprar um motor avista se não há forma de se conseguir dinheiro para sua compra. Verificar a existência de alternativas de investimentos;
- Essas alternativas devem ser expostas de forma monetárias para que seja possível ter uma base de comparação;
- Avaliar as diferenças das alternativas, pois é o ponto relevante delas;
- Considerar os custos do capital investido, ou seja, seus juros;
- É inviável avaliar o passado, pois o que vale é o presente e futuro.

“Num primeiro momento, são considerados os aspectos econômicos do investimento. Pergunta-se se o investimento é rentável. Aplicando corretamente os critérios econômicos, sabem-se quais os investimentos que rendem mais, ou seja, como aplicar o dinheiro de maneira a obter o maior retorno. Mas de nada adianta conhecer a rentabilidade dos investimentos se não há disponibilidade de recursos próprios e possibilidade de se obterem financiamentos.” (SALES, 2008, pg 54).

2.6.7. Métodos de análise econômica de projetos

A metodologia de análise muda de acordo com o investidor e os objetivos, mas indiferente a isso, constitui-se de indicadores que permitem a comparação por diferentes critérios.

Valor presente líquido

Este método avalia um projeto transferido para o momento presente todas suas variações de caixas esperadas de um período do projeto, sendo descontado as taxas mínimas de atratividade. “Em outros termos, o método VPL corresponde ao transporte para a data zero do fluxo de caixa de todos os recebimentos e desembolsos esperados, descontados à taxa de juros considerada.” (SALES, 2008).

Projetos com valores positivos de VPL são atraentes aos investidores, pois significa que os valores de fluxos de caixa presentes que ocorrem durante o tempo de análise são superiores ao investimento inicial (SALES, 2008).

Taxa interna de retorno

Está é a taxa onde os juros para as receitas de um projeto são iguais às expensas, em outras palavras, a TIR é a taxa de juros que faz com que o VPL do projeto seja nulo. Também pode ser subentendida como a taxa de remuneração do capital empregado para o projeto. “A TIR deverá ser comparada com a taxa de atratividade para se decidir pela aceitação ou não de um projeto. Se a TIR for menor que a taxa de atratividade, o projeto deverá ser descartado.” (SALES, 2008).

Método do tempo de retorno

Este método compara as rendas com os custos determinando o período de tempo mínimo que leva para recuperar o patrimônio investido inicialmente, tem em consideração a remuneração (juros)(SALES, 2008).

Custo da energia conservada

De acordo com Sales (2008), este método é muito útil quando se refere à comparação entre os projetos de geração e conservação de energia, isto é, representa custos realizados em novas tecnologias para economizar uma unidade de energia.

Eficiência ecológica do sistema

Mediante comparações entre emissões dos principais poluentes, a eficiência ecológica é um indicador de desempenho ambiental para avaliar o impacto que essas emissões causam em uma termoelétrica.

Com base na proposta de CARNEIRO (2015), escolheu o seguinte indicador:

$$N_{eco} = \left\{ \frac{0,204 N_{tot} \ln (135 - IP)}{N_{tot} + IP} \right\} \quad (6)$$

Onde N_{eco} é eficiência ecológica, IP é o indicador de poluição e N_{tot} é a eficiência térmica do ciclo combinado, 38%.

“A eficiência ecológica (N_{eco}) pode variar de 0 a 100%. Um sistema com $N_{eco}=0\%$ indica uma situação indesejada (máxima poluição); por outro lado, $N_{eco}=100\%$ indica uma situação ideal (poluição zero). Calculou-se, a eficiência ecológica do sistema proposto obtendo-se $N_{eco}=89\%$. Outros autores avaliaram a eficiência ecológica de sistemas termelétricos, operando com ciclos combinados, a diesel e gás natural e obtiveram valores de 91% e 94%, respectivamente. “ (CARNEIRO, 2015).

De acordo com Carneiro (2015), ciclos operando em ciclos combinados apresentam eficiência ecológica aproximada de 91% e 94%. Porém devido a heterogeneidade do lixo, apresenta um maior nível de poluição atmosférica se comparado ao gás natural. “Sendo assim, comparando uma planta operando somente com gás natural e um operando com lixo, a segunda deverá apresentar uma menor eficiência ecológica. “(CARNEIRO, 2015, pg 90).

