



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUIZ FELIPE NUNES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA E ESPECIFICAÇÕES
TÉCNICAS DE UM PROCESSO DE PIRÓLISE LENTA.**

MOSSORÓ

2018

LUIZ FELIPE NUNES DE OLIVEIRA

**TÍTULO: ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONOMICA E ESPECIFICAÇÕES
TÉCNICAS DE UM PROCESO DE PIRÓLISE LENTA.**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Francisco Edson Nogueira Fraga,
Prof. Dr.

MOSSORÓ

2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

O48a Oliveira, Luiz Felipe Nunes .
 Análise da viabilidade econômica e
 especificações técnicas do processo de pirólise
 lenta. / Luiz Felipe Nunes Oliveira. - 2019.
 45 f. : il.

 Orientador: Francisco Edson Nogueira Fraga.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
 Mecânica, 2019.

 1. Tratamento Termoquímico. 2. Pirólise. 3.
 Geração de energia. 4. Viabilidade econômica. I.
 Fraga, Francisco Edson Nogueira , orient. II.
 Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

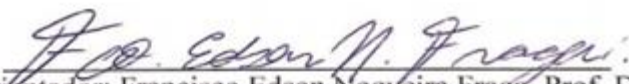
LUIZ FELIPE NUNES DE OLIVEIRA

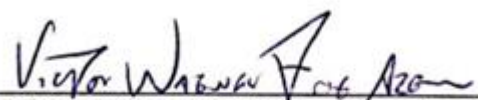
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

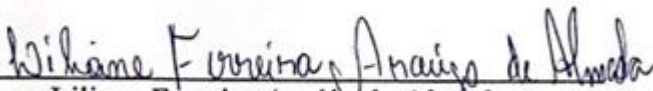
**ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONOMICA E ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO
PROCESSO DE PIROLÍSE LENTA.**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Graduação em
Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA


Orientador: Francisco Edson Nogueira Fraga, Prof. Dr.


Victor Wagner Freire de Azevedo, Prof. Msc.


Liliane Ferreira Araújo de Almada,
Engenheira Mecânica.

Mossoró, 07 de Agosto de 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, minha mãe Maria Mendes Nunes de Oliveira, ao meu pai Francisco Iaratam de Oliveira e ao meu irmão Luiz Gustavo Nunes de Oliveira, pelo apoio.

Agradeço a minha namorada Sara Piazza pela compreensão, paciência e apoio incondicional durante essa jornada.

Agradeço ao meu orientador e tutor do PET, professor Dr. Francisco Edson N. Fraga pelas dicas, orientações e conselhos para minha melhoria contínua como profissional.

Agradeço também aos meus amigos e companheiros de graduação e amigos Valmir Pereira B. Júnior e Jessé Medeiros de Paiva Filho pelas inúmeras horas de estudo, compartilhamento de conhecimento e muitas risadas durante 9 anos nas instituições IFRN/UFERSA.

Agradeço aos amigos de infância no qual considero como irmãos, Idson Melo, Lucas Gabriel, Thalisson Fully, Pedro Rafael, pelos momentos de descontração e felicidades que me proporcionam.

Agradeço aos amigos que conheci na universidade e que me ajudaram de alguma forma desde CeT, em especial a Paulo Henrique, Mikhael César, Samuel, Aquino, Paulo Marrocos, Michael Douglas, Ícaro, Lorena e Davi.

*“Na natureza nada se cria, nada se perde,
tudo se transforma”*

Antoine Laurent de Lavoisier

RESUMO

A busca constante por alternativas viáveis para obtenção de fontes de energia sustentável por meio de estudos e pesquisas vem crescendo de forma exponencial. Em virtude deste fato, uma dessas alternativas tem chamado atenção por conta dos inúmeros benefícios em termos de geração de energia com a utilização de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) como fonte principal deste processo por meio de um tratamento termoquímico denominado pirólise. O presente trabalho consiste em analisar a tecnologia do processo de pirólise como alternativa para destinação final dos RSU, já que este tem sido uma grande problemática em todas as regiões no Brasil. O foco principal é o estudo de uma das suas variantes, neste caso a pirólise lenta visando o aproveitamento energético, sua viabilidade econômica, bem como os subprodutos obtidos, atentando-se para as vantagens ambientais e sociais quando comparado com outros processos alternativos e de destinação correta. Para o estudo foi feita uma abordagem bibliográfica do processo, algumas particularidades do mesmo, bem como uma estimativa de renda bruta, viabilidade econômica e equipamentos necessários para implantação de uma planta de pirólise lenta no município de Mossoró - RN.

Palavras-chaves: Tratamento Termoquímico, Pirólise. RSU, Geração de energia, Viabilidade econômica.

ABSTRACT

The constant search for viable alternatives to obtain sustainable energy sources through studies and research has been growing exponentially, due to this fact one of these alternatives has called attention because of the countless benefits in terms of energy generation, with the use of Waste Urban Solids WSU as the main source of this process by means of a thermochemical treatment called pyrolysis. The present work consists of analyzing the technology of the pyrolysis process as an alternative for final destination of the WSU, since this has been a major problem in all regions in Brazil. The main focus is the study of one of its variants, in this case the slow pyrolysis aiming at the energy utilization, by analyzing its economic viability, as well as the by-products obtained, paying attention to the environmental and social advantages when compared to other alternative processes and a correct destination. For this study a literature review of the process was made, some peculiarities of the same, as well as an estimate of gross income, economic viability and necessary equipment in the implantation for a plant of slow pyrolysis in the city of Mossoró - RN.

