

LUIS GUILHERME DINIZ MARTINS

**Análise da viabilidade técnico-econômica para implantação de uma unidade de
processamento de polímeros, provenientes dos resíduos sólidos
urbanos, através da pirólise**

Luis Guilherme Diniz Martins

**Análise da viabilidade técnico-econômica para implantação de uma unidade de
processamento de polímeros, provenientes dos resíduos sólidos
urbanos, através da pirólise**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Nazem Nascimento
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins

M386a	Martins, Luis Guilherme Diniz Análise da viabilidade técnico-econômico para implantação de uma unidade de processamento de polímeros provenientes dos resíduos sólidos urbanos, através da pirólise / Luis Guilherme Diniz Martins – Guaratinguetá, 2021. 55 f : il. Bibliografia: f. 52-55 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021. Orientador: Prof. Dr. Nazem Nascimento Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins 1. Polímeros. 2. Resíduos sólidos. 3. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). I. Título. CDU 628.54
-------	--

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

LUIS GUILHERME DINIZ MARTINS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO



Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. NAZEM NASCIMENTO
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
UNESP-FEG



Dr.ª MARTA LEITE DA SILVA NASCIMENTO
Membro Externo

Dedico este trabalho à minha mãe Simonia, ao meu irmão Luis Gabriel e a Vikttória que sempre acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço com todo o meu coração a Deus, que me ouviu e me trouxe paz em todos os momentos mais difíceis, que sem ele eu não conseguiria ter chegado até aqui. Agradeço a toda minha família que sempre confiou em mim, especialmente a minha mãe que mesmo me criando sozinha nunca, permitiu que me faltasse nada, sendo meu exemplo de dedicação e esforço. Ao meu irmão que esteve junto comigo ao longo de toda minha vida me incentivando sempre. A Vikttória Olivia, uma mulher que é um exemplo a ser seguido, tanto como pessoa quanto como profissional dedicada à sua área, e esteve comigo e me apoiou ao longo de toda a trajetória me ajudando emocionalmente quando mais precisei. Aos meus amigos que fizeram parte dessa história (Bruno, Guilherme, Felipe Cruz e Thaisa Ferreira) dispostos sempre a ajudar, e a encarar essa batalha de frente junto a mim. Ao meu orientador Nazem Nascimento pela disposição e tranquilidade para me orientar de uma maneira efetiva e justa. E agradeço também a todos os meus professores que fizeram parte da minha jornada até aqui, desde o ensino fundamental até a graduação, cada um à sua maneira, tem uma parte que ficou marcado na minha pessoa, tanto na forma de ser, como na forma de pensar. Um agradecimento a FEG e todos os seus colaboradores, instituição de alto nível que me proporcionou um crescimento e aprendizagem que levarei por toda a minha vida. Para a execução desse trabalho agradeço aos colaboradores da SAEG e da WEG, que foram extremamente solícitos e me passaram informações que tiveram extrema importância para os resultados. Obrigado!

“A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido e não na vitória propriamente dita”

Mahatma Gandhi

RESUMO

Com o crescimento acelerado da humanidade nas últimas décadas, tem aumentado de forma acelerada a produção, por parte da população, de materiais descartáveis, orgânicos e inorgânicos, recicláveis e não recicláveis, chamados de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Assim, surge o desafio para dar um fim adequado para essas toneladas de lixo que se acumulam em locais abertos e contaminam tanto o solo quanto a população. Países desenvolvidos já tratam a maior parte de seus rejeitos, mas países como o Brasil tem uma margem de crescimento muito grande para a implementação de tecnologias que sejam capazes de processar todos esses materiais, sejam de origem orgânica ou provenientes do petróleo como a infinidade de plásticos e borrachas sintéticas que são produzidas. Este trabalho tem como objetivo apresentar a tecnologia da pirólise, explicar seus princípios de funcionamento, seus tipos e custos e apresentar empresas que estão situadas no país que detêm esta tecnologia, especialmente para o processamento de polímeros. Como resultado, o trabalho pretende apresentar o planejamento de uma unidade de Pirólise para uma cidade de porte médio, usando como exemplo o município de Guaratinguetá, estado de São Paulo.

PALAVRAS-CHAVE: Pirólise. RSU. Polímeros. Unidade de processamento.

ABSTRACT

With the fast growth of humanity in recent decades, has accelerated the production of disposable materials by the population, organic and inorganic, recyclable and non-recyclable, called Urban Solid Waste (USW). Thus, the challenge arises to give an adequate end to those tons of garbage that accumulate in open places and contaminate both the soil and the population. Developed countries already deal with most of their waste, but countries like Brazil have a very large growth margin for the implementation of technologies that are capable of processing all these materials, whether of organic origin or derived from oil such as the multitude of plastics and synthetic rubbers that are produced. This work aims to present the technology of pyrolysis, explain its principles of operation, its types and costs and present companies that are located in the country that own this technology, especially for the processing of polymers. As a result, the paper intends to present the planning of a pyrolysis unit for a medium-sized city, using as an example the city of Guaratinguetá, state of São Paulo.

KEYWORDS: Pyrolysis. USW. Polymers. Processing unit.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Composição do RSU segundo IPEA.....	18
Figura 3.1 – Ilustração do RSU tratada termicamente até a energia elétrica	22
Figura 3.2 – Porcentagem de distribuição de venda de Resinas em 2005	24
Figura 4.1 – Porcentagem referente a disposição do RSU no ano de 2018 no Brasil	27
Figura 4.2 – Quantitativo do RSU em Guaratinguetá-SP de 2016 a 2019 em ton	28
Figura 4.3 – Quantitativo de resíduo reciclável coletado nos anos de 2017 a 2019.....	29
Figura 5.1 – Planta de Pirólise lenta a tambor rotativo ilustrado pela INNDRRA	31
Figura 5.2 – Imagem ilustrativa de como funciona a FDS da ZEG	32
Figura 5.3 – Sistema de câmaras da planta de gaseificação da WEG.....	33
Figura 5.4 – Planta de gaseificação da WEG	33
Figura 5.5 – Matrizes energéticas do mundo.....	34
Figura 5.6 – Matrizes energéticas do Brasil	34
Figura 5.7 – O custo do MWh em R\$, por região do Brasil em doze meses	36
Figura 5.8 – Preços médios do R\$/MWh praticados no Sudeste de 2003 a 2020.....	36
Figura 5.9 – Preços médios do R\$/MWh estimado para os próximos 20 anos.....	37
Figura 6.1 – Custos com salários e encargos trabalhistas da planta da WEG	41
Figura 6.2 – Custo mensal dos funcionários + encargos da planta da WEG em 20 anos	42
Figura 6.3 – Valor de manutenção anual ao longo de 20 anos	43
Quadro 7.1 – Fluxo financeiro para a planta de Pirólise do ano 1 ao ano 5.....	46
Quadro 7.2 – Fluxo financeiro para a planta de Pirólise do ano 6 ao ano 10.....	46
Quadro 7.3 – Fluxo financeiro para a planta de Pirólise do ano 11 ao ano 15.....	47
Quadro 7.4 – Fluxo financeiro para a planta de Pirólise do ano 16 ao ano 20.....	47
Quadro 7.5 – Fluxo financeiro para a planta de Gaseificação do ano 1 ao ano 5	48
Quadro 7.6 – Fluxo financeiro para a planta de Gaseificação do ano 6 ao ano 10.....	49
Quadro 7.7 – Fluxo financeiro para a planta de Gaseificação do ano 11 ao ano 15.....	49
Quadro 7.8 – Fluxo financeiro para a planta de Gaseificação do ano 16 ao ano 20.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Fatores que afetam os produtos da Pirólise	21
Tabela 3.2 – Dados dos 10 maiores produtores de lixo plástico do mundo	25
Tabela 6.1 – Tabela que resume as potências e capacidade das plantas	39
Tabela 6.2 – Valores totais do custo das plantas em R\$.....	40
Tabela 6.3 – Custo operacional dos 3 módulos de 47 toneladas	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABREN	Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos
BEN	Balanco Energético Nacional
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FDS	<i>Flash Dissociation System (Sistema de Dissociação Rápida)</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia)
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
ISWA	<i>International Solid Waste Association</i> (Associação Internacional de Resíduo Sólido)
ONU	Organização das Nações Unidas
PMGIRS	Plano Municipal de Gestão Integral dos Resíduos Sólidos
PVC	Policloreto de Vinila
RLU	Resíduos de Limpeza Urbana
RSC	Resíduos de Estabelecimentos Comerciais e Prestadores de Serviço
RSD	Resíduos Sólidos Domiciliares
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RV	Resíduos Verdes
RVol	Resíduos Volumosos
SAEG	Companhia de Serviços de Água, Esgoto e Resíduos de Guaratinguetá

LISTA DE SÍMBOLOS

kWh	Kilo Watt hora
°C/s	Graus Celsius/segundo
°C	Graus Celsius
s	Segundos
ton	Toneladas
ton/dia	Toneladas por dia
min	Minutos
kg	Kilograma
MW	Mega Watts
MWh	Mega Watts hora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS.....	16
1.2.1	Objetivo geral.....	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
1.3	METODOLOGIA.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3	PIRÓLISE.....	20
3.1	INTRODUÇÃO.....	20
3.1.1	Tipos de pirólise	20
3.1.2	Produtos da pirólise	21
3.1.3	Do material à energia, através da pirólise.....	22
3.2	A GASEIFICAÇÃO	23
3.3	TRATAMENTO DE DERIVADOS DO PETRÓLEO.....	23
3.3.1	Polímeros ao redor do mundo	24
4	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	26
4.1	INTRODUÇÃO.....	26
4.2	PANORAMA DOS RSU EM GUARATINGUETÁ	27
4.2.1	Levantamento sobre os RSU referente aos anos de 2016 a 2019	28
5	TECNOLOGIAS DE PROCESSAMENTO DOS RSU.....	30
5.1	INTRODUÇÃO.....	30
5.2	EMPRESAS QUE DETÊM A TECNOLOGIA	30
5.2.1	INNDRÁ Energia e Resíduos.....	30
5.2.2	ZEG Ambiental	31
5.2.3	INNOVA Energias Renováveis	32
5.2.4	WEG.....	32
5.3	MATRIZ ENERGÉTICA NO BRASIL.....	34
5.3.1	Custo da eletricidade no Brasil.....	35
6	ANÁLISE DOS CUSTOS DAS UNIDADES DE PIRÓLISE.....	38
6.1	INTRODUÇÃO.....	38
6.1.1	Capacidade de geração de energia	38
6.1.2	Custos de implantação	39

6.1.3	Custos operacionais e imposto sobre lucro	40
6.1.4	Vida útil.....	44
6.1.5	Payback	44
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
7.1	INTRODUÇÃO.....	45
7.2	ANÁLISE DE TODOS OS DADOS PARA GUARATNGUETÁ E REGIÃO ...	45
8	CONCLUSÃO.....	51
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

A humanidade teve ao longo de sua história pontos específicos que alteraram sua direção, o que ocorreu desde o descobrimento do fogo até a revolução industrial; esse último ponto aumentou consideravelmente o poder de produção de produtos finais em larga escala, sendo que algum tempo depois veio a ser descoberto o petróleo que viria a se tornar uma das maiores fontes de energia do mundo e matéria prima para diversos produtos e a população mundial se aproveitou desse novo recurso de forma como nunca havia acontecido antes com nenhum outro material.

A junção do petróleo com a engenhosidade humana foi capaz de dar vida a um material que está presente de forma constante na vida de todas as pessoas, o plástico, material este que pode ser moldado em diversas formas por meio de alteração na temperatura e pressão ao qual está submetido; esse material é composto por monômeros que agrupadas em grande escala dá origem aos polímeros (PETRUCCI, 1976), e que pode ser encontrado em diversas formas seja por meio do poliestireno, polietileno, PVC, poliamidas (nylon), poliéster e borrachas sintéticas. Embora esses materiais sejam de extrema importância e com infinitas funcionalidades, a produção em larga escala trouxe problemas, pois os derivados do petróleo não se decompõem com facilidade na natureza, levando séculos para que isso ocorra (RAHMANI et al., 2013); além disso, o material que é descartado se acumula em toneladas e toneladas, isso alinhado com um crescimento demográfico do mundo segundo a ONU indo de aproximadamente 2,5 bilhões para 6 bilhões na segunda metade do século XX. Este crescimento acarretou uma produção exponencial de alimentos, que são desperdiçados nas casas e vão para o lixo; isso, juntamente com os plásticos no Brasil, segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada IPEA (2017), correspondem a 73,9% do que é denominado Resíduos Sólidos Urbanos ou pela sigla RSU. Estes rejeitos da sociedade, muitas vezes não tem destino correto e podem acabar contaminado todo o ambiente e o seres vivos do local em que são depositados (ACCIOLY & SIQUEIRA, 2000).

Tendo em vista o problema que o mundo encarava pela frente, surgiram soluções para tentar minimizar de forma eficiente os danos causados por esses resíduos sem causar nem um dano às comunidades e ao ambiente (MORAES et al., 2015), sendo a Pirólise uma das soluções para o tratamento destes resíduos. Trata-se de um processo termoquímico que consiste na degradação térmica da matéria na ausência ou deficiência de oxigênio (KAMINSKY e SINN, 1996), um processo no qual um material como o polímero é colocado dentro de um reator, recebe calor e tem suas moléculas quebradas e com isso a matéria se

divide em três estados diferentes sólido, líquido e gasoso (BLATZSÓ, 1997), materiais estes que podem ser aproveitados cada um à sua maneira.

Embora a tecnologia já exista e seja difundida ao redor do mundo, ela se encontra predominantemente em países desenvolvidos. O Brasil segundo a Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (ABREN) recicla seu lixo majoritariamente de forma mecânica e que tem um potencial muito grande para utilizar da Pirólise para o processamento de seus RSU, algo de extrema importância para o país, pois cada vez mais cresce o anseio por energias limpas e de fontes que não terão fim a longo prazo, algo que resolveria dois problemas: o excesso de lixo e a introdução de mais uma tecnologia na matriz energética limpa para o parque energético brasileiro.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com o crescimento da produção de Resíduos Sólidos provenientes de origem biológica, química ou de fontes não renováveis como o petróleo, no Brasil e ao redor do mundo, a busca por uma solução para eliminar esses resíduos vem sendo estudada e implantada ao longo dos anos. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) no ano de 2018 foram gerados 79 milhões de toneladas de RSU (Resíduos Sólidos Urbanos); desse total 40,5% não tiveram um destino adequado, ou seja, 20,5 milhões de toneladas foram simplesmente despejados em lixões ou aterros controlados (ações consideradas crimes ambientais desde agosto de 2014). Portanto, esse estudo tem sua importância por se tratar de uma análise técnico-econômica para a implementação de uma unidade de processamento por Pirólise, um método interessante como opção para eliminar os resíduos, e que gera três produtos diferentes que podem ser reaproveitados: o bio-óleo que pode ser utilizado como um biocombustível devido seu alto poder calorífico, gases como hidrocarbonetos, hidrogênio, CO e CO₂ e carvão que pode ser usado como filtro para metais pesados e materiais orgânicos em indústrias, para tratar os efluentes, substituindo o carvão ativo comercial. E quanto mais estudos e mais análises estiverem relacionadas ao tema em epígrafe no âmbito acadêmico, aumentam-se as chances de estar mais perto de uma solução que seja viável economicamente e possível de ser implantada em larga escala em regiões do território nacional.