Substituindo os valores de concentração dos RSU e GN é possível determinar a eficiência ecológica através da Equação 6, obtendo o valor de 89%.

Com este indicador, é possível incluir o valor investido nos sistemas de prevenção e controle da poluição atmosférica.

Atualização dos custos e investimento total

Um dos fatores que mais atuam na mudança de preços é o efeito inflação/deflação, porém existem índices que podem normalizar preços de épocas diferentes (BOHEM, 1987).

$$Custo X = \frac{Custo Y * índice X}{índice Y} \quad (7)$$

Onde:

Custo X: custo da data de interesse;

Custo Y: Custo da data de referência;

Índice X: índice na data de interesse;

Índice Y: índice na data de referência.

Para o valor total de investimento inicial (Z_{in}), deve incluir os custos diretos e indiretos do projeto, estes os quais incluem instalações, tubulações, instalações elétricas, custos com engenheiros, construção civil e imprevistos. O custo total de investimento é todo gasto efetivo no processo de implantação, estes podem ser determinados de duas formas: a primeira é baseada nos custos dos equipamentos e a segunda em parâmetros operacionais da planta (BRANCO, 2005).

Os gastos com manutenção envolvem consertos, troca de equipamentos, lubrificação, limpeza, etc. Estes custos são estimados em função do custo total do investimento inicial (CARNEIRO, 2015).

Adota-se as possíveis equações, de acordo com cada uma das fontes para fazer está estimativa:

- Silveira (1990): $Z_{man1}=8\%Z_{in}$ e $Z_{op1}=2\%Z_{in}$;
- Branco (2005): $Z_{man2}=3\%Z_{in}$ e $Z_{op2}=2\%Z_{in}$.

Onde:

Z_{manX} : Custos de manutenção;

Z_{opX} : Custos operacionais;

Z_{in} : Investimentos iniciais.

No caso de um modelo de usina WTE, os custos operacionais envolvem também o valor de coleta e separação dos RSM.

O Quadro 8 mostra o percentual a ser destinado em aterro após a incineração, caso não haja nenhum outro reaproveitamento.

Quadro 8 – Percentuais mássicos a serem destinados em aterros.

Escória	Materiais não combustíveis	Cinzas
20,1%	1,7%	3,6%

Fonte: Adaptado Carneiro, 2015.

A maior parte da massa dos RSU são transformadas em cinzas, de acordo com Hester e Harrison (1994), aproximadamente 75%, fazendo com que apenas 25% dos da massa do RSU seja encaminhado para aterros.

Como pode ser analisado no Quadro 10, a maior parte dos resíduos produzidos na incineração são escória, ou seja, cinzas de fundo, que podem ser descartadas em aterros de classe 2. As cinzas são coletadas nos equipamentos de controle de poluição, sendo assim resíduos perigosos, tendo de ser descartados em aterros de classe 1. Os materiais não combustíveis, são materiais que podem ser doados para reciclagem, como por exemplo peças metálicas e sucatas (CARNEIRO, 2015).

“Supõe-se que: os materiais não combustíveis sejam doados, que o custo de destinação final dos resíduos Classe II seja US\$ 20/t (CEMPRE 2010) e que o custo de destinação dos resíduos Classe I seja US\$ 25/t. Desta forma, o custo de destinação a ser pago pela usina para destinação de seus resíduos de combustão e materiais não combustíveis (Cdest) é de cerca de US\$ 2 milhões de dólares anuais. ” (CARNEIRO, 2015, pg 103).

O preço da geração de energia é prioritário em investimentos de fontes geradoras. Considera-se o custo de geração (CG) medido em (\$/MWh).

Para este avalia-se os seguintes pontos, amortização do investimento inicial, manutenção, operação, destinação dos objetos mássicos e combustível (CARNEIRO, 2015).

A energia produzida é vendida nos leilões de energia para companhias de transmissão, para as empresas que utiliza combustíveis não gratuitos, como hidroelétricas, calcula-se o índice de custo benefício – ICB. Sendo que aquele que possuir o menor valor é o mais viável para compra.