Keywords: Thermo-chemical treatment. Pyrolysis. WSU. Power generation. Economic viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Disposição final de RSU no Brasil em 2013.	15
Figura 2 - Diferença dos processos termoquímicos quanto aos produtos gerados.	16
Figura 3 - Equação do geral do processo de pirólise	18
Figura 4 - Proporções relativas dos produtos gerados na pirólise	18
Figura 5- Reator de leito fluidizado borbulhante.....	22
Figura 6 - Reator de leito fluidizado circular.....	22
Figura 7- Processo da Usina de UNAÍ – MG.	24
Figura 8– Representação da balança e do silo de descarga	25
Figura 9- Composição das instalações da usina. Vista interna descarga de material (a), vista externa entrada na moega (b) e reator pirolítico (c).	26
Figura 10- Processo da planta de pirólise da Innova Energias Renováveis.	27
Figura 11- Planta da empresa Innova	28
Figura 12 - Esquematização de um aterro sanitário.....	31
Figura 13 - Fluxograma do processo produtivo.....	41
Figura 14 - Etapas de produção e briquetes.....	43
Figura 15- Termelétrica acoplada ao sistema	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição gravimétrica para RSU no Brasil em 2012.....	14
Tabela 2 - Variantes do processo de pirólise	19
Tabela 3 - Comparativo entre procedimentos alternativos em relação a pirólise lenta	32
Tabela 4 - Estimativo da receita bruta de uma planta de pirólise com capacidade de 48 t.	34
Tabela 5 - Salários médios e a quantidade de funcionários necessários para a operação da planta de pirólise com capacidade de processamento de 48 toneladas por dia	35
Tabela 6 - Custo do investimento inicial para uma planta com capacidade de 47 toneladas por dia.	36

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS.....	12
2.1 OBJETIVO GERAL	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	13
3.1.1 Composição do RSU.....	13
3.1.2 Disposição final do RSU.....	14
3.2 TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS	15
3.2.1 Processo de pirólise	17
3.2.1 Tipos de pirólise.....	19
3.2.2 Pirólise Lenta	19
3.2.3 Produtos obtidos	20
3.3 TIPOS DE REATORES DE PIRÓLISE.....	21
3.3.1 Leito fixo	21
3.3.2 Leito fluidizado borbulhante e circular.....	21
3.4 O PROCESSO DE PIRÓLISE LENTA NO BRASIL	23
3.4.1 Funcionamento	24
3.5 PROCESSOS ALTERNATIVOS A PIRÓLISE.....	29
3.5.1 Quadro comparativo	31
4 METODOLOGIA	32
5 DESENVOLVIMENTO.....	33
5.1 VIABILIDADE ECONOMICA PARA A CIDADE DE MOSSORÓ.....	33
5.1.1 Equipamentos e maquinário.....	36
6. ESTUDO DE CASO: NÚCLEO TÉCNO-AMBIENTAL RAILTON-FAZ	42
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
REFERÊNCIAS	46

1. INTRODUÇÃO

A grande demanda por novos produtos cresce paralelamente a quantidade de resíduos sólidos urbanos RSU, que são gerados desde a fabricação até o consumo do mesmo. A sociedade que hoje se baseia no grande consumo, promove o aumento na produção de itens descartáveis, ou de curta vida-útil e consequentemente traz um impacto ambiental negativo com relação ao surgimento crescente dos mais variados tipos de resíduos. O Brasil não se difere desse contexto, gerando em média um pouco mais de 76 milhões de toneladas de RSU ao ano (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2014.)

Os Resíduos Sólidos Urbanos, de acordo com a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) – Lei 12.305/10 – podem ser classificados tanto como resíduos domiciliares, ou seja, que possuam sua origem em atividades domésticas nas residências urbanas, quanto resíduos de limpeza urbana, sendo estes “os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana”. A PNRS também define alguns processos de destinação ambientalmente adequada de RSU, entre eles estão a recuperação e seu aproveitamento energético. Assim, para tais atividades, podem ser utilizados processos através de vias bioquímicas ou termoquímicas (BRASIL, 2010).

A busca por novas tecnologias limpas está atrelada à necessidade de redução da dependência de resíduos fósseis assim como de fontes renováveis que geram alto impacto ambiental, favorecer a destinação sustentável para resíduos urbanos, industriais e agrícolas tornou-se de fundamental importância. Um dos processos que se encaixam na PNRS é uma via proveniente de um tratamento termoquímico denominado Pirólise, onde a decomposição térmica dos RSU na ausência de oxigênio irá converter os resíduos em produtos sólidos, líquidos e gasosos com propriedades combustíveis (CHITTI; KEMIHA, 2013, MORGADO; FERREIRA, 2006).

Dentre os tipos de tecnologias termoquímicas existentes o presente trabalho terá como enfoque o processo de pirólise lenta utilizando resíduos sólidos urbanos como produtor de matéria prima para combustíveis e produtos químicos, tendo em vista a análise de sua viabilidade econômica, composição dos produtos e o seu potencial energético.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo geral estudar o processo de pirólise, em específico o processo de pirólise lenta, abordando suas características bem como os produtos gerados no processo e sua viabilidade econômica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar a viabilidade econômica do processo de pirólise lenta em relação a outros tipos de destinação de resíduos sólidos urbanos (RSU).
- Levantar dados para dimensionar uma planta de pirólise lenta na cidade de Mossoró relacionando o volume de lixo com a quantidade de energia gerada no processo.
- Discutir estudo de caso sobre pirólise lenta no processamento de RSU e produção de energia.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A imensa quantidade de resíduos sólidos existente é um problema mundial, agravado a partir da Revolução Industrial devido ao aumento no padrão de consumo da sociedade, o que proporcionou a geração dos mais variados tipos de embalagens e produtos de diferentes materiais, que foram e ainda são rapidamente substituídos e descartados em função da inovação e desenvolvimento das tecnologias. Por conta desse fato é produzido um alto volume de resíduos a serem dispostos no ambiente, o que afeta a qualidade ambiental, principalmente em países subdesenvolvidos, onde as restrições legais são menos impostas se comparados com os países com maiores índices de desenvolvimento (SISINNO; OLIVEIRA, 2003).

A associação brasileira de normas técnicas define resíduos sólidos como: “Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

3.1.1 Composição do RSU

Ter ciência da composição do resíduo, bem como ter uma idéia quantitativa de sua geração é de grande importância para o seu gerenciamento dentro da região, já que cada componente possui um risco podendo promover impactos ao ambiente e à saúde, assim como potenciais energéticos variados, permitindo analisar qual tipo de tratamento ou de destinação é mais adequado (RIBEIRO E LIMA, 2000).