1.2 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo apresentar o funcionamento da Pirólise mostrando sua estrutura, para que funciona, sua capacidade de processar derivados do petróleo, quais são os produtos finais, suas vantagens e desvantagens dando embasamento teórico para que seja analisado o benefício da tecnologia que poderia ser utilizada no Brasil em larga escala.

1.2.1 Objetivo geral

De forma geral o trabalho tem como propósito atingir em âmbito nacional todas as cidades do Brasil, dando uma solução aos RSU, que compreendem principalmente polímeros e materiais orgânicos, visto que a lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010) determina a elaboração do Plano Municipal de Gestão Integral dos Resíduos Sólidos (PMIGRS) para que os municípios tenham acesso aos recursos federais.

1.2.2 Objetivos específicos

De uma maneira mais específica o trabalho deve elucidar como funcionaria a tecnologia Pirólise, analisando a possibilidade de implantação de uma unidade de processamento no município de Guaratinguetá-SP onde está situada o campus da UNESP, o qual faço parte, justificando uma solução que melhoraria os padrões do município sendo feita uma análise técnico econômica da viabilidade de uma unidade de processamento que utiliza essa tecnologia.

1.3 METODOLOGIA

Primeiramente será feito um levantamento sobre o tema Pirólise, sendo realizada uma análise detalhada sobre o processo com todos os elementos técnicos necessários, que demonstrará as vantagens e as desvantagens, seguidas de uma explicação sobre as variações da tecnologia e quais são os produtos gerados pela mesma.

Posteriormente será dada uma ênfase aos derivados dos petróleos explicando o panorama dos polímeros ao redor do mundo e como eles podem ser processados pela Pirólise mostrando também o resultado disso, logo em seguida será dada uma explicação de modo geral do panorama de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil; depois de forma mais específica

será feita uma explicação da realidade do município de Guaratinguetá-SP referente aos anos de 2016, 2017, 2018 e 2019.

O próximo passo do trabalho é apresentar as tecnologias disponíveis no âmbito nacional, como funcionam e quais as empresas que detém a tecnologia, explicando um pouco o segmento de cada uma delas e qual a variação da tecnologia cada empresa utiliza.

Em seguida será feito um breve resumo das matrizes energéticas no Brasil explicando sucintamente cada uma e quanto custa o MWh, valor que será aplicado na análise final do trabalho.

Finalizando o trabalho, serão utilizados todos os dados apresentados no corpo do mesmo para identificar a viabilidade técnico-econômica da implantação de uma planta de Pirólise no município de Guaratinguetá-SP.

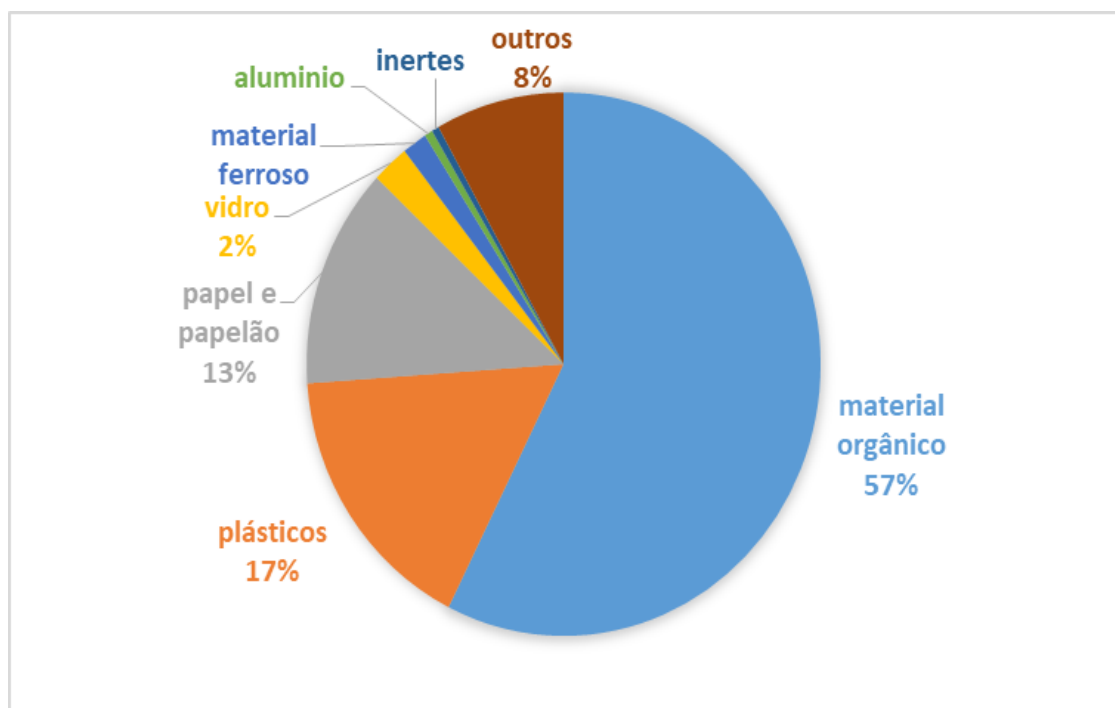
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A recuperação energética dos RSU, conhecida como *waste to energy*, nada mais é do que alguns métodos para obter parte da energia que fica contida nos RSU e pode ser reaproveitada. A composição do RSU tem uma grande influência na eficiência do sistema a ser empregado, como composição (mais ou menos material orgânico), poder calorífico e umidade. Dentre os métodos existentes os mais utilizados são: incineração *mass burning* (consiste em incinerar o material operando com excesso de oxigênio), tratamento mecânico biológico, Pirólise e gaseificação (são os processos que ocorrem em um ambiente sem ou pobre em oxigênio para a obtenção de energia) (ABREN, 2019).

Pirólise é o tema principal desse trabalho e consiste em uma tecnologia em que a decomposição térmica do material ocorre em uma atmosfera livre de oxigênio o que faz com que não exista produção de gases poluentes. Seguindo nessa mesma linha a gaseificação uma tecnologia que utiliza da Pirólise em seu processo também será abordada no escopo do trabalho.

Segundo dados do IPEA (2017), a maior parte do RSU é formado por plásticos e material orgânico conforme pode ser visto na figura 2.1.

Figura 2.1 – Composição do RSU segundo IPEA.



Fonte: Adaptado do IPEA (2017).

Como pode ser analisado na figura 2.1 os Polímeros representam 17% de todo o RSU produzido. A grande questão é que na maioria das vezes eles estão contaminados com material orgânico, logo o processo a ser utilizado seja a Pirólise ou a Gaseificação, deve ser capaz de tratar tanto os resíduos plásticos quanto os materiais orgânicos.

3 PIRÓLISE

3.1 INTRODUÇÃO

O termo Pirólise vem do grego (pur = fogo e luo = soltar) o que explica em palavras como funciona o processo que seria a decomposição térmica das matérias na ausência de oxigênio (KAMINSKY e SINN, 1996)

3.1.1 Tipos de pirólise

A Pirólise tem vários modelos de funcionamento, que diz respeito à velocidade de aquecimento, pressão dentro do reator, temperatura de trabalho, tempo em que a matéria processada e o gás de inertização; essas características são responsáveis por definir os tipos de Pirólises existentes (PARADELA, 2012).

Pirólise Lenta: é um processo que ocorre em baixa velocidade de aquecimento menor do que 2°C/s e não atinge temperaturas elevadas, não ultrapassando os 500°C; uma característica dessa modalidade é que o tempo em que o material fica dentro do reator é elevado, podendo variar de minutos até horas; esse tipo de pirólise tem como resultado um produto final majoritariamente sólido, como por exemplo a produção de carvão vegetal a partir da biomassa vegetal (O. ONAY & O. M. KOCKAR, 2003).

Pirólise Rápida: como o próprio nome diz é um processo que ocorre de forma rápida com um tempo de residência variando de 0,5 a 2,0 s; para que isso ocorra a velocidade de aquecimento tem que estar entre 10 a 200°C/s chegando a temperaturas intermediárias por volta de 600°C; nesse processo os vapores se tornam líquido rapidamente devido ao arrefecimento, produzindo por exemplo bio-óleo que pode ser utilizado como combustível (O. ONAY & O. M. KOCKAR, 2003).

Pirólise Instantânea: também conhecida como Flash Pirólise, esse tipo tem velocidade de aquecimento maiores que 1000°C/s com tempos de residência dentro do reator menor que 1,0s, fazendo como que a transferência de calor seja maximizada nessa modalidade (M. LANZETTA et al., 1997).

Gaseificação Pirolítica: é um processo que ocorre em temperaturas elevadas e tempo de residência no reator elevado, que utiliza da Pirólise para a obtenção de gases de síntese que posteriormente serão oxidados em um ambiente pobre em oxigênio e utilizados como combustível para obtenção de energia (JUNIPER CONSULTANCY SERVICES Ltd., 2001).

3.1.2 Produtos da pirólise

Vários são os fatores responsáveis para definir os produtos finais da Pirólise, como: material utilizado como matéria primária, temperatura do processo, velocidade em que ele ocorre, tempo que o material fica dentro do reator, tipo de reator, pressão da operação, se há ou não gases reativos dentro da câmara (como oxigênio e hidrogênio) e em qual estado se encontra líquido ou gasosa. Na tabela 3.1 pode-se verificar o efeito que cada fator causa na formação do produto final.

Tabela 3.1 – Fatores que afetam os produtos da Pirólise.

Fator	Efeito
Material utilizado	Estrutura e composição dos reagentes está diretamente relacionada ao Produto da Pirólise.
Temperatura/Velocidade	Quanto maior a temperatura e maior a velocidade do processo a quebra das ligações ocorre mais rapidamente o que favorece a produção de pequenas moléculas.
Tempo do processo	Tempos de residência elevado no reator favorecem uma conversão secundária, produzindo resíduos com maior teor de carbono, como produtos termicamente mais estáveis.
Tipo de reator	Responsável pela qualidade da transferência de calor, da mistura, dos tempos de residência de gases líquidos, e o grau de libertação de produtos primários.
Pressão da operação	Pressões mais baixas reduzem a condensação de fragmentos reativos formando mais resíduos carbonosos.
Oxigênio e hidrogênio na composição	Oxidações parciais ocorrem o que gera calor internamente, dilui os produtos e influencia equilíbrios, cinéticas e mecanismos.
Fase líquida ou gasosa	Quando a pirólise ocorre em fase líquida retarda a liberação dos produtos de reação, favorecendo interações posteriores.

Fonte: Adaptado de Paradella (2012).

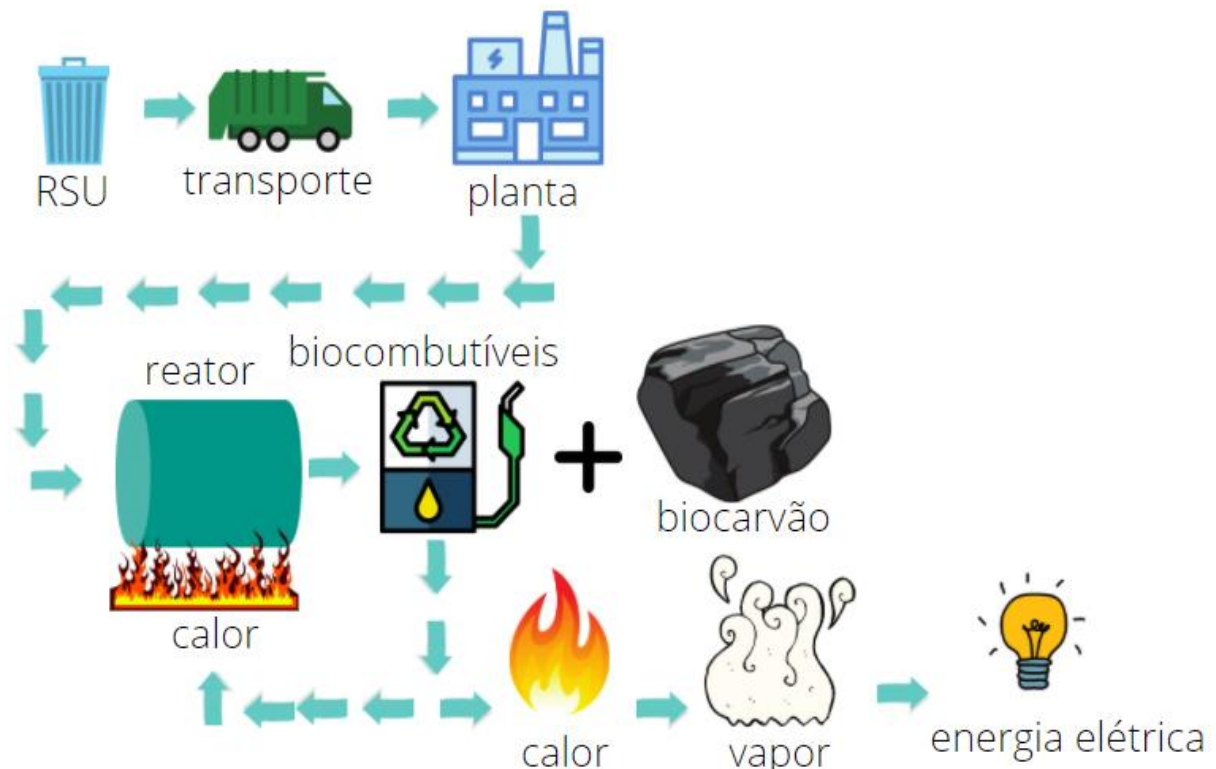
3.1.3 Do material à energia, através da pirólise

O passo a passo de como a Pirólise produz energia de forma simples vai ser explicado nesse subcapítulo.

Primeiro o material é coletado nas residências, fábricas, shoppings e levado para onde a unidade de processamento está localizada, posteriormente todo esse material deve ter sua umidade analisada preferencialmente não passando dos 30% (caso a umidade seja maior, toda essa matéria deve passar por uma secagem antes de iniciar o processo).