3. DESCRIÇÃO DOS MODELOS DE WTE

3.1. Usina WTE de Zabalgardi

A usina WTE de Zabalgardi apresenta o modelo de dois ciclos, cujo qual apresenta a maior eficiência de trabalho. Está utiliza os dois ciclos, a gás e a vapor como já descrito anteriormente.

O ciclo combinado pode operar separadamente ou de modo combinado, em caso de operação separada o importante ressaltar que a temperatura do gás na turbina é superior a temperatura ambiente, sendo assim esse gás possui utilidades termodinâmicas importantes, podendo ser reaproveitado economicamente (CARNEIRO, 2015).

A forma mais empregada é na câmara de reaproveitamento, para aquecer o ar do compressor antes de encaminhá-lo para o combustor, e assim não perder temperatura no processo. Como os ciclos são combinados, tendo assim um recuperador de calor de vapor é possível atingir um nível de eficiência maior que se operassem separadamente.

Como já mencionado, ela fica localizada na cidade de Bilbao, Espanha (EU), o que já opera grandes diferenças numa comparação com estudos de usinas WTE para o Brasil, pois os RSU's produzidos apresentam propriedades diferentes, uma dessas propriedades é o PCI que varia de região e temperatura.

No Quadro 9 é apresentado dados do ciclo a gás da usina de Zabalgardi.

O Quadro 10 mostra algumas propriedades do ciclo a vapor.

Com os valores dos quadros é possível notar num diagrama de temperatura e entropia específica do ciclo de gás, a perda de energia ocorrida durante todo o processo (CARNEIRO, 2015).

A usina de Zabalgardi utiliza um incinerador grelha para queima dos RSU, o PCI do lixo incinerado em Zabalgardi possui o valor de 8MJ/kg, isso de acordo com informações referentes ao ano de 2005 (CNIM, 2005).

É utilizados turbinas de classe H, estas com o ciclo de potência combinado podem atingir 60% de aproveitamento térmico. Essa classe de turbinas pode ser empregadas

tanto no ciclo a gás quanto a vapor, também são empregadas em geradores de vapor e de recuperação de calor. É possível alcançar uma geração de aproximadamente 600MW com combustíveis como gases naturais, com RSM pode conseguir atingir uma eficiência próxima de 35% (EPE, 2014).

Quadro 9 – Propriedades e parâmetros do ciclo a gás obtidos a partir de literatura.

SIGLA	SIGNIFICADO	VALOR
T_4	Temperatura na saída da turbina a gás	455°C
W_{netTG}	Potência líquida do ciclo a gás	43000kW
Q_{cc}	Potência térmica fornecida pelo GN	103,08MW
w_{tg}	Trabalho específico da turbina a gás	921,96kJ/kg
N_{cc}	Eficiência térmica da câmara de combustão	97%
N_{cg}	Eficiência térmica do ciclo a gás	42%

Fonte: Adaptado Carneiro (2015).

Nota-se que a eficiência térmica calculada do ciclo a gás é de 42%.

Quadro 10 – Propriedades do ciclo a vapor da usina WTE de Zabargarbi.

SIGLA	SIGNIFICADO	VALOR
PCI	Poder calorífico inferior do RSU	8000kJ/kg
m_{lixo}	Vazão mássica de resíduos no incinerador	33 t/h
$W_{gás}$	Potência total gerada no ciclo a gás	56,18MW

Fonte: Adaptado Carneiro (2015).

O vapor saturado mante-se numa temperatura aproximada de 310°C e com pressão de 100 bar, o qual é produzido no boiler conectado ao incinerador, esse incinerador possui a capacidade de queimar dentre 28 e 33 t/h de RSU e trabalha com uma temperatura menor e pressão maior do que aplicada em outras usinas do gênero. A queima do gás se faz em três pontos, sendo elas no combustor na parte do ciclo a gás, na caldeira de recuperação e também no incinerador para manter a temperatura elevada.

3.2. WTE proposta por Carneiro

O estudo feito por Carneiro teve como finalidade o uso eficiente de RSU para aproveitamento e geração de energia elétrica.

Em comparação com o RSU da Espanha, o lixo brasileiro apresenta um PCI maior, sendo de 16 MJ/kg referente ao ano de 2005 (CNIM, 2005). O incinerador ideal para esse estudo foi o incinerador tipo grelha, assim como o da usina de Zabalgardi.