A composição dos resíduos sólidos domiciliares pode variar de acordo com alguns fatores. De acordo com os fatores sociais, onde o tipo de alimentação, além da renda da população influenciam diretamente, pois localidades com maiores rendas econômicas

normalmente possuem uma situação de maior consumo de produtos industrializados, gerando assim materiais que são difíceis de surgir o aprofundamento, e estes são provenientes de embalagens – plástico e papel – e produtos descartáveis, como pilhas, baterias e lâmpadas. Em locais de menor renda, há uma maior produção de resíduos orgânicos derivados principalmente de restos de alimentação. Outro fator econômico relevante é o tipo de atividade econômica dominante da sociedade, já que atividades industriais geram menos RSU do que atividades comerciais, pois as indústrias que são obrigadas, de acordo com a PNRS, a oferecer tratamento e destinação de seus resíduos, diminuindo a quantidade de RSU a ser tratado e disposto pelo município. Por fim, outro fator que pode ser citado é o fator ambiental considerando o clima da região. Regiões mais quentes tendem a aumentar o consumo de líquidos, podendo aumentar assim a geração de resíduos de embalagens, por exemplo, garrafas plásticas e latas de alumínio (BOSCOV, 2008). A Tabela 1 expõe a composição gravimétrica dos RSU no Brasil para o ano de 2012.

Tabela 1 - Composição gravimétrica para RSU no Brasil em 2012.

Tipo de Resíduo	%
Matéria Orgânica	51,4
Metal	2,9
Papel/Papelão/Tetrapak	13,1
Plásticos	13,5
Vidro	2,4
Outros (têxteis, madeira, couro, etc.)	16,7
Total	100

Fonte: IPEA 2012.

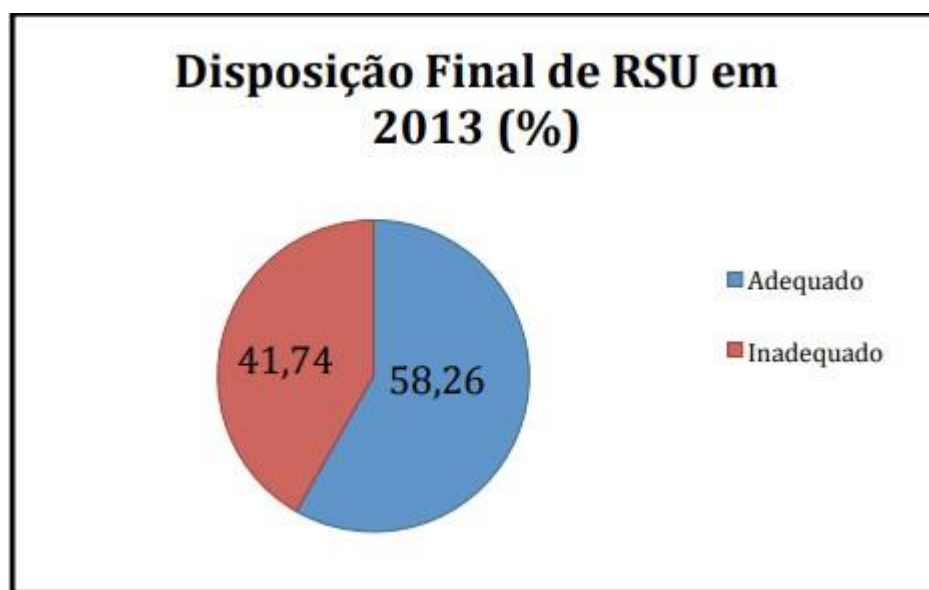
De acordo com os dados acima é notório que a grande maioria dentre os tipos de resíduos sólidos gerados no país é referente a material orgânico, seguido pela junção de materiais definidos na categoria “outros” e na terceira colocação os plásticos, mesmo esse último sendo de fácil reciclagem.

3.1.2 Disposição final do RSU

No Brasil existem basicamente três tipos de disposição final do RSU: aterros sanitários, aterros controlados e vazadouros a céu aberto (lixões). A PNRS define como um

dos seus objetivos para o gerenciamento adequado dos resíduos sólidos a seguinte prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010). A Figura 1 remete a disposição final de RSU no país em 2013.

Figura 1 - Disposição final de RSU no Brasil em 2013.



Fonte: ABRELPE, 2014.

Somente haverá disposição final daquilo que não tiver nenhuma outra forma de reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação ou aproveitamento energético. Como mostrado no gráfico dos resíduos coletados, 58,26% são dispostos adequadamente (aterros sanitários) e 41,74% são dispostos irregularmente (aterros controlados, lixões).

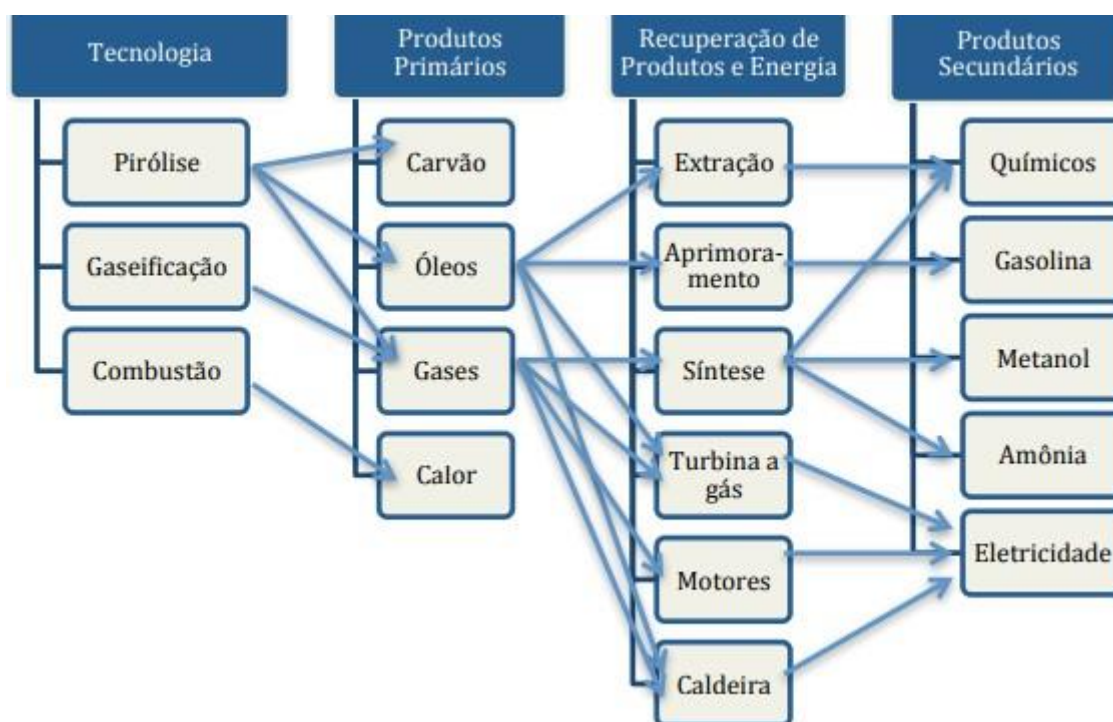
3.2 TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS

Antes da sua disposição final, os resíduos sólidos urbanos podem ser tratados, agregando-lhes um determinado valor econômico por conta do seu potencial energético, além da reduzir os impactos no ambiente que causariam caso fossem descartados de forma irregular. O RSU, por possuir uma quantidade relativamente grande de matéria orgânica em sua composição, pode ser um combustível adequado para processos de produção de energia, bem como para a recuperação de seus produtos.

O tratamento termoquímico dos RSU promove a transformação da estrutura química dos mesmos na presença de altas temperaturas. Os três processos principais de tratamentos termoquímicos são a combustão, a gaseificação e a pirólise (BELGIORNO et al. 2002).

O tratamento dos resíduos sólidos por meio de processos termoquímicos é de grande importância, pois eles reduzem significativamente o volume de resíduo gerado consequentemente diminuindo a demanda por áreas de disposição, aproveitando seu potencial energético, recuperam compostos químicos e minerais. Que podem ser reutilizados para outras finalidades, além de extinguirem alguns contaminantes presentes e que causam a degradação do meio ambiente. A Figura 2 traz a diferença entre os três processos de acordo com o tipo de produto primário e secundário gerado por cada um.

Figura 2 - Diferença dos processos termoquímicos quanto aos produtos gerados.



Fonte: Adaptado de Bridgwater, 1994 (apud BELGIORNO et al, 2003).

Dentre as três principais tecnologias existentes para se tratar resíduos sólidos que foram citadas acima, o processo que será abordado com total ênfase é o processo da pirólise, portanto será feita uma explanação sobre o que é o processo, como se dá, bem como os produtos gerados por um tipo específico do mesmo e o uso atual do processo no Brasil.

3.2.1 Processo de pirólise

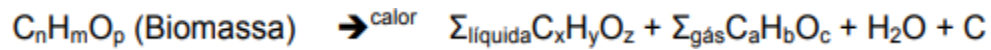
O processo denominado pirólise, ocorre em temperaturas relativamente mais baixas quando comparado com os outros dois, podendo variar entre 250 °C e 700 °C de acordo com o tipo de produto que se deseja obter, e na total ausência de oxigênio. Os produtos da pirólise são o carvão, óleo pirolítico (ou bio-óleo), e um gás, composto por hidrogênio (H₂), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) e metano (CH₄) (CHHITI; KEMIHA, 2013, Stantec, 2011).

Pode ser definida também como o aquecimento de um combustível (RSU) a determinada taxa de aquecimento até atingir uma temperatura máxima, denominada temperatura de pirólise. Após atingir essa temperatura deve-se mantê-la por um tempo específico. O processo ocorre na total ausência de oxigênio (ou numa quantidade tão pequena que não permite ocorrer a gaseificação) e pode ou não ser realizado na presença de um gás mediador, como o nitrogênio. Este processo necessita de energia externa para ser iniciado, porém alguns de seus produtos como o carvão, que possui um alto valor energético, e pode ser utilizado através da sua queima para fornecer energia para dar continuidade ao processo. Dependendo das condições de reação, ele produz diferentes quantidades de produtos sólidos, líquidos ou gasosos (BASU, 2010).

Durante a pirólise, a absorção de energia térmica do meio reacional excita ligações e ocasiona rompimento inicial das ligações mais fracas, seguindo-se da despolimerização das estruturas químicas que compõem a matéria-prima. Estas reações sequenciais iniciais, conhecidas como reações primárias, são responsáveis pela formação de voláteis, que, condensados, originam o bio-óleo, os gases não condensáveis e o carvão, este último que resulta de parte da matéria-prima que não se volatiliza. Com a permanência destes produtos gerados a elevadas temperaturas ocorrem novas reações denominadas secundárias que formam gases leves e outros compostos de menor massa molecular e o tamanho dessas partículas influenciam diretamente no produto final (MESA PERÉZ, 2004).

Ainda de acordo com Basu (2010), a equação presente na Figura 3 descreve o processo de pirólise.

Figura 3 - Equação do geral do processo de pirólise.

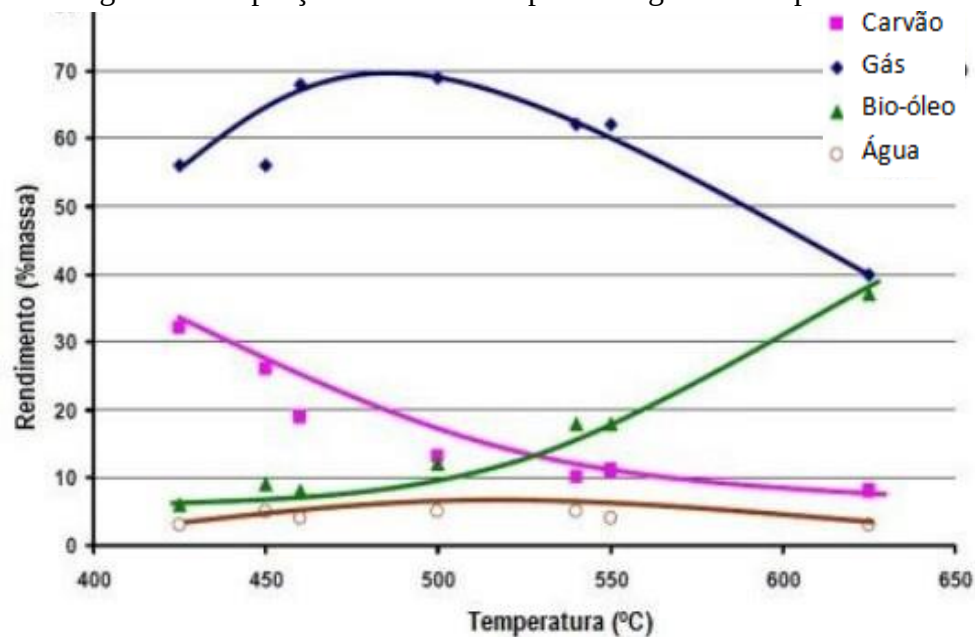


Fonte: Basu, 2010.