Dando início ao processo propriamente dito, todo esse material vai para dentro do reator que é aquecido por uma fonte externa de calor, lembrando que dentro desse reator não há oxigênio. De forma generalizada pode-se dizer que a partir desse aquecimento dos materiais, as partículas se quebram e formam três tipos principais de materiais um gás, um líquido e um sólido. O gás e o líquido são biocombustíveis e o sólido é um biocarvão, que pode ser utilizado como filtro de carvão ativo. Os biocombustíveis após esse processo de Pirólise, devem ser queimados para produção de calor, esse calor pode ser utilizado para produzir vapor e energia elétrica, uma forma ilustrativa do texto está na figura 3.1.

Figura 3.1 – Ilustração do RSU tratada termicamente até a energia elétrica.



Fonte: Próprio autor.

3.2 A GASEIFICAÇÃO

A gaseificação nada mais é do que a conversão termoquímica de um material sólido ou líquido em um combustível gasoso a partir da oxidação parcial a temperaturas elevadas e pressão em torno de 33 bar. O agente gaseificador pode ser o ar, vapor de água, oxigênio ou uma mistura de todos, em quantidades inferiores a exigida pela estequiometria (WARNECKE, 2000).

A gaseificação pode ser definida como um processo termoquímico que está localizado entre a combustão e a pirólise (WARNECKE, 2000). Na verdade pode-se dizer que ela é uma junção dos outros dois processos, pois ela inicia com a pirólise para a homogeneização do material que posteriormente passa por um gaseificador (atmosfera pobre em oxigênio) e finalmente o resultado desse gás combustível é queimado produzindo energia; a baixa emissão de poluentes e com os filtros de ar adequados a poluição não é minimizada ao máximo, podendo assim ficar localizada em grandes centros urbanos sem nenhum problema para a população, por se tratar de uma fonte de energia limpa.

3.3 TRATAMENTO DE DERIVADOS DO PETRÓLEO

Dentre todos os produtos provenientes do petróleo, o que se encontra em uma quantidade expressiva nos Resíduos Sólido Urbano são os polímeros. Como mencionado anteriormente Polímeros e Material Orgânico correspondem à 73,9% de todo o RSU produzido no Brasil (IPEA, 2017) no caso como os plásticos estão contaminados com material orgânico o tratamento poderá ser utilizado para a somatória dos diferentes tipos de materiais.

Algumas formas de dar um final menos danoso ao meio ambiente a esses plásticos são a reciclagem mecânica, o tratamento térmico e a reciclagem química que promovem um reaproveitamento energético.

A reciclagem mecânica é a forma mais simples para recuperar esses materiais e é também o tratamento de resíduos plásticos mais difundido no Brasil. O que acontece é que muitas vezes essa técnica não se torna economicamente sustentável, pois os resíduos que poderiam ser reciclados estão contaminados com material orgânico (ABRE, 2020).

Quando o material não se encaixa para a reciclagem mecânica ele deve ser reciclado quimicamente ou reaproveitando energeticamente em um tratamento térmico.

Um exemplo de tratamento térmico de baixo custo seria a incineração, porém ela tem como ponto negativo que é a mistura imperfeita de ar com o combustível, causando a emissão de produtos que vem da combustão incompleta, produtos esses que são prejudiciais ao ambiente.

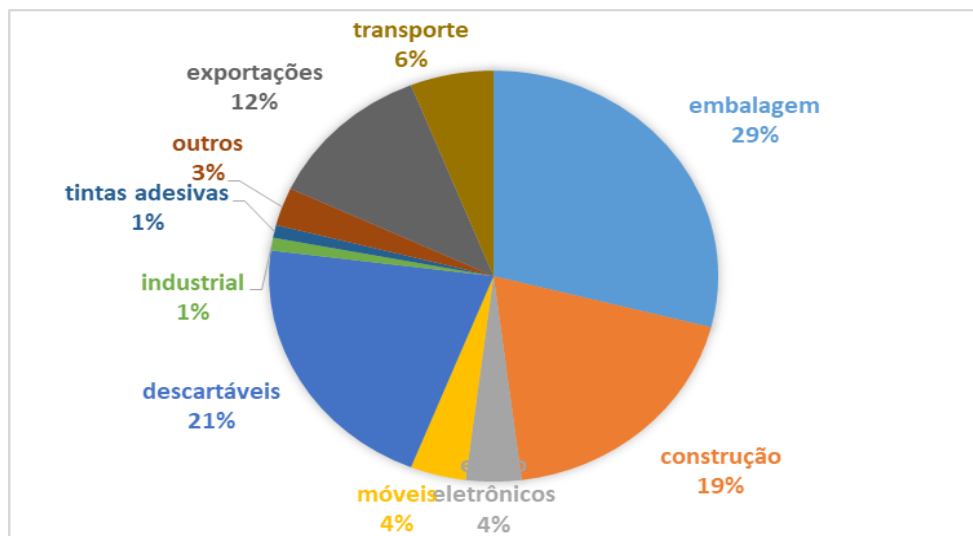
Uma solução seria os plásticos passarem por uma Pirólise, tornando tudo uma mistura gasosa homogênea que poderia ser utilizada como combustível. No caso da gaseificação a partir dessa mistura homogênea adicionar ar e esse novo combustível ao ser queimado, geraria uma baixa emissão de poluentes (PANAGIOTOU et al, 1996).

3.3.1 Polímeros ao redor do mundo

Os plásticos são um material leve, de baixa condutividade térmica e elétrica, resistente a corrosão e tem uma baixa taxa de degradação, além de que podem ser moldados em diversas formas, podendo se adequar a infinitas possibilidades, além de ter um baixo custo de produção. Um material com todas essas características citadas acaba sendo produzido em larga escala. Os Polímeros são formados por macromoléculas sintetizadas principalmente a partir do petróleo (ANDRADY, 2003)

Aproximadamente 30% dos plásticos são utilizados em embalagens e 21% em materiais descartáveis segundo o Conselho Americano de Plástico (APA- *American Plastic Council*) como pode ser visto na figura 3.2.

Figura 3.2 – Porcentagem de distribuição de venda de Resinas em 2005.



Fonte: American Plastic Council (2001-2005).

A produção desses Polímeros está concentrada principalmente em países mais populosos segundo como Estados Unidos, China, Índia e Brasil, segundo o Banco Mundial (*World Bank*, 2018) pode-se criar a tabela 3.2 onde é possível analisar muito bem qual o panorama mundial da produção e do tratamento dos 10 maiores gerados de resíduo plástico do mundo.

Tabela 3.2 – Dados dos 10 maiores produtores de lixo plástico do mundo.

País	Total de Lixo Plástico gerado	Total Incinerado	Total Reciclado	Relação reciclagem e produção
Estado Unidos	70.782.577	9.060.170	24.490.772	34,60%
China	54.740.659	11.988.226	12.000.331	21,92%
Índia	19.311.663	14.544	1.105.677	5,73%
Brasil	11.355.220	0	145.043	1,28%
Indonésia	9.885.081	0	362.070	3,66%
Rússia	8.948.132	0	320.088	3,58%
Alemanha	8.286.827	4.876.027	3.143.700	37,94%
Reino Unido	7.994.284	2.620.394	2.513.856	31,45%
Japão	7.146.514	6.642.428	405.834	5,68%
Canadá	6.696.763	207.354	1.423.139	21,25%

Fonte: Banco Mundial - What a Waste 2.0 (2018).

Como pode ser observado na tabela acima, o Brasil está muito atrás do restante do mundo, além de reciclarmos apenas 1,28% dos plásticos que são produzidos, o País não tem nenhuma forma de tratamento térmico para esses produtos, diferente de países como o Japão que embora recicle 5,68% do que produz, ele incinera aproximadamente 93% do que gera.

4 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

4.1 INTRODUÇÃO

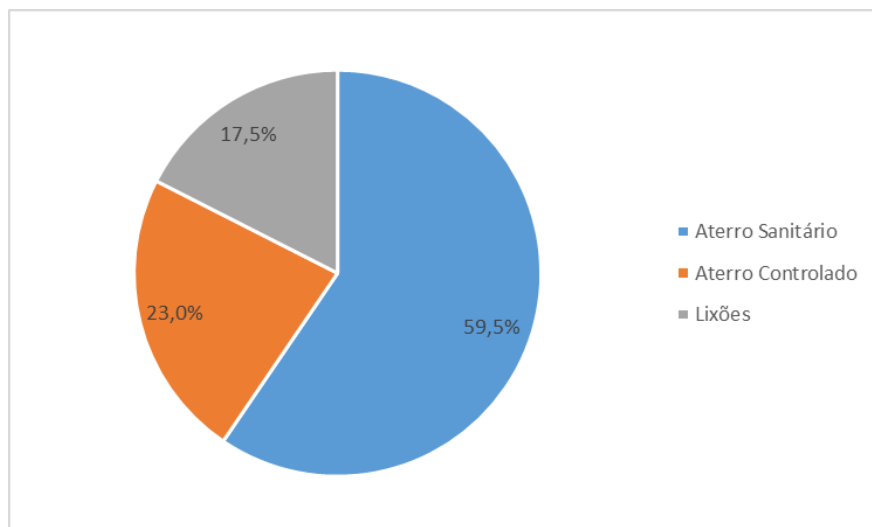
Atualmente, o mundo tem ao todo cerca de 7,7 bilhões de habitantes e a perspectiva é que esse número aumente para 9,7 bilhões até 2050 segundo a ONU (2019); com esse número sempre aumentando, o que é o caminho natural da humanidade, aumenta também um problema histórico do mundo, que são os Resíduos Sólidos Urbanos produzidos pelas pessoas; estes são compostos por matéria orgânica, plásticos, papel e papelão, vidros, materiais ferrosos, alumínio e outros diversos que são encontrados em uma menor proporção.

Segundo a ONU o mundo pode chegar a uma produção de 2,2 bilhões de toneladas de RSU em 2025, um valor extremamente alto de algo que teoricamente não tem valor para a sociedade, e ao longo da história sempre foi depositado em lixões ou queimado. O que se pode concluir disso é que não se gera nenhum valor com a eliminação dos RSU, e isso é crucial para um mundo que tem o anseio de se tornar cada vez mais sustentável, deixando de ver o lixo como um incômodo e passando a enxergá-lo como um recurso.

Se analisarmos a América Latina, uma parte do mundo que tem uma das maiores taxas de urbanização do mundo com 500 milhões de habitantes. Os principais problemas que acompanham esse movimento para as cidades são: mobilidade, segurança, saúde, bem-estar, saneamento e gestão adequada dos RSU. Nesse grupo é produzido diariamente 354 mil toneladas de RSU, do qual mais de 50% é de origem orgânica (ONU, 2017).

Chegando ao Brasil a situação se complica bastante com relação a disposição dos resíduos, tendo como base o último estudo da ABRELPE referente ao ano de 2018 os dados são o seguinte: 79 milhões de toneladas de resíduos foram geradas, 6,2 milhões não foram coletados juntos ao local de geração; do que foi recolhido 43,3 milhões teve o destino correto em aterros sanitários e o restante 29,5 milhões foi depositado em lixões ou aterros controlados atividades consideradas crimes segundo a Lei nº 9605 (sanções penais e administrativas derivadas de condutas lesivas ao meio ambiente). Os dados podem ser melhor visualizados na figura 4.1.

Figura 4.1 – Porcentagem referente a disposição do RSU no ano de 2018 no Brasil.



Fonte: Adaptado de Abrelpe (2019).

Lixões e aterros controlados não tem o sistema de controle necessário para proteger o meio ambiente nem as pessoas que lidam com o lixo; sendo assim o solo sofre lixiviação, os resíduos contaminam os recursos hídricos por meio de chorume e como são a céu aberto, produzem o gás metano (CH_4) que é 25 vezes mais nocivo para a camada de ozônio se comparado ao gás carbônico (CO_2) (THEMELIS et al., 2013); estas duas modalidades de disposição do lixo é considerada crime ambiental segundo a lei nº 9.605/98 (Lei de crimes ambientais). Quando se fala dos danos causados à população um estudo da ISWA, mostra que o Brasil gasta R\$ 1,5 bilhões por ano para tratar pessoas que tiveram um contato inadequado com os RSU.

Após todo esse panorama dado sobre os RSU pode se citar algumas soluções que já existem e são praticadas ao redor do mundo. Algumas só ocorrem em países desenvolvidos, como designer de produtos e embalagens para tornarem estes menores, reciclagem para reaproveitamento de materiais, ou até unidades de processamento como a compostagem orgânica ou a combustão dos RSU para aproveitamento energético, conhecidas como usinas *waste to energy*. Uma delas que está sendo abordada em todo o escopo desse trabalho é a Pirólise.

4.2 PANORAMA DOS RSU EM GUARATINGUETÁ

O município de Guaratinguetá-SP foi escolhido como modelo para se chegar aos resultados abordados no final desse trabalho, por se tratar do local onde a faculdade UNESP

está localizada. A cidade já tem um PMGIRS parcialmente elaborado e a partir desses dados é possível realizar o estudo sobre a viabilidade da implementação da unidade de processamento por Pirólise no município.

Segundo o PMGIRS de Guaratinguetá-SP no ano de 2018 foram coletadas 29643,41 ton de RSU com um custo médio de R\$ 224,17 por ton para o tratamento da coleta convencional, valor que passou para R\$ 196,48 a partir de novembro de 2018, após uma negociação com a empresa privada, responsável pelo tratamento do RSU do município.

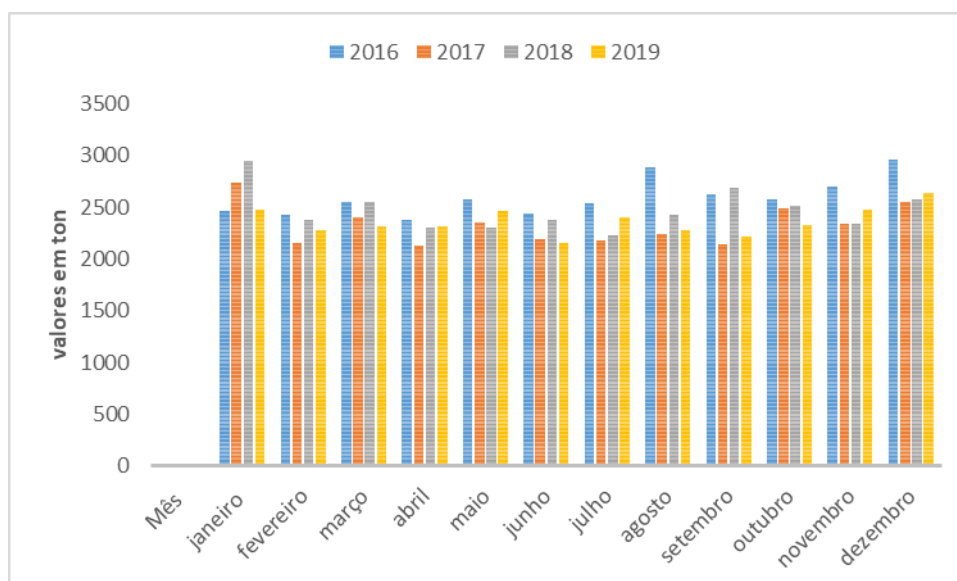
4.2.1 Levantamento sobre os RSU referente aos anos de 2016 a 2019

Nesse capítulo será feita uma análise detalhada sobre o RSU nos anos de 2016 a 2019 no município que está sendo analisado, salientando que todos os dados que serão exibidos foram retirados do PMGIRS Guaratinguetá ou de informações oficiais dadas por funcionários da Companhia de Serviços de Água, Esgoto e Resíduos de Guaratinguetá (SAEG).