Separando os ciclos, é possível gerar aproximadamente 43MW de energia elétrica no ciclo a gás e aproximadamente 84MW no ciclo a vapor, tendo um percentual de eficiência de 32% com ambos ciclos combinados. O qual é um rendimento maior do que o obtido do poder calorífico da usina de Zabalgardi (CARNEIRO, 2015).

Esse percentual inferior deve-se a quantidade de perdas de temperatura nos equipamentos da usina e a quantidade de RSU processado, pois o estudo feito por Carneiro (2015), consegue produzir uma quantidade maior de energia elétrica com uma incineração maior de RSU, mas em via de comparação, se fosse possível incinerar a mesma quantidade de RSU na usina de Zabalgardi seria possível atingir um nível superior de produção de energia elétrica.

Mesmo com esse percentual inferior ainda é uma margem dentro do aceitável, pois devido a geração se dar através da queima de RSU, está na faixa de produção de energia elétrica de usinas termelétricas, que geralmente ficam entre 22% e 40%.

“Como observado [...], o fato da temperatura de entrada do compressor ser maior no Brasil que na Espanha é uma desvantagem em relação ao nosso sistema, uma vez que o ar mais quente é menos denso e mais difícil de comprimir, o que demanda maior trabalho do compressor e, portanto, maior consumo de gás natural para manter mesma potência elétrica gerada na turbina a gás nas duas plantas (43MW). “ (CARNEIRO, 2015, pg 81).

O Quadro 11 apresenta a quantidade de energia elétrica gerada e a eficiência térmica do ciclo combinado.

Quadro 11 – Energia gerada e Eficiência térmica.

SIGLA	SIGNIFICADO	VALOR
Wtot	Potência elétrica gerada nas turbinas	127,89MW
Wnet	Potência elétrica líquida	126,92MW
Ntot	Eficiência térmica do ciclo combinado	32%

Fonte: Adaptado Carneiro, 2015.

De acordo com Carneiro (2015) a usina proposta por ela em seu estudo é capaz de processar aproximadamente 13% do RSU total produzido na cidade do Rio de Janeiro, isso é equivalente a aproximadamente 1170t/dia, equivalente a 8 cidades de Lages da região serrana de Santa Catarina.

O Quadro 12 apresenta dados em MW produzido nos ciclos e porcentagem de exergia dos recursos e ciclos.

Quadro 12 – Potências exergéticas.

	Potência exergética	MW	%
Combustível (393,64W/100%)	Gás natural na câmara de combustão	103,08	26
	Gás natural no queimador adicional	78,12	20
	Lixo	212,44	54
Saindo como produto (127,07MW/32%)	Turbina a vapor de alta pressão	54,08	43
	Turbina a vapor de baixa pressão	29,99	24
	Turbina a gás	43	34
Saindo como perda externa (20,10MW/5%)	Gases de exaustão da caldeira de rec.	4,99	25
	Gases de exaustão do incinerador	8,83	44
	Água de refrigeração do condensador	6,28	31
Saindo como perda interna (246,43MW/63%)	Câmara de combustão	28,66	12
	Queimador adicional	37,24	15
	Bomba	0,18	0
	Turbina de alta pressão	4,38	2
	Turbina de baixa pressão	3	1
	Condensador	10,85	4
	Compressor	5,19	2
	Turbina a gás	1,54	1
	Caldeira de recuperação	26,4	11
Incinerador	129	52%	

Fonte: Adaptado Carneiro, 2015.

Como é perceptível, grande parte da energia exergética é perdida sendo a maior parte no incinerador. Agora no Quadro 13 é possível fazer uma comparação adequada referente a quantidade de recursos processadas em um modelo exemplo como o estudado por Carneiro e um modelo existente de Zabargarbi, tirando assim as conclusões em relação a implantação de tecnologia para o Brasil.

O Gráfico 5 apresenta uma comparação de investimentos da usina estudada por Carneiro, com a usina de zabargarbi.