Onde a biomassa ao se submeter a uma fonte de calor vai gerar componentes líquidos, gasosos, vapor de água, bem como carbono.

O rendimento dos principais produtos: líquido, sólido e gás dependem especialmente da temperatura de pirólise (HALWACHS et al., 2009). Se o objetivo é maximizar o rendimento do produto líquido (bio-óleo), as condições do processo são selecionadas quanto à baixa temperatura, alta taxa de aquecimento e o curto tempo de residência do gás. Para alto rendimento do bio-carvão, o processo é direcionado a baixas temperaturas e baixas taxas de aquecimento. A fim de produzir um elevado rendimento da fase gás é necessário direcionar o processo a altas temperaturas, baixa taxa de aquecimento e um longo tempo de residência do gás (YAMAN, 2004). A Figura 4 apresenta um modelo das proporções relativas dos produtos finais da pirólise.

Figura 4 - Proporções relativas dos produtos gerados na pirólise



Fonte: IEA, 2016.

No entanto, devido a grande variação da estrutura e da composição da biomassa os processos de pirólise não podem ser limitados a um único caminho de reação (SINHA et al., 2000). Os produtos gerados possuem valor comercial agregado, sendo assim, a utilização desse processo torna-se válido não só pela destinação dos resíduos, mas também por ser viável economicamente.

3.2.1 Tipos de pirólise

O tipo de processo de pirólise se dá por meio das condições de operação, os principais processos são classificados em carbonização (muito lenta), pirólise convencional (lenta), rápida e flash pirólise (DEMIRBAS, 2007). A Tabela 2 apresenta as variantes do processo.

Tabela 2 - Variantes do processo de pirólise.

Variantes do processo	Tempo de residência	Temperatura do processo, °C	Produtos obtidos
Carbonização	Horas/dia	400 – 450	Carvão vegetal
Convencional	5-30 min	até 600	Bio-óleo, carvão e gás
Rápida	0,5 – 5 s	500 – 550	Bio-óleo
Flash-líquido	< 1 s	< 650	Bio-óleo
Flash-gás	< 1 s	> 650	Gás combustível
Vácuo	2 – 30 s	400	Bio-óleo
Metano-pirólise	< 10 s	> 700	Produtos químicos

Fonte: Adaptado de Gómez, 2002.

Pode-se perceber que os principais fatores é o tempo de permanência e a temperatura, porém o tipo de resíduo e reator utilizado na pirólise também pode influenciar nos produtos obtidos (CHHITI; KEMIHA, 2013). Porém o presente trabalho abordará com maior ênfase a respeito de um destes tipos, que é o processo de pirólise lenta.

3.2.2 Pirólise Lenta

A pirólise lenta é uma tecnologia versátil, de fácil aplicação e manuseio, na qual é uma alternativa para ser implantada tanto em pequenas fábricas que produzam algum tipo de matéria orgânica com as produtoras de castanha de caju, ou até mesmo em grandes cidades como forma de aproveitamento do potencial energético dos resíduos sólidos gerados na forma de biomassa, ou seja, todo material orgânico que tenha origem animal ou vegetal visando à

produção de energia, tendo ainda como vantagem adicional uma alternativa a mais para minimizar os danos causados ao meio ambiente.

A pirólise lenta pode ser dividida entre carbonização e pirólise convencional. Segundo Basu (2010), a carbonização ocorre quando se deseja a obtenção do carvão. Assim, a biomassa é aquecida a uma temperatura de pirólise relativamente baixa (em torno de 400 °C) numa taxa de aquecimento muito lenta (menor que 5 °C/min, e o tempo de residência no reator pode ser de até alguns dias, fazendo com que os vapores condensáveis reajam entre si otimizando a produção de carvão.

A pirólise convencional produz parcelas de carvão, bio-óleos e gases. A temperatura final da pirólise convencional é em torno de 400 a 500°C, a biomassa é aquecida numa taxa de aquecimento mais alta que para carbonização, porém ainda baixa, e o tempo de residência dos vapores no reator varia de 5 a 30 minutos. Assim, os vapores condensáveis que se formam no reator sofrem reações entre si, formando o carvão, mas uma parcela do mesmo somado aos vapores não condensáveis ainda são ejetados, podendo ser resfriados formando o óleo de pirólise e os gases (MOHAN et al., 2006).

3.2.3 Produtos obtidos

Basu (2010), Chen et al. (2014) e Chhiti e Kemiha (2013), dividem os produtos obtidos no processo em:

- Fração sólida: o carvão, estrutura de carbono porosa (aprox. 85% de carbono), que pode conter mineral ou até mesmo frações de hidrogênio ou oxigênio, caso a reação seja incompleta. Ele pode ser utilizado como combustível, através de briquetes, possuindo um poder calorífico inferior (PCI) de aproximadamente 32 MJ/kg, ou pode ser aprimorado para a produção de carbono ativado. Além disso, a fração sólida contribui para que o processo seja autossuficiente, já que sua queima produz energia para dar continuidade ao processo.
- Fração líquida: denominada bio-óleo, ou óleo de pirólise, é uma mistura entre água, oxigênio e diversos compostos hidro carbonados de estruturas complexas, entre eles os hidroalaldeídos, hidroxiconas, açúcares, ácidos carboxílicos e compostos fenólicos. Possuem um PCI de aproximadamente 13 – 18 MJ/kg e podem ser aprimorados em combustíveis e diversos produtos químicos.