Os RSU são compostos por Resíduos Sólidos Domiciliares (RSD), Resíduos de Limpeza Urbana (RLU), os Resíduos Verdes (RV) e Resíduos Volumosos (RVol) que são gerados nos serviços de limpeza pública e, também, os Resíduos de Estabelecimentos Comerciais e Prestadores de Serviço (RSC).

Segundo a SAEG os anos de 2016 a 2019 tiveram os seguintes valores em toneladas de RSU coletados, figura 4.2.

Figura 4.2 – Quantitativo do RSU em Guaratinguetá-SP de 2016 a 2019 em ton.



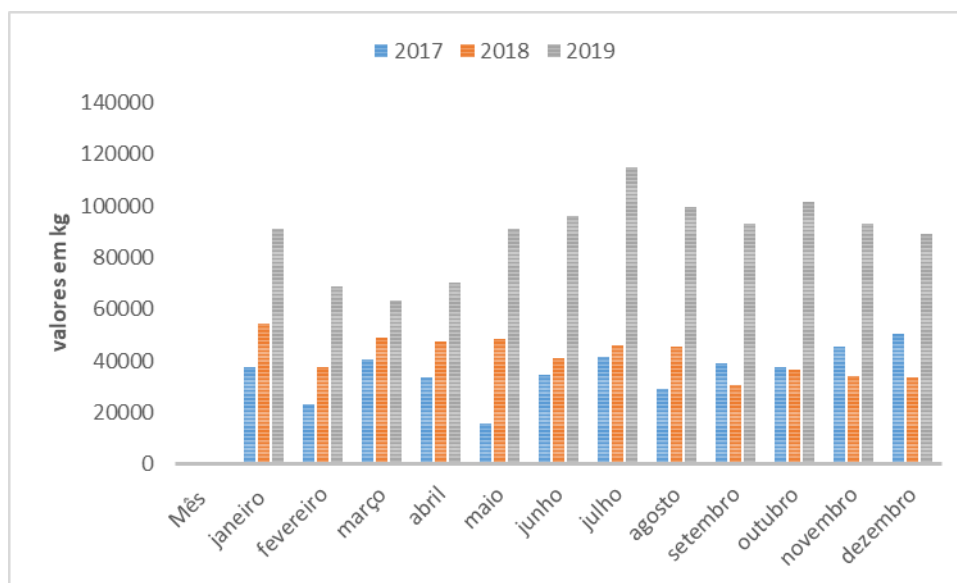
Fonte: SAEG (2019).

O ano base para a elaboração deste trabalho será a média diária dos últimos quatro anos, de 2016 a 2019. Em 2016 a coleta teve um quantitativo de 31.102,5 ton representado por uma média de 84,94 ton/dia; no ano seguinte o total coletado foi de 27.906,18 ton, equivalente a 76,46 ton/dia; em 2018 o valor total chegou a 29.643,41 ton com uma média diária de 81,21 ton/dia e, por fim, em 2019 a quantidade coletada foi de 28.340,84 ton chegando a um valor de 77,65 ton/dia.

O leitor pode se questionar sobre a coleta seletiva que o município tem; pois bem, as quantidades que são destinadas à reciclagem não estão nos montantes dos valores mencionados no parágrafo acima, pois a coleta dos recicláveis é dada de forma separada pela cooperativa “Amigos do Lixo” de Guaratinguetá e por catadores avulsos de material reciclável.

A coleta seletiva na cidade de Guaratinguetá-SP contempla a área urbana e os grandes geradores como: Shopping Buriti, Ecoponto, Parque Ecológico e grandes empresas, dentre outros. Nos anos de 2017 a 2019 pode se ver os valores coletados na figura 4.3.

Figura 4.3 – Quantitativo de resíduo reciclável coletado nos anos de 2017 a 2019.



Fonte: SAEG (2019).

A quantidade reciclada pelo município tem um valor bem interessante chegando a 430 ton em 2017, 506 ton em 2018 e um crescimento bastante elevado em 2019 chegando a 1.072 ton; porém não chega nem perto ao total que é depositado em aterro sanitário, como pode ser observado como exemplo o ano de 2019 onde o que é reciclado é aproximadamente 4% do total que é depositado em aterro.

5 TECNOLOGIA DE PROCESSAMENTO DOS RSU

5.1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo será apresentado algumas tecnologias relacionadas à Pirólise e quais empresas são responsáveis por quais tecnologias no Brasil. Como visto no terceiro capítulo exemplos como: pirólise lenta, pirólise rápida, *flash* pirólise e gaseificação pirolítica.

5.2 EMPRESAS QUE DETÊM A TECNOLOGIA

Falando no âmbito nacional, nesse capítulo serão apresentadas empresas que detêm soluções para RSU (material orgânico, inorgânico e derivados do petróleo) através da Pirólise.

Se olharmos para todos os países, quando comparado aos desenvolvidos, o Brasil está bem atrasado no quesito soluções para lidar com os rejeitos da sociedade.

É um avanço que já foi iniciado nessa última década e com certeza vai ser ampliado na próxima, podemos perceber isso com o surgimento de empresas que disponibilizam tecnologias para proporcionar esse avanço para a sociedade.

Durante a pesquisa foram encontradas quatro empresas que tem em seus sites de relação, ou através de contato direto, explicações de como o processo funciona e qual a tecnologia utilizada.

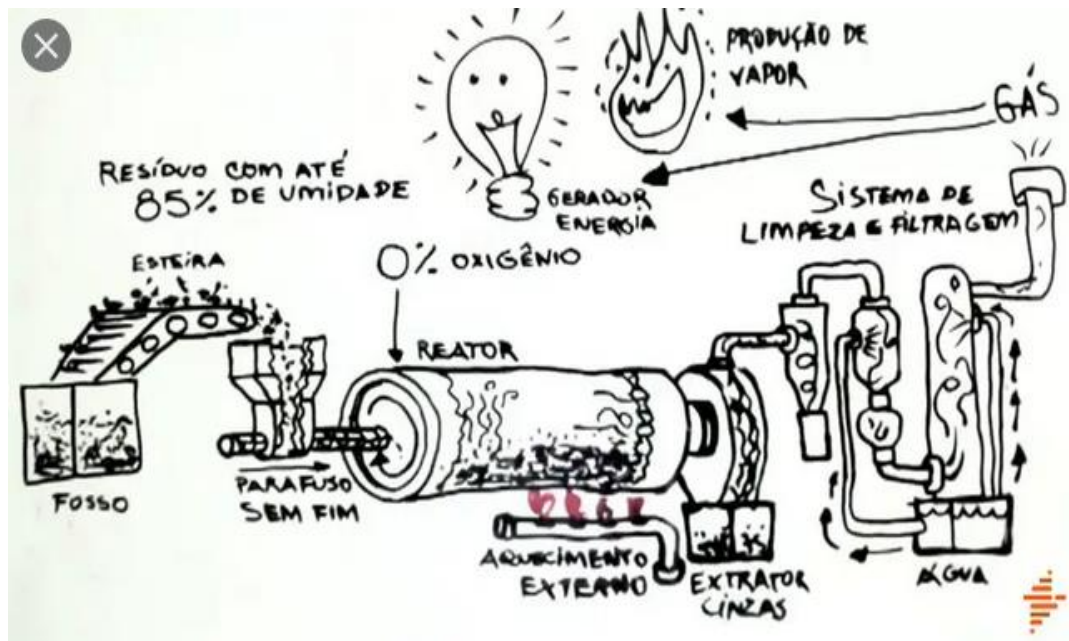
5.2.1 INNDRA Energia e Resíduos

Segundo o site de relações é uma empresa de consultoria voltada para a área de Energia e Resíduos, que tem em seu portfólio soluções para resíduos, energias provenientes de fontes renováveis e economia de energia com eficiência energética.

Trabalham com três tipos de tecnologia que buscam a sustentabilidade, energia de biomassa, gaseificação e pirólise.

A empresa adota como método para suas plantas a pirólise lenta a tambor rotativo que funciona em temperaturas entre 400°C e 850°C, onde o reator é aquecido externamente e o tambor é alimentado por um dos lados que gira lentamente e leva o material para o outro lado do tambor, como é possível verificar na figura 5.1; O processo dura entre 40 e 60 min.

Figura 5.1 – Planta de pirólise lenta a tambor rotativo ilustrado pela INNDRÁ.



Fonte: INNDRÁ Energia e Resíduos (2020).

5.2.2 ZEG Ambiental

Segundo o site a empresa tem uma forte tendência ambiental, seus objetivos estão voltados para criar soluções que irão reduzir os efeitos colaterais causados pelo uso de combustíveis fósseis na matriz energética de todo o mundo.

O significado da sigla de seu nome é “Zero Emission Generation”; é uma empresa que investe em projetos de fontes de energias renováveis, como produção de energia a partir de biogás, painéis solares, hidrelétricas e por meio da Pirólise.

A tecnologia que interessa ao escopo desse trabalho é a Pirólise ultrarrápida desenvolvida pela empresa chamada de Flash Dissociation System (FDSTTM), que pode ser destinada a produção de energia elétrica ou vapor, como pode ser visto na figura 5.2.

A escala dessa unidade de processamento pode variar de 1, 3 e 5MW e qualquer tipo de material pode ser pirolisado como: plásticos, RSU, biomassa e borracha.

Figura 5.2 – Imagem ilustrativa de como funciona a FDS da ZEG.



Fonte: ZEG Ambiental (2020).

5.2.3 INNOVA Energias Renováveis

INNOVA Energias Renováveis surgiu em 2011 com o intuito de atuar na área de energias renováveis, segundo o site TN Petróleo; atualmente a empresa detém a licença da tecnologia de Pirólise da empresa italiana Maim Engineering Srl. Que, assim como a INDDRA, utiliza a técnica da Pirólise lenta a tambor rotativo.

5.2.4 WEG

De todas as empresas citadas no trabalho a WEG provavelmente é a de maior história, surgiu na década de 60 e hoje atua em diversos ramos, tanto no âmbito nacional, quanto internacional. A empresa, em seu departamento voltado para a área de sustentabilidade, tem um projeto de gaseificação que utiliza da Pirólise em parte do seu processo como pode ser visualizado na figura 5.3, segundo o site da WEG.

Segundo contato direto com a empresa, é uma planta pronta com capacidade de processamento de 120 ton de RSU por dia com um custo de R\$ 62,5 milhões e uma capacidade de gerar até 3,3 MW por dia¹. Pode-se ver uma planta completa na figura 5.4 onde todo o processo pode ser descrito.

¹ Informação fornecida por Leonardo Parente Buranello em resposta ao contato com o email wte@weg.net no dia 23 de setembro de 2020.

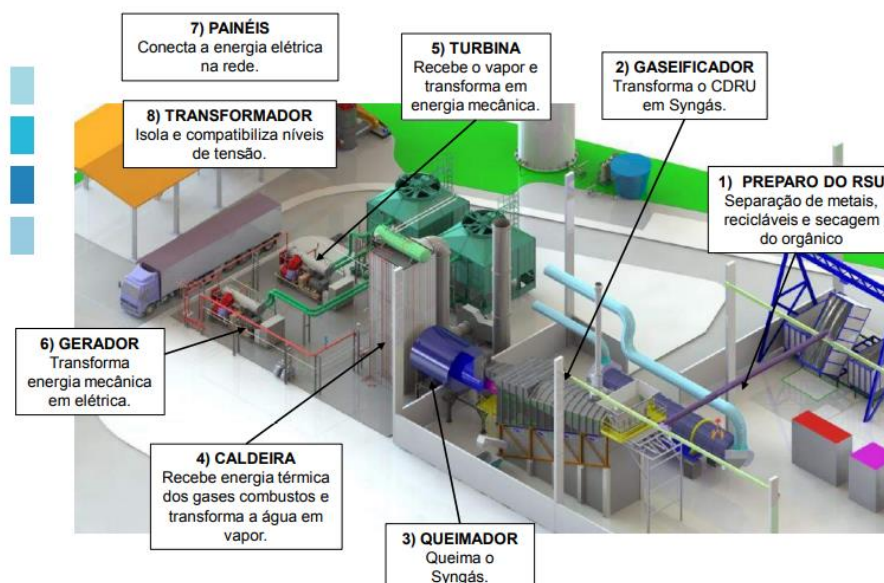
Figura 5.3 – Sistema de câmaras da planta de gaseificação da WEG.



Fonte: Canal no Youtube WEG S.A. (2020).

Primeiro é feito uma triagem onde se retira os metais e recicláveis, em seguida o RSU passa por uma pré-secagem até ser despejado no gaseificador sistema multi-câmaras onde irá passar por uma secagem, seguido de uma pirólise e, finalmente, gaseificado e reformado transformando todo o resíduo que entrou na câmara no que eles chamam de Syngás; depois disso esse gás se torna um combustível que vai ser queimado e a partir do calor gerado vai transformar água em vapor, assim como funciona em uma termoelétrica a única diferença é que o combustível não é de fonte fóssil e sim dos rejeitos da sociedade.

Figura 5.4 – Planta de gaseificação da WEG.



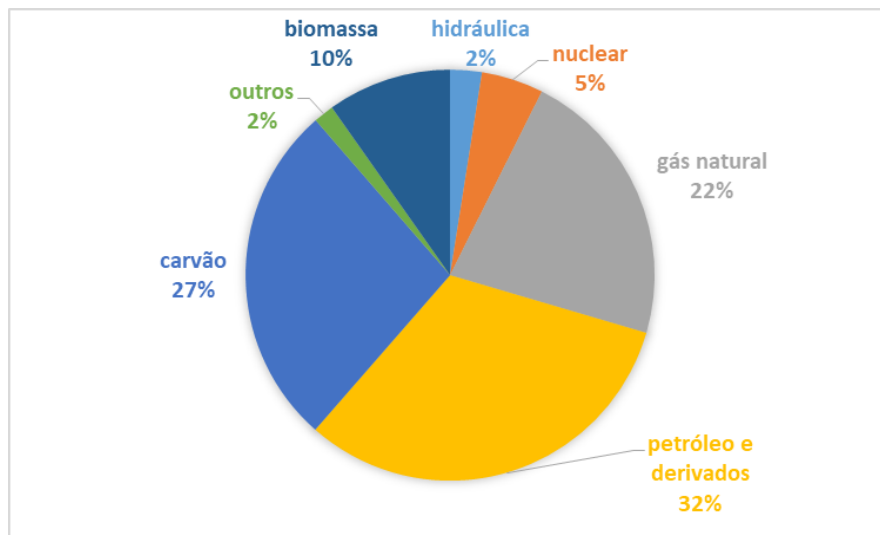
Fonte: Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (ABREN) (2019).