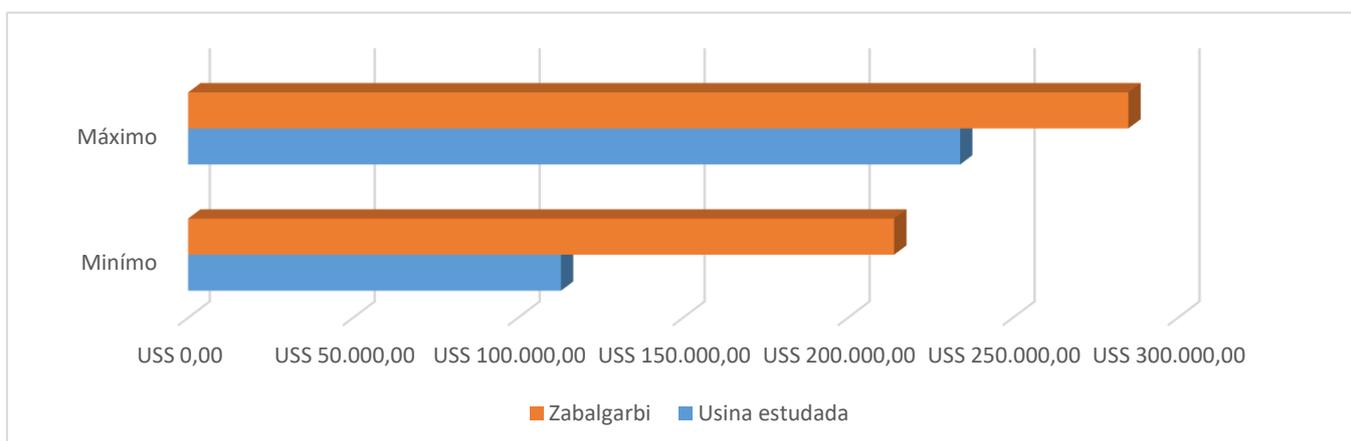
Os custos da usina estudada por Carneiro (2015), ficaram próximos de US\$ 113 e 214 milhões em 2015, com valor equivalente de US\$ 285-542 por tonelada de RSU, apresentando valor competitivo com as usinas de Zabargarbi.

Quadro 13 – Comparação de parâmetros da usina Zabalgarbi e o modelo estudado por Carneiro.

Parâmetro	Usina Zabalgarbi	Usina estudada
Capacidade de processamento de resíduos	33t/h	48 t/h
Vazão de gás natural consumido	13870 Nm ³ /h	17795 Nm ³ /h
PCI dos resíduos	8000 kJ/kg	16000kJ/kg
PCI do gás natural	38992 kJ/Nm ³	47730 kJ/kg
Potência elétrica da turbina a gás	43MW	43MW
Potência elétrica total gerada	99,18MW	127,89MW
Temperatura ambiente do ar	~7°C	20°C
Eficiência térmica do ciclo combinado	42%	32%

Fonte: Adaptado Carneiro, 2015.

Gráfico 5 – Comparação de investimentos da usina WTE estudada por Carneiro e Zabalgarbi.



Fonte: Adaptado Carneiro, 2015.

Calculou-se os seguintes custos como mostrado no Quadro 16, da usina estudada por Carneiro (2015):

Quadro 16 – Custo CG.

Cenário mínimo (CG _{Min})	Cenário médio (CG _{Med})	Cenário máximo (CG _{Máx})
44,06 [US\$/MWh]	57,36 [US\$/MWh]	69,77 [US\$/MWh]

Fonte: Adaptado Carneiro, 2015.

O Quadro 17 mostra a comparação da usina estudada por Carneiro com uma usina que utiliza apenas o ciclo simples, onde depende apenas dos RSU's para queima e geração de energia elétrica.

Quadro 17 – Comparação de gastos com coleta e processamento dos RSU do estudo de Carneiro.

Usina	PCI lixo	Eficiência	Processamento	Investimento	Valor da energia	Preço de destinação
Usina RSU	6,3 MJ/kg	18,50%	657,000 t/ano	US\$ 90 milhões	US\$ 50/MMWh	US\$ 27/t
Usina estudada	16 MJ/kg	32%	395,306 t/ano	US\$ 113-210 milhões	US\$ 44-70/ MWh	< US\$ 25/t

Fonte: Adaptado Carneiro, 2015.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados e comparados alguns aspectos na geração de energia pelo uso de resíduos sólidos, demonstrando que o Brasil perde muitos recursos devido à falta de investimento e administração de suas matérias primas. Também foi estudado a viabilidade econômica e ambiental desse tipo de geração de energia elétrica.