- Fração gasosa: É composta por dois tipos de gases, os gases condensáveis, que ao serem resfriados se condensam formando compostos que fazem parte da fração líquida dos produtos da pirólise, e os gases não condensáveis, como o H₂, CO₂, CO e CH₄. O PCI dos gases pode variar entre 11 a 20 MJ/kg, dependendo da temperatura de pirólise.

3.3 TIPOS DE REATORES DE PIRÓLISE

A fim de aperfeiçoar o desempenho do processo de pirólise assim como os produtos obtidos deste processo, o desenvolvimento de reatores de pirólise vem sendo estudados. Cada tipo de reator apresenta características específicas para cada material de interesse no processo. Os reatores de pirólise podem ser classificados num sistema em batelada ou contínuo, podendo apresentar um leito fluidizado ou fixo.

3.3.1 Leito fixo

O sistema de pirólise de leito fixo consiste em um reator com um sistema controlado de aquecimento. A tecnologia do reator de leito fixo é simples e confiável para os combustíveis que são relativamente uniformes em tamanho e têm um baixo teor de gases leves em sua composição (RAJA, 2013).

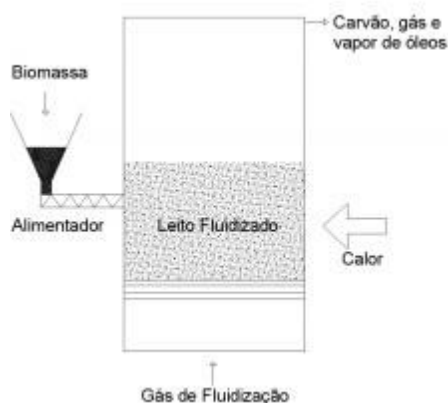
Estes tipos de reatores estão sendo utilizados para geração de calor e energia em pequena escala. Os reatores de leito fixo geralmente operam com a conservação de carbono elevado, longo tempo de residência sólida, baixa velocidade de gás e baixo teor de cinzas. O principal problema destes reatores é a remoção do alcatrão, no entanto os progressos recentes na conversão térmica e catalítica do alcatrão estão sendo empregados para sua remoção (JAHIRUL et. al. 2012).

3.3.2 Leito fluidizado borbulhante e circular

O processo de pirólise em reatores de leito fluidizado pode ser tanto borbulhante como circulante. O reator borbulhante possui uma alta taxa de aquecimento devido ao contato homogêneo do fluido presente em seu interior com a biomassa, sendo ideal para a produção do bio-óleo, porém, deve-se remover o carvão assim que ele é produzido, pois ele age como catalisador do processo de craqueamento do vapor, acelerando assim reações secundárias

entre os vapores não condensáveis e minimizando a fração líquida dos produtos. A Figura 5 mostra o esquema do reator de leito fluidizado borbulhante.

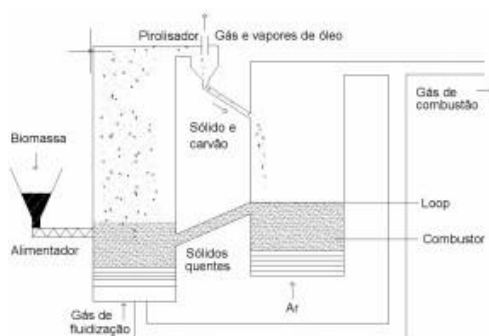
Figura 5- Reator de leito fluidizado borbulhante.



Fonte: Basu (2010).

O leito fluidizado circulante funciona no mesmo processo, porém a velocidade do gás de arraste é maior que no leito borbulhante, fazendo com que os sólidos inertes, juntamente com partículas de carvão deixem o reator para serem capturados por um ciclone. Após serem capturados, são transportados para uma câmara onde o carvão irá sofrer combustão, transferindo calor para as partículas inertes, que irão retornar ao reator aquecidas e irão se misturar ao gás de fluidização para recomençar o ciclo. A Figura 6 mostra o esquema do reator de leito fluidizado circular.

Figura 6 - Reator de leito fluidizado circular.



Fonte: Basu (2010)

3.4 O PROCESSO DE PIRÓLISE LENTA NO BRASIL

Existem no Brasil, dois exemplos de plantas que utilizam a pirólise lenta. Uma planta da TJMC Empreendimentos, intitulada Natureza Limpa e uma da Innova Energias Renováveis. A primeira é de grande porte e está projetada para receber os resíduos orgânicos provenientes do RSU da cidade de Unaí- MG. A usina trabalha a uma temperatura média de 500°C de modo contínuo, com capacidade de 72 t/dia (ALVES, 2016).