5.3 MATRIZ ENERGÉTICA NO BRASIL

O Brasil é um país que tem suas peculiaridades em diversos aspectos quando se comparado ao restante do mundo, e com respeito a forma como se obtêm energia não é diferente.

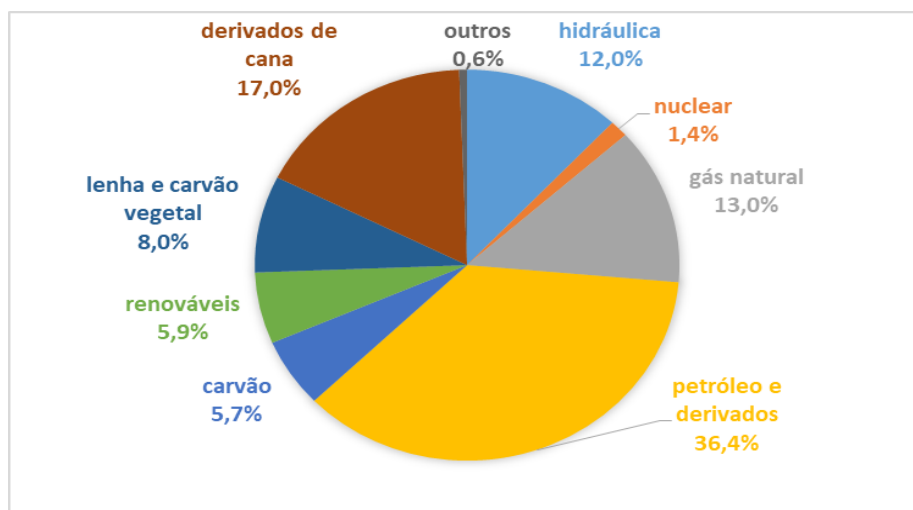
A matriz energética do mundo segundo a International Energy Agency (IEA, 2018) e do Brasil segundo o Balanço Energético Nacional (EPE, 2018) podem ser vistas e comparadas nos gráficos a seguir figura 5.5 e figura 5.6.

Figura 5.5 – Matriz energética do mundo.



Fonte: International Energy Agency (IEA) (2018).

Figura 5.6 – Matriz energética do Brasil.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2018).

Quando analisamos tanto o Brasil quanto o mundo o que chama a atenção é a presença majoritária de energia obtida através de petróleo e derivados. Quando se ouve os líderes mundiais falando, os discursos na maioria das vezes se alinham quando se trata da obtenção de energia, principalmente em dois aspectos.

O primeiro na obtenção de energia de uma fonte que não seja finita, e o segundo é de energias mais limpas que não liberam, ou liberam muito pouco gases do efeito estufa. Olhando para esses dois parâmetros a obtenção de energia através da Pirólise ou gaseificação pirolítica podem ser consideradas energias limpas, se pensarmos que o ser humano não vai parar de produzir rejeitos, pois isso é pouco provável, e essa forma de se obter energia libera de forma mínima, gases que aceleram o efeito estufa na atmosfera.

Embora em termos de quantidade de MW produzido mesmo que todo o RSU do Brasil passe por uma dessas unidades de processamento, isso não seria de longe o suficiente para ocupar o lugar do petróleo e seus derivados, porém essa solução agregada a várias outras, que estão em fases bem mais avançadas no Brasil, como a solar e a eólica, podem sim num futuro ocupar o espaço que hoje pertence aos derivados de petróleo, na matriz energética brasileira.

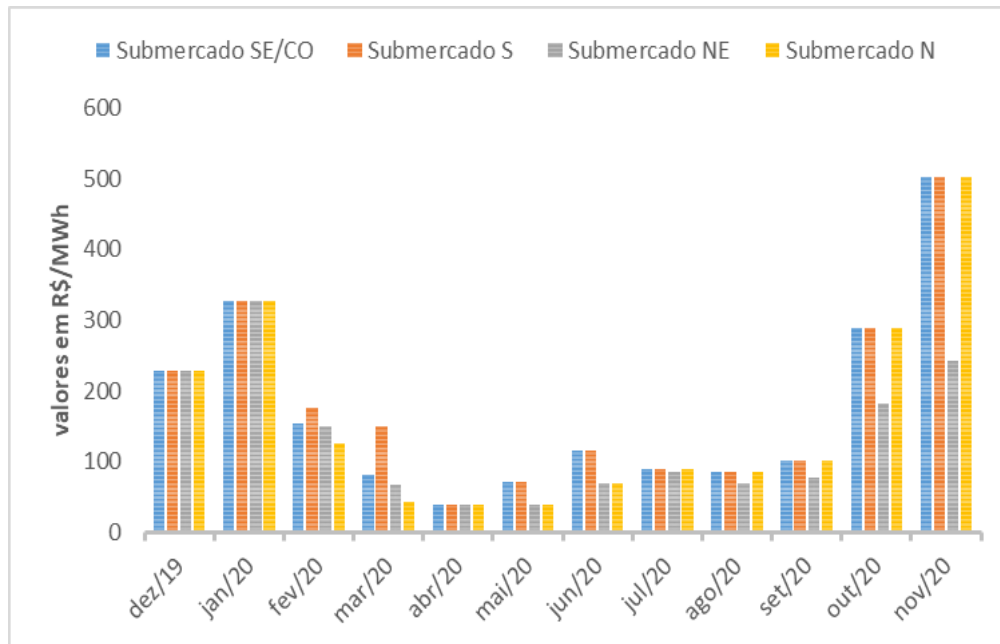
5.3.1 Custo da eletricidade no Brasil

Quando analisamos um país de proporções continentais como o Brasil, é de se esperar que o custo de qualquer coisa varie conforme a região, devido a diversos fatores, e a energia elétrica não está fora disso.

Um modelo matemático é utilizado para calcular, chamado PLD, que procura encontrar a solução ótima de equilíbrio entre utilização de energia proveniente de hidrelétrica e proveniente de termoeletrica (CCEE, 2020). Utilizaremos os valores dessas formas de energia pois são as mais consumidas no país.

Na figura 5.7 podemos identificar o preço médio por mês com relação a cada região do Brasil segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE, 2020).

Figura 5.7 – O custo do MWh em R\$, por região do Brasil em doze meses.

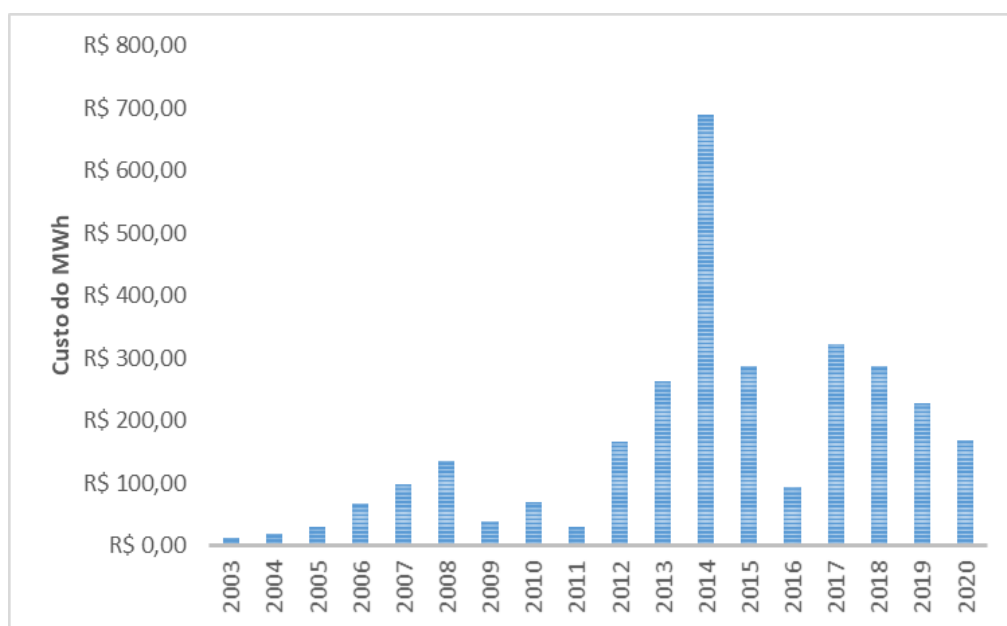


Fonte: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) (2020).

O município estudado pertence ao estado de São Paulo no Sudeste logo o valor médio praticado na venda do MWh em doze meses para essa região foi de R\$ 173,65.

A seguir será apresentada a figura 5.8 onde estará expresso os preços médios de cada ano, praticados na região sudeste desde 2003.

Figura 5.8 – Preços médios do R\$/MWh praticados no Sudeste de 2003 a 2020.



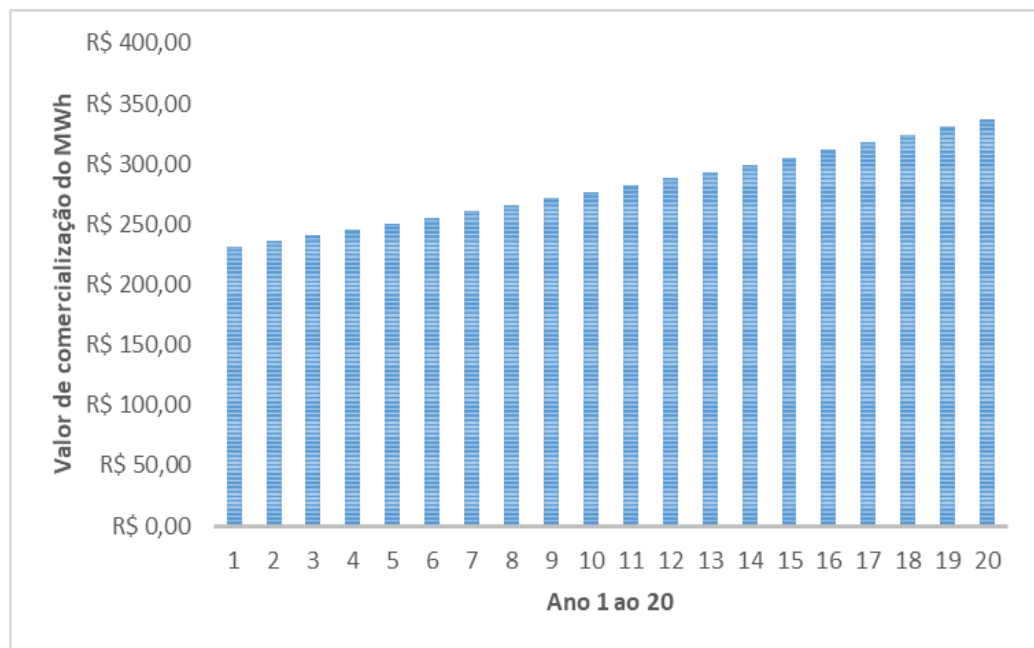
Fonte: Adaptado de Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) (2020).

Com base nos valores da figura 5.8 será calculado um custo médio dos últimos seis anos, para que a análise seja mais sensível à realidade atual e futura; O valor encontrado a partir dessa média é de R\$ 231,46 o MWh, porém em um horizonte de 20 anos esse valor não pode permanecer fixo.

Como podemos observar na figura 5.8, embora o valor oscile para mais ou para menos, a tendência ao longo dos anos é de aumento do valor, pois a moeda desvaloriza ao longo do tempo.

O aumento que utilizado será de 2% ao ano no custo do MWh, ao longo de 20 anos, os valores podem ser visualizados na figura 5.9.

Figura 5.9 – Preços médios do R\$/MWh estimado para os próximos 20 anos.



Fonte: Próprio autor.

6 ANÁLISE DOS CUSTOS DAS UNIDADES DE PIRÓLISE

6.1 INTRODUÇÃO

Esse capítulo será responsável pela apresentação de todos os dados que serão utilizados no capítulo seguinte, para a conclusão da viabilidade técnica e econômica da unidade de processamento de RSU na cidade de Guaratinguetá-SP.

O capítulo 6 também será responsável por apresentar o método para elaborar a avaliação, que é o objetivo deste trabalho.

6.1.1 Capacidade de geração de energia

A capacidade de geração de energia está diretamente relacionada a quantidade de matéria-prima que existe para consumir.

Podemos citar por exemplo que para uma hidrelétrica depende da quantidade de água que a represa consegue reter, para energia eólica depende da velocidade e direção dos ventos, para a energia solar depende do tempo de exposição e da intensidade dos raios solares, para o caso da usina de pirólise a capacidade de geração de energia está relacionada à quantidade de ton/dia que o município produz e o quanto a planta consegue processar em um dia.

A cidade de Guaratinguetá-SP produziu uma média diária de 80,07 ton/dia do ano de 2016 a 2019. Este valor será o valor base para a execução de todo o trabalho, porém ele não alcança os valores no qual as plantas trabalham, por isso será feito um ajuste com acréscimo de ton de RSU dos municípios vizinhos, será explicado mais à frente.

No trabalho será utilizada como base os valores de dois modelos, um da empresa italiana *Maim Engineering Srl*. planta cujo a INNOVA Energias Renováveis tem licença para a implementação no Brasil (Pirólise lenta a tambor rotativo), que possui um modelo de planta que processa 47 ton/dia com potência de 1 MW (CAIBRE et al., 2016).

O segundo modelo utilizado será o da WEG, uma planta de Gaseificação Pirolítica, que tem capacidade para processar 120 ton/dia com potência instalada de 3,3 MW segundo ²Leonardo Parente Buranello (2020).

² Informação fornecida por Leonardo Parente Buranello em resposta ao contato com o e-mail wte@weg.net no dia 23 de setembro de 2020.

Para uma análise próxima, em valores totais, serão utilizados 3 módulos da Main Engineering e um módulo da WEG, totalizando 141 e 120 ton/dia respectivamente, isso está resumido na tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Tabela que resume as potências e capacidade das plantas.

Empresa	ton/dia	Potência (MW)
INNOVA	141	3,0
WEG	120	3,3

Fonte: WEG S.A (2020) e CAIBRE (2016).

Para chegar nessa capacidade de geração somente o município de Guaratinguetá-SP não seria capaz de abastecer esses modelos. Colocando as cidades vizinhas para abastecer essa unidade e partindo do princípio que, por se tratar da mesma região, a produção de RSU por habitante segue uma mesma proporção.