Foram apresentadas características de um sistema híbrido, que foi avaliado durante a pesquisa como o sistema mais eficiente para implantação, pois comparado com sistemas de incineração apenas do lixo, mostrou que pode se obter uma eficiência, ou melhor, um aproveitamento maior da energia do lixo utilizando um sistema combinado.

Com base nisso foi explanado opiniões públicas sobre o conhecimento dessa tecnologia, visto sobre trabalhos de conscientização da população com os cuidados do lixo, estudado o sistema de aterros, coleta e distribuição dos RSUs, comparado com modelos existentes e propostas, apresentando dados e cálculos das fontes obtidas.

A proposta de Carneiro (2015) para implantação desta tecnologia utilizava 54% de RSU para geração de energia elétrica, processando 48t/h de RSU (372mil t/ano).

Se comparado com a atual situação do Brasil, onde apresenta um valor de reaproveitamento do lixo quase nulo, mostra-se viável a implantação desta tecnologia. Os aterros demonstram irregularidades, além de ocuparem uma faixa territorial muito superior e inutilizar áreas próximas, pois não podem haver habitações nas redondezas, apresentam custo elevado para implantação e administração.

Análises ambientais determinam os fatores de emissão dos gases poluentes emitidos por plantas de WTEs apresentam valores dentro do permitido por lei.

Em caso do município onde for instalada a usina arcar com os gastos de fornecimento do lixo, torna a proposta de implementação dessa tecnologia ainda mais viável para investidores.

E diferente de casos como aterros sanitários, pode-se utilizar como fonte de faturamento apenas a venda da energia elétrica gerada, onde seria necessário cobrar uma taxa para coleta e destinação dos RSM.

Com as análises econômicas pode-se notar que envolvem inúmeros investimentos necessários para implantação desta tecnologia, chegando a um valor aproximado de 113-214 milhões de dólares, pela proposta de Carneiro (2015).

Outra diferença, é que enquanto for utilizado aterros, não há um payback, ou seja, sem recuperação do capital investido para construção do aterro, enquanto no caso da proposta abordada, haveria recuperação do capital investido no prazo de 11 anos com o custo de geração calculado em US\$ 44-70/MWh (CARNEIRO, 2015).

Com isso pode-se concluir a viabilidade de utilização desta tecnologia no país, desde sendo utilizada como unidade de geração de energia, destinação dos RSU, aproveitamento do espaço utilizado como também para geração de emprego e capacitação da população.

REFERÊNCIAS

- AKATU. Disponível em: < www.akatu.org.br/noticia/volume-de-lixo-produzido-no-brasil-aumentou-17-em-2015/>. Acesso em: 15 de abril, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro. 2004.
- BRASIL: O TERCEIRO PAÍS QUE MAIS GERA LIXO. Disponível em: <www.leonardoboff.wordpress.com/2015/04/17/brasil-o-terceiro-pais-que-mais-lixo-gera/> Acesso em: 23 de out, 2018.
- BOHEM, R. F. *Design analysis of thermal systems*. New York: John Wiley & Sons Inc., 1987.
- BRANCO, F. P. *Análise termoeconômica de uma usina termelétrica a gás natural operando em ciclo aberto e em ciclo combinado*. Ilha Solteira: UNESP - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2005.
- CARNEIRO. M. *Análise termoeconômica e ambiental de uma usina de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos - Estudo de caso da planta de Zabalgardi/Bilbao adaptada para a realidade brasileira*. Rio de Janeiro, RJ: PUC, 2015
- CARNEIRO, Maria L. N. M. “*Controle da Poluição Atmosférica na Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos com Geração de Energia*. ” Relatório: Monografia de Graduação, Engenharia Ambiental, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2011.
- CAIXETA, D. *Geração de Energia Elétrica a partir de lixo urbano: O caso de Campo Grande/MS*. Brasília: Universidade de Brasília - Centro de Desenvolvimento Sustentável, 2005.
- CEMPRE. *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado*. São Paulo: CEMPRE, 2010.
- CNIM, *Constructions Industrielles de la Méditerranée* -. “Biskaia Waste to Energy Plant Project. ” Summary Report, 2005.
- EMPREGO DAS CINZAS DO BAGAÇO DA CANA NA CONSTRUÇÃO CIVIL. Disponível em: < www.usp.br/portabiossistemas/?p=74> Acesso em: 24 de out, 2018.
- EPE (Empresa Brasileira de Pesquisas Energéticas). <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoesabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao>. Acessado em 17 de Abril de 2019.