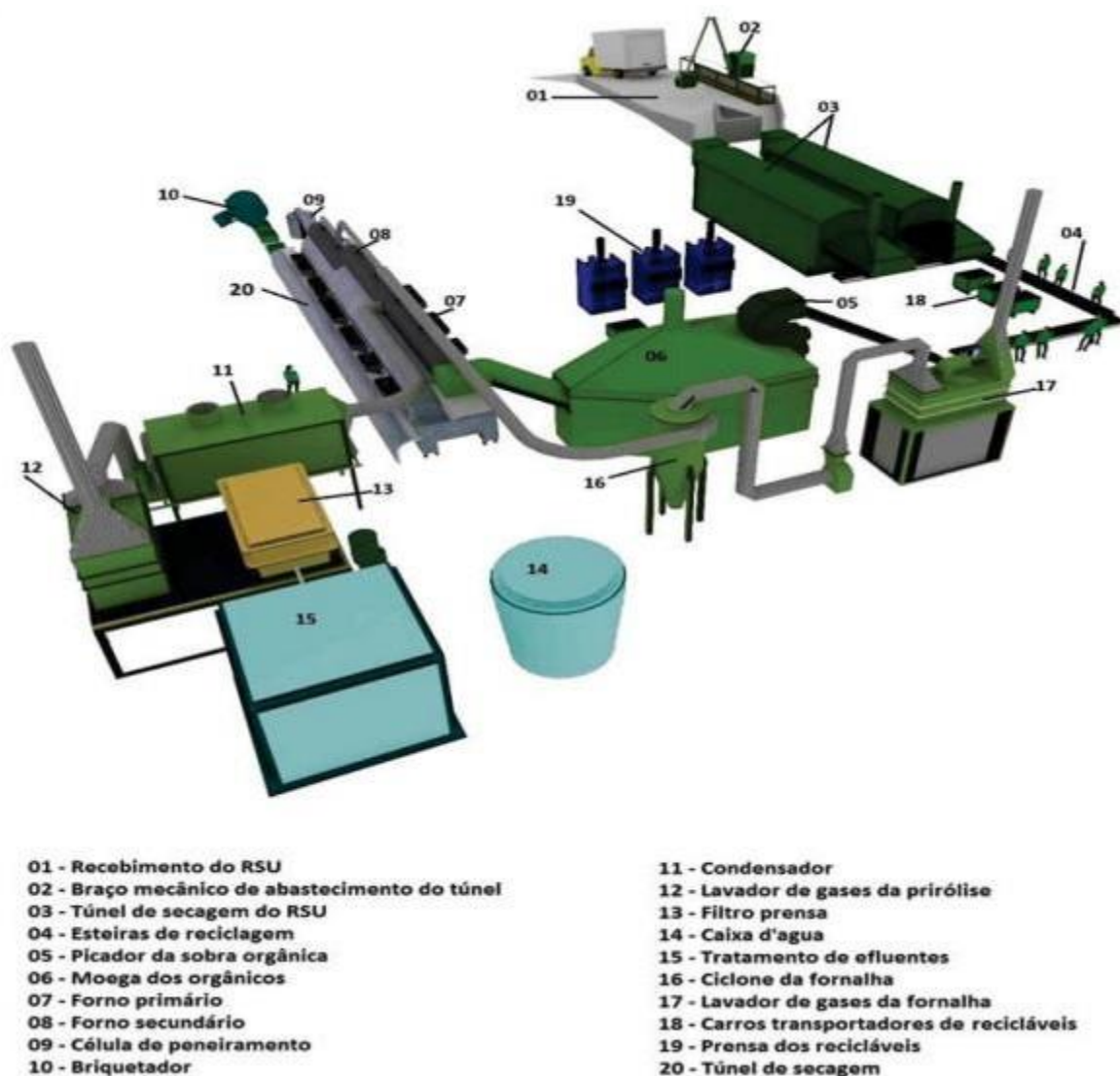
Os resíduos sólidos coletados são dispostos na moega, que possui capacidade de 30 toneladas de carga. Estes resíduos são levados a um forno secador com capacidade de 5 ton/h, que tem a função de desumidificar os resíduos em até 20%, desodorizar em até 60%. Depois de desumidificado, são encaminhados a um separador densimétrico que possui capacidade de 5 ton/h, com função de separar por densidade os materiais recicláveis.

A próxima etapa é a de triagem onde são retirados os materiais recicláveis, em seguida ocorre a trituração dos orgânicos restantes, o triturador possui capacidade de 4 ton/h, tem a função de desfragmentar a sobra orgânica numa granulometria de aproximadamente 5 cm³.

Essa matéria orgânica triturada é levada ao transportador rotativo térmico, possui capacidade de 4 ton/h, esse material é transportado para o reator de pirólise e é lá onde ocorre a pirólise da matéria orgânica, a uma temperatura média de 450°C , tempo de permanência no reator de 30 minutos e consumindo cerca de 10 toneladas de carvão por dia. O processo gera o carvão, que é posteriormente secado e armazenado para futuro uso e comercialização.

Os gases do processo são filtrados e lavados, a água de lavagem tratada e os efluentes líquidos são condensados e reutilizados no processo. A geração de calor ocorre nas caixas de combustão, com tocha de 600°C, que tem a função de gerar energia calorífica, cujo combustível é o pó de carvão do próprio processo (TJMC EMPREENDIMENTOS, 2016). Observar Figura 7.

Figura 7- Processo da Usina de UNAÍ – MG.

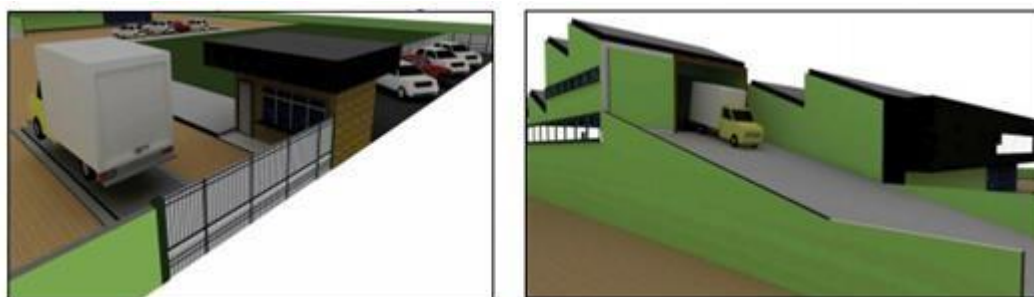


Fonte: TMJC Empreendimentos, 2016.

3.4.1 Funcionamento

Os veículos de coleta de RSU efetuam a descarga do lixo total da cidade e de municípios vizinhos num silo de concreto (Figura 8), provido de caixa de captura de lixiviado instalada abaixo do silo para contenção do chorume proveniente da decomposição da matéria orgânica. Esta caixa fechada e impermeabilizada objetiva evitar o contato do efluente com o solo conservando sua qualidade bem como das águas subterrâneas.

Figura 8– Representação da balança e do silo de descarga.



Fonte: TMJC Empreendimentos, 2016.

Do silo os resíduos seguem através de um braço mecânico para os túneis de secagem que são mantidos a uma temperatura média de 120°C. A função dos túneis de secagem é retirar umidade do material e facilitar a etapa seguinte de separação do material reciclável.

Após a secagem, os materiais seguem por uma esteira, onde funcionários retiram todo o material passível de reciclagem, em seguida o material resultante é triturado e encaminhado aos fornos de pirólise. O forno primário que atinge a temperatura de 400°C faz o processo de desidratação e evaporação dos gases iniciando a desfragmentação da massa orgânica. O forno secundário, cuja temperatura atinge 800°C, completa o processo de carbonização.