Guaratinguetá-SP, Lorena-SP e Aparecida-SP segundo o IBGE (2020) têm uma população estimada para 2020 de 122.505, 89.125 e 36.185 pessoas respectivamente, seguindo uma lógica direta como Guaratinguetá-SP tem uma média de 80,07 ton/dia, logo os outros dois municípios têm respectivamente 58,25 e 23,65 ton/dia isso totaliza 161,97 ton/dia ultrapassando os dois valores desejados de 141 e 120 ton/dia.

Como se trata de uma estimativa o valor excedente não tem problema algum, pois os valores para funcionamento a capacidade máxima foram alcançados.

6.1.2 Custo de implantação

O custo de implantação vai contemplar o preço da planta que será desenvolvida nos dois modelos do tópico anterior.

Uma planta que processa 47 toneladas custa em torno de e U\$\$ 3,94 milhões (RINGER et al., 2006), que trazendo para valores em reais com uma cotação do dólar a R\$ 5,13 na data de 03/12/2020, a planta terá um valor de R\$ 19,7 milhões (iremos utilizar o valor de U\$\$ 1,00 igual a R\$ 5,00 devido à instabilidade atual da moeda).

Já a planta da WEG que processa 120 toneladas tem um valor fixo de R\$ 62,5 milhões segundo ³Leonardo Parente Buranello (2020).

³ Informação fornecida por Leonardo Parente Buranello em resposta ao contato com o e-mail wte@weg.net no

Como serão 3 módulos de 47 ton/dia e um módulo de 120 ton/dia, os valores estão resumidos na tabela 6.2 a seguir.

Tabela 6.2 – Valores totais do custo das plantas em R\$.

Modelo	ton/dia	R\$ (milhões)
Pirólise lenta a tambor rotativo	141	59,1
Gaseificação Pirolítica	120	62,5

Fonte: WEG S.A (2020) e RINGER et al. (2006).

6.1.3 Custos operacionais e imposto sobre lucro

Toda usina ou unidade industrial precisa de uma manutenção preventiva constante, para que o empreendimento tenha a vida útil que foi planejada.

Qualquer negócio seja para fins lucrativos ou não, tem funcionários, pessoas que serão contratadas para manter o sistema funcionando e isso agregado aos impostos trabalhistas e pensionistas é mais um agregado ao custo operacional.

A seguir na figura 6.1 fornecida pela WEG S.A. valores com respeito ao custo de funcionários mensal para a operação da planta segundo ⁴Leonardo Parente Buranello (2020)

dia 23 de setembro de 2020.

⁴ Informação fornecida por Leonardo Parente Buranello em resposta ao contato com o e-mail wte@weg.net no dia 15 de dezembro de 2020.

Figura 6.1 – Custos com salários e encargos trabalhistas da planta da WEG.



PARA REFERÊNCIA



DIMENSIONAMENTO DA MÃO-DE-OBRA OPERACIONAL POR SERVIÇO - 1 MÓDULO

MÃO DE OBRA DIRETA		Total de funcionários	38	Total de salários com encargos mensal	110.091,60
		Salário médio mensal	2.897,15		

1. RECEPÇÃO DE RESÍDUOS

Item	Categoria Profissional	Dimensionamento (Qtde)	Salário Base (R\$)	Salário com encargos (R\$)	Total Orçado (R\$)
1.1.	Encarregado Operacional	1	2.650,00	4.770,00	4.770,00
1.3.	Balanceteiro diurno	2	1.200,00	2.160,00	4.320,00
1.4.	Balanceteiro noturno	2	1.200,00	2.160,00	4.320,00
1.5.	Operador de carregadeira diurno	2	1.800,00	3.240,00	6.480,00
1.6.	Operador de carregadeira noturno	2	1.800,00	3.240,00	6.480,00
Total Pessoal Recepção		9			26.370,00

2. RECICLAGEM - Segregação e Valorização

Item	Categoria Profissional	Dimensionamento (Qtde)	Salário Base (R\$)	Salário com encargos (R\$)	Total Orçado (R\$)
Total Pessoal Reciclagem		0	Fora do escopo		0,00

3. Produção CDRU

Item	Categoria Profissional	Dimensionamento (Qtde)	Salário Base (R\$)	Salário com encargos (R\$)	Total Orçado (R\$)
3.1.	Operador de linha de preparo diurno	2	1.800,00	3.240,00	6.480,00
3.2.	Operador de linha de preparo noturno	2	1.800,00	3.240,00	6.480,00
3.3.	Ajudante diurno	4	1.050,00	1.890,00	7.560,00
3.4.	Ajudante noturno	4	1.050,00	1.890,00	7.560,00
Total Pessoal Produção CDRU		12			28.080,00

4. Geração de Syngas/Vapor/Energia

Item	Categoria Profissional	Dimensionamento (Qtde)	Salário Base (R\$)	Salário com encargos (R\$)	Total Orçado (R\$)
4.1.	Gerente de produção	1	8.000,00	14.400,00	14.400,00
4.2.	Operador de sistema diurno	4	1.800,00	3.240,00	12.960,00
4.3.	Operador de sistema noturno	4	1.800,00	3.240,00	12.960,00
4.4.	Ajudante diurno	2	1.050,00	1.890,00	3.780,00
4.5.	Ajudante noturno	2	1.050,00	1.890,00	3.780,00
Total Pessoal Geração		13			47.880,00

5. RETIRADA DE CINZAS

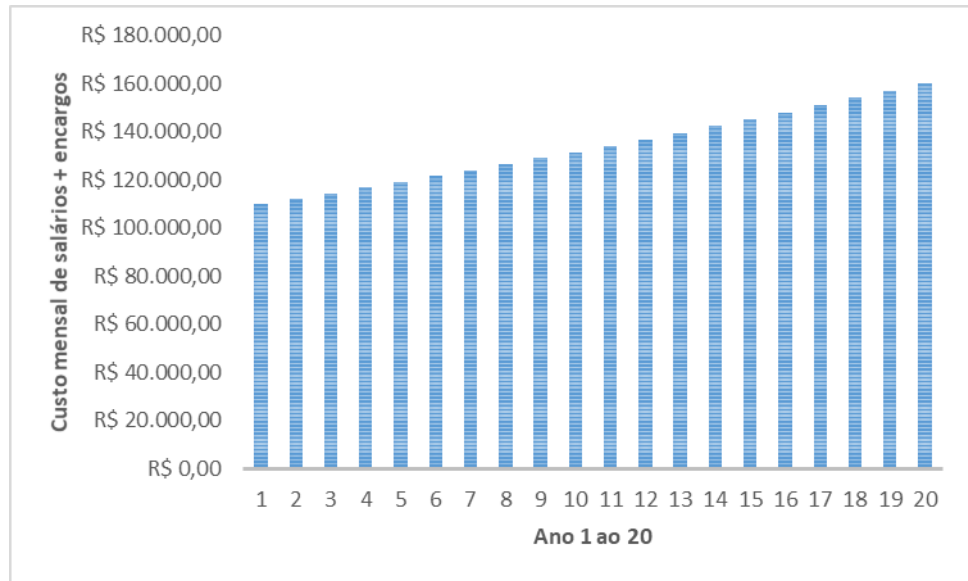
Item	Categoria Profissional	Dimensionamento (Qtde)	Salário Base (R\$)	Salário com encargos (R\$)	Total Orçado (R\$)
5.1	Motorista poli/guindaste	0	1.800,00	3.240,00	0,00
Total Pessoal Destino Final		0			0,00

Fonte: Colaboradores da WEG (2020).

Analisando o documento o valor dos salários mais encargo dos funcionários da planta é de R\$ 110.091,60, esse será o valor base para a análise.

Considerando que os funcionários terão um aumento todo o ano de 2% a figura 6.2 indica os valores mensais dos próximos 20 anos (lembrando que em resultados e discussões esses valores serão multiplicados por 13 que é o total em cada ano).

Figura 6.2 – Custo mensal dos funcionários + encargos da planta da WEG em 20 anos.

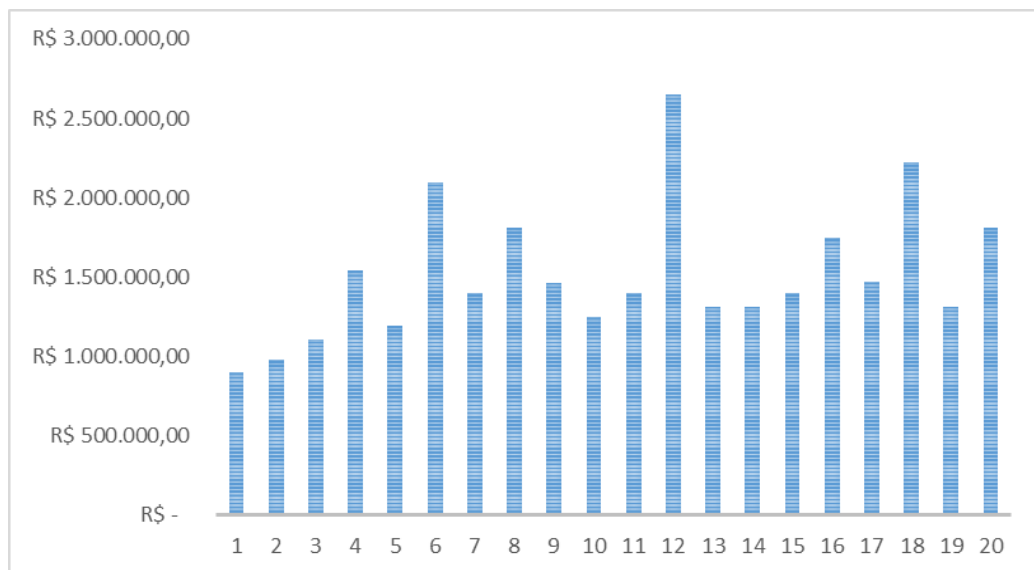


Fonte: Colaboradores da WEG (2020).

Qualquer indústria que tenha máquinas, a calor, elétricas ou pneumáticas entre outras, deve fazer manutenção em tudo periodicamente para que a vida do empreendimento dure o tempo para o qual foi planejado.

Segundo ⁵Leonardo Parente Buranello (2020) a tabela de custos por ano de manutenção na planta da WEG se encontra na figura 6.3.

Figura 6.3 – Valor de manutenção anual ao longo de 20 anos.



Fonte: Adaptação dos dados fornecidos pela WEG S.A. (2020).

⁵ Informação fornecida por Leonardo Parente Buranello em resposta ao contato com o email wte@weg.net no dia 15 de dezembro de 2020.

Agora vamos falar dos 3 módulos de 47 toneladas e seus custos. Segundo Caibre et al. (2016) um módulo de 47 toneladas tem custos relativos à matéria-prima (RSU), manutenção e os custos de mão de obra com encargos sociais (tabela 6.3), seguindo essa lógica os valores obtidos pelo trabalho citado será multiplicado por três, com exceção da matéria prima que será retirada dos cálculos pois se trata de uma análise onde os municípios irão pagar para terem seus resíduos tratado pelo empreendimento, ou seja o negócio não terá custo de aquisição com matéria-prima. Esses custos terão um aumento de 2% ao ano em cada categoria.

Tabela 6.3 – Custo operacional dos 3 módulos de 47 toneladas.

Parâmetros Operacionais	Valor Anual
Manutenção	R\$ 1.894.980,00
mão de obra + encargos	R\$ 1.878.708,30

Fonte: Adaptado de Caibre et al (2016).

Por fim considerando uma empresa com lucro acima de R\$ 20 mil mensal o sistema de recolhimento de imposto será o Lucro Real cuja alíquota é de 34% sobre o lucro líquido do empreendimento (BRASIL, 1992).

6.1.4 Vida útil

Vida útil como o próprio nome diz é o tempo em que o empreendimento vai sobreviver, ou seja, o tempo que ele vai funcionar mantendo os padrões em que foi planejado.

Grandes construções, como usinas de processamento de RSU, são construções que têm uma vida útil bem elevada. No trabalho será adotado o tempo de 20 anos para análise de um possível *payback* e futura geração de lucro ou ao menos um *breakeven* onde a planta pelo menos paga os seus custos de funcionamento.

Essa adoção de um tempo de vida útil em grandes empreendimentos é interessante pois pode se beneficiar do tempo de depreciação do bem imóvel para fins contábeis que irão abater sobre o imposto a se pagar pelo negócio.

No caso da planta da WEG que tem um custo de R\$ 62,5 milhões ao longo de 20 anos sofrerá uma depreciação de R\$ 3,125 milhões ao ano, enquanto os 3 módulos da INNOVA têm um custo de R\$ 59,1 milhões ao longo de 20 anos irá depreciar R\$ 2,955 milhões ao ano.

6.1.5 Payback

Payback nada mais é do que o tempo em que o valor que foi desembolsado para realizar um investimento se iguala com o valor das receitas líquidas deste (REBELATTO, 2004), é definido muitas vezes com a expressão “quanto tempo leva para o negócio se pagar”.

No trabalho iremos abordar o *payback* simples representado pela equação 6.1, que ignora a taxa de desconto que é o valor do dinheiro no tempo (BRUNI; FAMÁ; SIQUEIRA, 1998) mas para uma análise mais profunda pode ser adotado o *payback* descontado, representada pela equação 6.2, que considera a taxa de juros para os cálculos (MARQUEZAN; BRONDONI, 2006).

Equação *payback* simples:

$$payback = \frac{|FC_{j-}|}{|FC_{j-}| + |FC_{j+}|} \times (Ano_+ - Ano_-) + Ano_- \quad (6.1)$$

Equação *payback* descontado:

$$payback = \frac{|FCCD_{j-}|}{|FCCD_{j-}| + |FCCD_{j+}|} \times (Ano_+ - Ano_-) + Ano_- \quad (6.2)$$

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo será finalizado e realizado todos os cálculos e demonstrações com tabelas, para a viabilidade de uma unidade de processamento de RSU, no município de Guaratinguetá-SP e municípios vizinhos.

O objetivo do trabalho será analisar em quais situações o projeto se torna viável, e enquanto tempo o retorno do investimento inicial acontece, se ele acontece.

Todos os dados que serão apresentados daqui em diante estão contidos no escopo desse trabalho, especificamente nos capítulos 4, 5 e 6.

7.2 ANÁLISE DE TODOS OS DADOS PARA GUARATINGUETÁ E REGIÃO

Primeiramente antes de apresentar as tabelas dos cálculos a serem analisados algumas considerações devem ser feitas, primeiramente o material que será utilizado ou seja o RSU composto em sua maior parte por plásticos e material orgânico não pode ter uma umidade superior a 30% o que pode ser controlado a partir de secagem do material antes da disposição desses dentro do reator, posteriormente o que deve ser analisado é que do total de energia produzida 30% será consumida pelas plantas de pirólise e gaseificação pirolítica e os outros 70% que serão comercializados.