251/topico-311/DEA%2018%20-%20%20Invent%C3%A1rio%20Energ%C3%A9tico%20de%20Res%C3%AAduos%20S%C3%B3lidos%20Urbanos[1].pdf

HESTER, R. E., e R. M. HARRISON. *Waste Incineration and the Environment*. Royal Society of Chemistry, 1994.

KOMILIS, D.; et al. 2012. *Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes*. *Waste Management*, v. 32, p. 372-381.

KOMILIS, D.; EVANGELOU, A.; GIANNAKIS, G.; LYMPERIS, C. 2012. *Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes*. *Waste Management*, v. 32, p. 372-381.

KANASHIRO, M. *A cidade e os sentidos: sentir a cidade*. *Desenvolvimento e meio ambiente*, Curitiba, n.7, p. 159-164, jan/jul 2003.

MALINAUSKAITE, J, et al. *Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe*. Europe, Elsevier, 2017.

MANAUS GERA 72 MIL TONELADAS DE LIXO POR MÊS E REALIDADE SEGUE COMO AMEAÇA A RECURSOS NATURAIS. Disponível em: <g1.globo.com/am/amazonas/manaus-de-todas-as-cores/2017/noticia/manaus-gera-72-mil-toneladas-de-lixo-por-mes-e-realidade-segue-como-ameaca-a-recursos-naturais.ghtml>. Acesso em: 23 de out, 2018.

MENIKPURA, S.N.M. & BASNAYAKE, B.F.A. 2009. *New applications of “Hess Law” and comparisons with models for determining calorific values of municipal solid wastes in the Sri Lankan context*. *Renewable Energy*, v. 34, p. 1587-1594.

METROPOLITAN TORONTO WORKS DEPARTMENT. *Solid Waste Management Division*. [s.d.]. *Your guide to waste reduction and recycling in metropolitan Toronto*. Toronto. [s.l.].

OLIVEIRA, L.B. & ROSA, L.P. 2003. *Brazilian waste potential: energy, environmental, social and economic benefits*. *Energy Policy*, v. 31, p.1481-1491.

PANORAMA ABRELPE. Disponível em: < abrelpe.org.br/panorama/ >. Acesso em 22 de abril, 2019.

PEREIRA, D. et al. “ *Energy potential generated by urban solid wastes in lages-sc: evaluation of its cost-benefits* “. *IJDR*, vol 8, 2018.

PORTAL BIODIVERSIDADE BRASIL. Disponível em: <www.usp.br/portalbiodiversidade/?p=74>. Acesso em: 23 de maio, 2019.

RESOLUÇÃO CONAMA N° 358/2005 - “*Dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos dos serviços de saúde e dá outras providências*“ Data da legislação 29/04/2005 – Publicação DOU n° 084, de 04/05/2005, págs. 63-65.

RIBEIRO, S. G., e Tyler Kimberlin. “High Efficiency Waste to Energy Power Plants Combining Municipal Solid Waste and Natural Gas or Ethanol.” Proceedings of the 18th Annual North American Waste-to-Energy Conference. Orlando: NAWTEC18, 2010. 7.

SILVA, E., Junior, S., TONELLI, J. and MARTINS, G. 2014. *Estimativa do potencial de conversão energética de resíduos sólidos urbanos através do processo de incineração*. Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente, 18(6), 09-16.

SOARES, Erika Leite de Souza Ferreira. *Estudo da Caracterização Gravimétrica e Poder Calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2011.

VILLELA, I. A., e J. L. Silveira. “*Ecological efficiency in thermoelectric power plants.*” Applied Thermal Engineering, 04 de 2007: 840-847.

ZABALGARBI. Disponível em: <www.zabalgarbi.com/es/quienes-somos/zabalgarbi-sa/>. Acesso em: 15 de maio, 2019.