Serão feitas duas análises, uma para o modelo de 120 ton/dia e uma para o modelo de 141 ton/dia. Essas análises irão considerar a receita proveniente da venda do tratamento para os municípios Guaratinguetá-SP, Aparecida-SP e Lorena-SP mais a receita da venda da energia elétrica para a rede.

Para o cálculo final da última linha dos quadros foi utilizado a equação 6.2 que é para descobrir o *payback* simples dos empreendimentos, a partir do momento que o valor deixa de ser negativo esse *payback* foi atingido.

Iniciando a análise para a planta da Maim Engineering srl. cuja licença no Brasil é da INNOVA. Lembrando alguns dados que serão utilizados na tabela, o custo total da planta (composta por 3 módulos) de R\$ 59,1 milhões, depreciação de R\$ 2,955 milhões ao ano, valor de venda da MWh iniciará com R\$ 231,46 com um acréscimo de 2% ao ano como mostrado no subcapítulo 5.3.1, o valor de venda do tratamento da tonelada do RSU é de

R\$ 196,48 tratando um total de 141 ton/dia, o custo com manutenção e mão de obra estão presentes na tabela 6.3, e considerando potência instalada 3 MW porém potência líquida 70% desse valor, pode se completar os quadros 7.1, 7.2, 7.3 e 7.4.

Quadro 7.1 – Fluxo financeiro para a planta de Pirólise do ano 1 ao ano 5.

DESCRIÇÃO	ANOS				
RECEITA	1	2	3	4	5
(+) R\$/MWh	R\$ 4.257.938,16	R\$ 4.343.096,92	R\$ 4.429.958,86	R\$ 4.518.558,04	R\$ 4.608.929,20
(+)R\$/(ton/dia)	R\$ 10.111.843,20	R\$ 10.111.843,20	R\$ 10.111.843,20	R\$ 10.111.843,20	R\$ 10.111.843,20
CUSTOS					
(-) funcionários + encargos	R\$ 1.878.708,30	R\$ 1.916.282,47	R\$ 1.954.608,12	R\$ 1.993.700,28	R\$ 2.033.574,28
(-) manutenção	R\$ 1.894.980,00	R\$ 1.932.879,60	R\$ 1.971.537,19	R\$ 2.010.967,94	R\$ 2.051.187,29
Lucro Líquido antes do IR	R\$ 10.596.093,06	R\$ 10.605.778,06	R\$ 10.615.656,75	R\$ 10.625.733,03	R\$ 10.636.010,82
(-)Depreciação	R\$ 2.955.000,00	R\$ 2.955.000,00	R\$ 2.955.000,00	R\$ 2.955.000,00	R\$ 2.955.000,00
Lucro Tributável	R\$ 7.641.093,06	R\$ 7.650.778,06	R\$ 7.660.656,75	R\$ 7.670.733,03	R\$ 7.681.010,82
Lucro Líquido	R\$ 5.043.121,42	R\$ 5.049.513,52	R\$ 5.056.033,46	R\$ 5.062.683,80	R\$ 5.069.467,14
(-) CUSTO DA PLANTA	R\$ 59.100.000,00				
Patrimônio Líquido	-R\$ 54.056.878,58	-R\$ 49.007.365,06	-R\$ 43.951.331,60	-R\$ 38.888.647,81	-R\$ 33.819.180,67

Fonte: Próprio autor.

Quadro 7.2 – Fluxo financeiro para a planta de Pirólise do ano 6 ao ano 10.

DESCRIÇÃO	ANOS				
RECEITA	6	7	8	9	10
(+) R\$/MWh	R\$ 4.701.107,78	R\$ 4.795.129,94	R\$ 4.891.032,54	R\$ 4.988.853,19	R\$ 5.088.630,25
(+)R\$/(ton/dia)	R\$ 10.111.843,20	R\$ 10.111.843,20	R\$ 10.111.843,20	R\$ 10.111.843,20	R\$ 10.111.843,20
CUSTOS					
(-) funcionários + encargos	R\$ 2.074.245,77	R\$ 2.115.730,68	R\$ 2.158.045,30	R\$ 2.201.206,20	R\$ 2.245.230,33
(-) manutenção	R\$ 2.092.211,04	R\$ 2.134.055,26	R\$ 2.176.736,37	R\$ 2.220.271,09	R\$ 2.264.676,52
Lucro Líquido antes do IR	R\$ 10.646.494,17	R\$ 10.657.187,19	R\$ 10.668.094,07	R\$ 10.679.219,09	R\$ 10.690.566,61
(-)Depreciação	R\$ 2.955.000,00	R\$ 2.955.000,00	R\$ 2.955.000,00	R\$ 2.955.000,00	R\$ 2.955.000,00
Lucro Tributável	R\$ 7.691.494,17	R\$ 7.702.187,19	R\$ 7.713.094,07	R\$ 7.724.219,09	R\$ 7.735.566,61
Lucro Líquido	R\$ 5.076.386,16	R\$ 5.083.443,55	R\$ 5.090.642,09	R\$ 5.097.984,60	R\$ 5.105.473,96
(-) CUSTO DA PLANTA					
Patrimônio Líquido	-R\$ 28.742.794,51	-R\$ 23.659.350,96	-R\$ 18.568.708,87	-R\$ 13.470.724,27	-R\$ 8.365.250,31

Fonte: Próprio autor.

Quadro 7.3 – Fluxo financeiro para a planta de Pirólise do ano 11 ao ano 15.

DESCRIÇÃO	ANOS				
RECEITA	11	12	13	14	15
(+) R\$/MWh	R\$ 5.190.402,86	R\$ 5.294.210,91	R\$ 5.400.095,13	R\$ 5.508.097,04	R\$ 5.618.258,98
(+)R\$/(ton/dia)	R\$ 10.111.843,20	R\$ 10.111.843,20	R\$ 10.111.843,20	R\$ 10.111.843,20	R\$ 10.111.843,20
CUSTOS					
(-) funcionários + encargos	R\$ 2.290.134,93	R\$ 2.335.937,63	R\$ 2.382.656,39	R\$ 2.430.309,51	R\$ 2.478.915,70
(-) manutenção	R\$ 2.309.970,05	R\$ 2.356.169,45	R\$ 2.403.292,84	R\$ 2.451.358,69	R\$ 2.500.385,87
Lucro Líquido antes do IR	R\$ 10.702.141,08	R\$ 10.713.947,03	R\$ 10.725.989,11	R\$ 10.738.272,03	R\$ 10.750.800,61
(-)Depreciação	R\$ 2.955.000,00	R\$ 2.955.000,00	R\$ 2.955.000,00	R\$ 2.955.000,00	R\$ 2.955.000,00
Lucro Tributável	R\$ 7.747.141,08	R\$ 7.758.947,03	R\$ 7.770.989,11	R\$ 7.783.272,03	R\$ 7.795.800,61
Lucro Líquido	R\$ 5.113.113,11	R\$ 5.120.905,04	R\$ 5.128.852,81	R\$ 5.136.959,54	R\$ 5.145.228,40
(-) CUSTO DA PLANTA					
Patrimônio Líquido	-R\$ 3.252.137,20	R\$ 1.868.767,84	R\$ 6.997.620,66	R\$ 12.134.580,20	R\$ 17.279.808,60

Fonte: Próprio autor.

Quadro 7.4 – Fluxo financeiro para a planta de Pirólise do ano 16 ao ano 20.

DESCRIÇÃO	ANOS				
RECEITA	16	17	18	19	20
(+) R\$/MWh	R\$ 5.730.624,16	R\$ 5.845.236,64	R\$ 5.962.141,37	R\$ 6.081.384,20	R\$ 6.203.011,88
(+)R\$/(ton/dia)	R\$ 10.111.843,20	R\$ 10.111.843,20	R\$ 10.111.843,20	R\$ 10.111.843,20	R\$ 10.111.843,20
CUSTOS					
(-) funcionários + encargos	R\$ 2.528.494,02	R\$ 2.579.063,90	R\$ 2.630.645,18	R\$ 2.683.258,08	R\$ 2.736.923,24
(-) manutenção	R\$ 2.550.393,58	R\$ 2.601.401,46	R\$ 2.653.429,48	R\$ 2.706.498,07	R\$ 2.760.628,04
Lucro Líquido antes do IR	R\$ 10.763.579,75	R\$ 10.776.614,49	R\$ 10.789.909,91	R\$ 10.803.471,25	R\$ 10.817.303,81
(-)Depreciação	R\$ 2.955.000,00	R\$ 2.955.000,00	R\$ 2.955.000,00	R\$ 2.955.000,00	R\$ 2.955.000,00
Lucro Tributável	R\$ 7.808.579,75	R\$ 7.821.614,49	R\$ 7.834.909,91	R\$ 7.848.471,25	R\$ 7.862.303,81
Lucro Líquido	R\$ 5.153.662,64	R\$ 5.162.265,56	R\$ 5.171.040,54	R\$ 5.179.991,02	R\$ 5.189.120,51
(-) CUSTO DA PLANTA					
Patrimônio Líquido	R\$ 22.433.471,23	R\$ 27.595.736,79	R\$ 32.766.777,34	R\$ 37.946.768,36	R\$ 43.135.888,87

Fonte: Próprio autor.

Como pode ser analisado nos quatro quadros acima, referente ao fluxo financeiro o investimento passaria a dar retorno a partir do décimo segundo ano, e totalizaria um lucro final de R\$ 43 milhões, com essas diretrizes e a partir de todas as considerações feitas, seria viável a planta de Pirólise. Porém se os municípios não fossem arcar com nenhum custo para o tratamento, ou seja, a receita referente ao valor pago pelos municípios para tratar o RSU fosse nulo o empreendimento além de não ser viável não chegaria nem perto de se pagar.

Mas uma análise pode ser levada em conta, qual seria o valor mínimo aproximado para que a planta ao menos se pagasse no horizonte de 20 anos?

Utilizando a mesma formulação e as mesmas considerações pode-se afirmar que o valor mínimo praticado do R\$/ton deve ser de R\$ 133,00 para que ocorra o *payback* e o lucro final seja o menor possível.

Agora a análise da viabilidade que será feita será relacionada a planta de gaseificação pirolítica da WEG. Algumas informações necessárias ao cálculo se encontram a seguir, o custo total da planta é de R\$ 62,5 milhões, depreciação de R\$ 3,125 milhões ao ano, valor de venda da MWh iniciará com R\$ 231,46 com um acréscimo de 2% ao ano como mostrado no subcapítulo 5.3.1, o valor de venda do tratamento da tonelada do RSU é de R\$ 196,48 tratando um total de 120 ton/dia, o custo com manutenção está na figura 6.2 e a mão de obra mais encargos estão presentes na figura 6.3, e considerando potência instalada 3,3 MW porém potência líquida 70% desse valor, pode se completar os quadros 7.5, 7.6, 7.7 e 7.8.

Quadro 7.5 – Fluxo financeiro para a planta de Gaseificação do ano 1 ao ano 5.

DESCRIÇÃO	ANOS				
RECEITA	1	2	3	4	5
(+) R\$/MWh	R\$ 4.683.731,98	R\$ 4.777.406,62	R\$ 4.872.954,75	R\$ 4.970.413,84	R\$ 5.069.822,12
(+)R\$/(ton/dia)	R\$ 8.605.824,00	R\$ 8.605.824,00	R\$ 8.605.824,00	R\$ 8.605.824,00	R\$ 8.605.824,00
CUSTOS					
(-) funcionários + encargos	R\$ 1.431.190,80	R\$ 1.459.814,62	R\$ 1.489.010,91	R\$ 1.518.791,13	R\$ 1.549.166,95
(-) manutenção	R\$ 900.000,00	R\$ 980.000,00	R\$ 1.110.000,00	R\$ 1.540.000,00	R\$ 1.190.000,00
Lucro Líquido antes do IR	R\$ 10.958.365,18	R\$ 10.943.416,00	R\$ 10.879.767,84	R\$ 10.517.446,72	R\$ 10.936.479,17
(-) Depreciação	R\$ 3.125.000,00	R\$ 3.125.000,00	R\$ 3.125.000,00	R\$ 3.125.000,00	R\$ 3.125.000,00
Lucro Tributável	R\$ 7.833.365,18	R\$ 7.818.416,00	R\$ 7.754.767,84	R\$ 7.392.446,72	R\$ 7.811.479,17
Lucro Líquido	R\$ 5.170.021,02	R\$ 5.160.154,56	R\$ 5.118.146,77	R\$ 4.879.014,83	R\$ 5.155.576,25
(-) CUSTO DA PLANTA	R\$ 62.500.000,00				
Patrimônio Líquido	-R\$ 54.666.634,82	-R\$ 46.848.218,82	-R\$ 39.093.450,98	-R\$ 31.701.004,27	-R\$ 23.889.525,10

Fonte: Próprio autor.

Quadro 7.6 – Fluxo financeiro para a planta de Gaseificação do ano 6 ao ano 10.

DESCRIÇÃO	ANOS				
RECEITA	6	7	8	9	10
(+) R\$/MWh	R\$ 5.171.218,56	R\$ 5.274.642,93	R\$ 5.380.135,79	R\$ 5.487.738,51	R\$ 5.597.493,28
(+)R\$/(ton/dia)	R\$ 8.605.824,00	R\$ 8.605.824,00	R\$ 8.605.824,00	R\$ 8.605.824,00	R\$ 8.605.824,00
CUSTOS					
(-) funcionários + encargos	R\$ 1.580.150,29	R\$ 1.611.753,29	R\$ 1.643.988,36	R\$ 1.676.868,13	R\$ 1.710.405,49
(-) manutenção	R\$ 2.100.000,00	R\$ 1.400.000,00	R\$ 1.810.000,00	R\$ 1.460.000,00	R\$ 1.250.000,00
Lucro Líquido antes do IR	R\$ 10.096.892,27	R\$ 10.868.713,64	R\$ 10.531.971,43	R\$ 10.956.694,38	R\$ 11.242.911,79
(-)Depreciação	R\$ 3.125.000,00	R\$ 3.125.000,00	R\$ 3.125.000,00	R\$ 3.125.000,00	R\$ 3.125.000,00
Lucro Tributável	R\$ 6.971.892,27	R\$ 7.743.713,64	R\$ 7.406.971,43	R\$ 7.831.694,38	R\$ 8.117.911,79
Lucro Líquido	R\$ 4.601.448,90	R\$ 5.110.851,00	R\$ 4.888.601,15	R\$ 5.168.918,29	R\$ 5.357.821,78
(-) CUSTO DA PLANTA					
Patrimonio Líquido	-R\$ 16.917.632,82	-R\$ 9.173.919,18	-R\$ 1.766.947,75	R\$ 6.064.746,63	R\$ 14.182.658,42

Fonte: Próprio autor.

Quadro 7.7 – Fluxo financeiro para a planta de Gaseificação do ano 11 ao ano 15.

DESCRIÇÃO	ANOS				
RECEITA	11	12	13	14	15
(+) R\$/MWh	R\$ 5.709.443,14	R\$ 5.823.632,01	R\$ 5.940.104,65	R\$ 6.058.906,74	R\$ 6.180.084,87
(+)R\$/(ton/dia)	R\$ 8.605.824,00	R\$ 8.605.824,00	R\$ 8.605.824,00	R\$ 8.605.824,00	R\$ 8.605.824,00
CUSTOS					
(-) funcionários + encargos	R\$ 1.744.613,60	R\$ 1.779.505,87	R\$ 1.815.095,99	R\$ 1.851.397,91	R\$ 1.888.425,87
(-) manutenção	R\$ 1.400.000,00	R\$ 2.650.000,00	R\$ 1.310.000,00	R\$ 1.310.000,00	R\$ 1.400.000,00
Lucro Líquido antes do IR	R\$ 11.170.653,54	R\$ 9.999.950,14	R\$ 11.420.832,66	R\$ 11.503.332,83	R\$ 11.497.483,01
(-)Depreciação	R\$ 3.125.000,00	R\$ 3.125.000,00	R\$ 3.125.000,00	R\$ 3.125.000,00	R\$ 3.125.000,00
Lucro Tributável	R\$ 8.045.653,54	R\$ 6.874.950,14	R\$ 8.295.832,66	R\$ 8.378.332,83	R\$ 8.372.483,01
Lucro Líquido	R\$ 5.310.131,34	R\$ 4.537.467,09	R\$ 5.475.249,55	R\$ 5.529.699,67	R\$ 5.525.838,79
(-) CUSTO DA PLANTA					
Patrimonio Líquido	R\$ 22.228.311,96	R\$ 29.103.262,10	R\$ 37.399.094,75	R\$ 45.777.427,59	R\$ 54.149.910,59

Fonte: Próprio autor.

Quadro 7.8 – Fluxo financeiro para a planta de Gaseificação do ano 16 ao ano 20.

DESCRIÇÃO	ANOS				
RECEITA	16	17	18	19	20
(+) R\$/MWh	R\$ 6.303.686,57	R\$ 6.429.760,30	R\$ 6.558.355,51	R\$ 6.689.522,62	R\$ 6.823.313,07
(+)R\$/(ton/dia)	R\$ 8.605.824,00	R\$ 8.605.824,00	R\$ 8.605.824,00	R\$ 8.605.824,00	R\$ 8.605.824,00
CUSTOS					
(-) funcionários + encargos	R\$ 1.926.194,38	R\$ 1.964.718,27	R\$ 2.004.012,64	R\$ 2.044.092,89	R\$ 2.084.974,75
(-) manutenção	R\$ 1.750.000,00	R\$ 1.470.000,00	R\$ 2.220.000,00	R\$ 1.310.000,00	R\$ 1.810.000,00
Lucro Líquido antes do IR	R\$ 11.233.316,19	R\$ 11.600.866,03	R\$ 10.940.166,87	R\$ 11.941.253,73	R\$ 11.534.162,32
(-) Depreciação	R\$ 3.125.000,00	R\$ 3.125.000,00	R\$ 3.125.000,00	R\$ 3.125.000,00	R\$ 3.125.000,00
Lucro Tributável	R\$ 8.108.316,19	R\$ 8.475.866,03	R\$ 7.815.166,87	R\$ 8.816.253,73	R\$ 8.409.162,32
Lucro Líquido	R\$ 5.351.488,68	R\$ 5.594.071,58	R\$ 5.158.010,14	R\$ 5.818.727,46	R\$ 5.550.047,13
(-) CUSTO DA PLANTA					
Patrimônio Líquido	R\$ 62.258.226,78	R\$ 70.734.092,81	R\$ 78.549.259,69	R\$ 87.365.513,42	R\$ 95.774.675,74

Fonte: Próprio autor.

Analisando os valores obtidos nos quadros 7.5, 7.6, 7.7 e 7.8 que são referentes ao fluxo financeiro a planta da WEG o investimento se pagaria, ou seja, ocorreria o *payback* no oitavo ano de funcionamento e chegaria a um lucro de R\$ 95 milhões ao longo dos 20 anos, logo pode-se concluir que para as diretrizes e suposições mencionadas é viável essa unidade de processamento de RSU.

Caso se considere que os municípios não pagassem nada pelo tratamento, o empreendimento não se pagaria no horizonte de 20 anos e além disso daria prejuízo.

Mas assim com feito para a análise anterior, qual seria o valor mínimo aproximado para que a planta ao menos se pagasse no horizonte de 20 anos?

A partir de todos os dados utilizados, alterando apenas o valor do R\$/ton, chegasse ao valor de R\$ 88,00 para que ocorra o *payback* e o lucro seja o mínimo possível.

8 CONCLUSÃO

Esse trabalho em seu objetivo de trazer de uma forma mais clara o que seria tratar o RSU dos municípios e qual a viabilidade disso, traz algumas conclusões para o leitor. Algumas mais simples, dizer que o Brasil está muito atrasado em relação aos países desenvolvidos quando se trata de tratamento do RSU gerado, que o Brasil tem um potencial muito grande para esse tipo de tecnologia e que a população e a sociedade brasileira como um todo apoia formas sustentáveis de se obter energia.

Partindo para conclusões mais técnicas, com relação à viabilidade de uma unidade de processamento de RSU, os dois modelos estudados tanto a planta de Pirólise lenta a tambor rotativo quanto a planta de Gaseificação Pirolítica são viáveis para as condições predeterminadas no roteiro do trabalho. A principal delas seria que os municípios pagassem para ter seus resíduos tratados (o que já ocorre hoje em dia) e o valor de R\$ 196,48 que o valor praticado atualmente torna viável e, além disso, rentável para que plantas como essas sejam instaladas.

Isso traz uma ideia de que existe uma margem muito interessante para que o setor privado entre nesse ramo em peso, pois existe uma lucratividade possível de ser alcançada e com valores bastante robustos.

Um outro panorama seria considerar um investimento público onde o município teria que arcar com o valor inicial da planta e um valor mínimo por tonelada para que os empreendimentos sejam viáveis, no caso da planta da 141 ton/dia seria de R\$ 133,00/ton enquanto a planta de R\$ 120 ton/dia seria de R\$ 88,00/ton.

Comparando os dois modelos chega-se à conclusão de que a planta da WEG tem uma maior eficiência em relação à planta da *Main Engineering srl*. licenciada pela INNOVA, pois ela tem margens maiores gerando um lucro que é o dobro se comparado com a outra planta, além de custos operacionais mais baixos e de ser uma tecnologia 100% desenvolvida por uma empresa brasileira o que traz facilidade e velocidade de implementação no país.

REFERÊNCIAS

- ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O. Contaminação química e biorremediação do solo. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. C. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (ed.) **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 300-307.
- AMERICAN PLASTIC COUNCIL (APC). **Total sales & captive use of selected thermoplastic resins by major Market, 2001-2005**. Disponível em <http://www.americanchemistry.com>. Acesso em: 01 fev. 2021.
- ANDRADY, A. L. **Plastics and environment**. Hoboken: Wiley Interscience, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGEM (ABRE). **Reciclagem no Brasil, 2020**. Disponível em: <https://www.abre.org.br/>. Acesso em: 12 jan. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019**. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>. Acesso em: 27 jul. 2020.
- BLATZSÓ, M. Recent trends in analytical and applied pyrolysis of polymers. **Journal of analytical and Applied Pyrolysis**, Budapest, v. 39, p. 1-25, jan. 1997.
- BRASIL. Lei nº 8.541, de 23 de dezembro de 1992. Institui o imposto sobre a renda mensal calculado com base no lucro real. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 23 dez. 1992.
- BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 12 fev. 1998.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 02 ago. 2010.
- BRASIL. Ministério da Economia. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE). **População**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/guaratingueta.html>. Acesso em: 09 jan. 2021.
- BRASIL. Ministério da Economia. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE). **População**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/aparecida.html>. Acesso em: 09 jan. 2021.
- BRASIL. Ministério da Economia. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE). **População**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/lorena.html>. Acesso em: 09 jan. 2021.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduo (ABREN). **Consulta Pública**. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/consultaspublicas?p_p_id=participacaopublica_WAR_participacaoop

publicaportlet&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cach
heLevelPage&p_p_col_id=column-
2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportle
t_ideDocumento=39240&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_tipoFaseRe
uniao=fase&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_jspPage=%2Fhtml%2Fp
p%2Fvisualizar.jsp. Acesso em: 27 jul. 2020.

BRUNI, A. L.; FAMÁ, R.; SIQUEIRA, J. O. Análise do risco na avaliação de projetos de investimento: uma aplicação do Método de Monte Carlo. **Caderno de Pesquisas de Administração**, São Paulo, v. 1, n. 6, p. 62-74, 1998.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco energético nacional 2018**. Brasília, 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 02 dez. 2020.

CAIBRE, D. I. *et al.* Análise da viabilidade econômica do processo de pirólise para tratamento de resíduos sólidos urbanos: estudo de caso aplicado a uma cidade de médio porte. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 10, n. 2, p. 67 - 88, fev. 2016.

CAMÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). **Custo do MWh**. Disponível em: https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/precos_medios?_adf.ctrl-state=14w5x2xjv7_14&_afLoop=386234665180758#!%40%40%3F_afLoop%3D386234665180758%26_adf.ctrl-state%3D14w5x2xjv7_18. Acesso em: 02 dez. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional (BEN)**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt>. Acesso em: 02 dez. 2020.

GUARATINGUETÁ. Companhia de serviços de água, esgoto e resíduos de Guaratinguetá. **PMGIRS do município de Guaratinguetá-SP**. Disponível em: <https://guaratinguetapmgir.wixsite.com/pmgirs/pmgirs-guara>. Acesso em: 20 ago. 2020.

INDDRA ENERGIA E RESIDUOS. **A empresa**. Disponível em: <https://inddra.com/empresa/>. Acesso em: 10 set. 2020.

INDDRA ENERGIA E RESIDUOS. **Pirólise**. Disponível em: <https://inddra.com/pirolise/>. Acesso em: 10 set. 2020.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Apenas 13% dos resíduos sólidos urbanos no país vão para reciclagem**. Brasília, 2017. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=29296&catid=1&Itemid=7. Acesso em: 30 out. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Data and Statistics**. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TPESbySource>. Acesso em: 02 dez. 2020.

INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION (ISWAL). **The Tragic Case of Dumpsites**. 2015. Disponível em:

https://www.iswa.org/fileadmin/galleries/Task_Forces/THE_TRAGIC_CASE_OF_DUMPSITES.pdf. Acesso em: 5 out. 2020.

JUNIPER CONSULTANCY SERVICES LTD. **Pyrolysis & gasification of waste**. Worldwide Technology & Business Review. Uley: Juniper Consultancy Services, 2001. v. 2.

KAMINSKY, W.; SINN, H. Petrochemical processes for recycling plastics. *In*: BRANDRUP; BITTNER; MENGES, MICHAELI. **Recycling and recovery of plastics**. New York: Hanser/Gargner Publications, 1996. p. 434-443.

LANZETTA, M.; BLAS, C. Di; BUONANNO, F. **an experimental investigation of heat-transfer limitations in the flash pyrolysis of cellulose**. Napoli: ACS Publications, 1997. p. 542-552

MARQUEZAN, L. H. F.; BRONDANI, G. Análise de investimentos. **Revista Eletrônica de Contabilidade**, São Paulo, v. 3, n. 1, p. 35, jan. 2006.

MORAES, L. *et al.* Processo de pirólise para decomposição do lixo urbano. **Revista Pesquisa e Ação**, Mogi das Cruzes, v. 1, p. 130-138, jun 2015.

ONAY, O.; KOCKAR, O. M. Slow, fast and flash pyrolysis of rapeseed. **Renewable Energy**. p. 2417-2433, 2003.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **População mundial Século XX**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br>. Acesso em: 30 out. 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Organic waste management in Latin America: Challenges and Advantages of the Main Treatment Options and Trends**. 2017. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/onu-meio-ambiente-ingles/>. Acesso em: 10 set. 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Perspectivas da população no mundo**. 2019. Disponível em: <https://www.mundocoop.com.br/destaque/populacao-mundial-deve-chegar-a-97-bilhoes-de-pessoas-em-2050-diz-relatorio-da-onu.html>. Acesso em: 10 set. 2020.

PARADELA, F. M. R. **Estudo da pirólise de misturas de resíduos de plásticos, pneus e biomassa**. Orientadora: Doutora Ana Maria Martelo Ramos. 2012. 322 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química e Bioquímica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção**. 2. ed. Porto Alegre: Globo, 1976.

PANAGIOTOU, T. *et al.* The effect of bulk equivalence ratio on the PAH emissions from the combustion of PVC, Poly (styrene) and Poly (ethylene). **Proceedings Combustion Institute**, Boston, v. 26, p. 2142-2460, 1996.

RAHMANI, E. *et al.* On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. **Construction & Building Materials**, Rasht, v. 47, p. 1302-1308, jul. 2013.

REBELATTO, D. **Projeto de investimento**. Barueri, SP: Manole, 2004.

RINGER, M.; PUTSCHE, V.; SCAHILL, J. **Large-scale pyrolysis oil production: a technology assessment and economic analysis**. National Renewable Energy Laboratory. Colorado, U.S: Technical Report NREL/TP-510-37779, 2006. Disponível em: <http://www.nrel.gov/docs/fy07osti/37779.pdf>. Acesso em: 30 out. 2020.

THEMELIS, Nikolas J. *et al.* **Guidebook for the Application of Waste to Energy Technologies in Latin America and The Caribbean**. 2013. Disponível em: http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/pressreleases/Guidebook_WTE_v5_July25_2013.pdf. Acesso em: 10 set. 2020.

TN PETRÓLEO. **Sul de Minas terá usina de energia renovável**. Disponível em: <https://tnpetroleo.com.br/noticia/sul-de-minas-tera-usina-de-energia-renovavel/>. Acesso em: 02 set. 2020.

WARNECK, R. Gasification of biomass: comparison of fixed bed and fluidized bed gaseifier. **Biomass and Bioenergy**, Würzburg, v. 18, p. 489-497, jun. 2000.

WEG. **Isto é WEG**. Disponível em: <https://www.weg.net/institutional/BR/pt/history>. Acesso em: 02 set. 2020.

WEG. **Solução para usina de recuperação energética**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=grwpi1qqhom>. Acesso em: 02 set. 2020.

WORLD BANK (WB). **What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050**. 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10986/30317>. Acesso em 25 jan. 2021.

ZEG AMBIENTAL. **Flash pirólise**. Disponível em: <https://zegambiental.com.br>. Acesso em: 10 set. 2020.

ZEG AMBIENTAL. **Quem somos**. Disponível em: <https://zeg.com.br/quem-somos/> Acesso em: 02 set. 2020.