Os resíduos são dispostos em um cilindro em movimento (voltas de 360°) localizado dentro do forno, não havendo contato direto do material com a chama. A umidade dentro do forno é inferior a 3%, ocorrendo a desidratação do material e emissões atmosféricas classificadas como vapor úmido.

Com exceção da fase inicial em que o forno deve ser alimentado com lenha de procedência legal, no restante do processo o forno de pirólise utiliza o próprio carvão produzido no empreendimento que produz cerca de 20 toneladas por dia.

Os gases em forma de vapor, provenientes dos fornos primário, secundário e também da fornalha de aquecimento, passam por processo de destilação, condensação, lavagem e filtragem, retornando ao estado líquido, de onde são retirados óleo, lignina, alcatrão e água ácida.

De acordo com o projeto inicial os produtos resultantes do processo seriam comercializados e o pó de carvão, transformado em briquetes (após processo de prensagem) e aproveitado para geração de energia elétrica em termelétrica que seria construída anexa à unidade de carbonização. A Figura 9 mostra a composição das instalações da usina.

Figura 9- Composição das instalações da usina. Vista interna descarga de material (a), vista externa entrada na moega (b) e reator pirolítico (c).



(a)



(b)



(c)

Fonte: TMJC Empreendimentos, 2016.

Podem ser tratados todos os resíduos sólidos urbanos, ou seja, de origem domiciliar, comercial e de limpeza urbana. Os plásticos, papéis, borrachas, óleos comestíveis e lubrificantes podem integrar a massa a ser convertida em carvão. Para cada vertente há uma estrutura ajustável da usina de acordo com a demanda de resíduos (COLESANTI; MORAIS, 2014). Outro detalhe é que, o sistema não necessita de combustível externo, pois ele se auto alimenta com uma fração de 15% de carvão produzido na própria usina. O rejeito do processo é praticamente zero, pois as cinzas, que seriam os rejeitos, são reaproveitadas na produção de cimento em fábrica anexa (TJMC EMPREENDIMENTOS, 2016). O carvão produzido pelo processo pode substituir o carvão vegetal usado na queima em fornos para geração de energia (COLESANTI; MORAIS, 2014).

Os vapores e gases depois de purificados por filtro passam por um processo de liquefação por destilação, resultando em subprodutos com valor de mercado. Já os efluentes líquidos procedentes da manipulação dos RSU são recolhidos num tanque impermeável para posterior bombeamento no forno e incorporação à massa pirolisada (TJMC EMPREENDIMENTOS, 2016)

Outro exemplo dessa tecnologia, utilizando a pirólise lenta, é a planta piloto da empresa Innova Energias Renováveis, que utiliza o reator de tambor rotativo com tempo de permanência da biomassa de uma hora e com temperatura média de 450°C. Esta tecnologia produz 80% de gás (syngas) e 20% de sólido (biochar). A unidade possui capacidade de até 2t/dia de resíduos, possui porte comercial, porém ainda não possui aplicação, é utilizada apenas para demonstração e está localizada em Paulínia – SP (MELO, 2016).

A empresa vende essa tecnologia, juntamente com a instalação e a operação do processo, porém ainda não possui nenhuma planta comercial instalada, apenas projetos futuros que não puderam ser revelados (MELO, 2016). O processo, de uso exclusivo desta empresa, ocorre de acordo com a Figura 10 que mostra o processo da Innova Energias Renováveis.

Figura 10- Processo da planta de pirólise da Innova Energias Renováveis.



Fonte: Melo, 2016.

De acordo com a Figura 11 os resíduos da coleta são despejados em um fosso (2) e em seguida inseridos em uma unidade de pré-tratamento, com o objetivo de separar metálicos (4) e reduzir a granulometria (5,6). A tecnologia exige a presença de pelo menos 30% de umidade na biomassa, para favorecer a reação de gás de água.

Do total de resíduos coletados, 10% são recicláveis e os outros 90% são usados no processo de pirólise. A biomassa fina é colocada no reator (7), onde ocorre o processo de pirólise, o subproduto sólido (biochar) é recolhido para seu futuro aproveitamento e o gasoso (gás syngas), é encaminhado aos filtros para seu tratamento (8). Nos ciclones, ocorre a remoção dos particulados, no pré saturador, ocorre o resfriamento do gás úmido, no Venturi, ocorre a remoção de particulados finos e logo em seguida o gás passa pela torre de lavagem, onde ocorre a condensação de água e neutralização de gases ácidos, assim, o gás limpo é armazenado (10) para futuro uso energético.

Este processo é autossustentável na utilização de água. A água de lavagem opera em circuito fechado passando pelo sistema de remoção de sólidos e é inserida novamente no reator (MELO, 2016).

Figura 11- Planta da empresa Innova.



Fonte: Melo, 2016.

O gás combustível gerado é livre de contaminantes, produz emissões limpas e possui um poder calorífico alto. Pode substituir outros combustíveis em caldeiras e produzir energia elétrica em geradores a gás. O biochar, que é o carvão vegetal em pó, possui uso agrícola ao ser aplicado no solo obtém-se uma série de vantagens, ajuda a minimizar o lixiviamento de fertilizantes, aumenta a retenção de água no solo, incorpora a matéria orgânica, promove o crescimento de micro-organismos essenciais para a absorção de nutrientes e etc (MELO, 2016).

Esta tecnologia possui uma grande flexibilidade, podendo tratar qualquer biomassa com umidades de 10 a 65% de: Resíduos Urbanos (com ou sem segregação), Resíduos de Serviço de Saúde, Resíduo Industrial, incluindo lodo de esgoto e etc. (MELO, 2016).

3.5 PROCESSOS ALTERNATIVOS A PIRÓLISE

Estudos realizados por Moraes (2017) apontam as principais tecnologias desenvolvidas no Brasil que podem ser consideradas alternativas para o tratamento ou destinação final dos resíduos sólidos são: a triagem, a incineração e os aterros sanitários.

□ TRIAGEM

O processo de triagem possui como objetivo principal promover a recuperação de materiais que depois da reciclagem possam ser reutilizado, onde parte desse processo se inicia por meio da coleta.

A recuperação e a reciclagem de materiais apresentam diferentes aspectos positivos: como geração de emprego e renda para famílias através da legalização dos catadores, a promoção de um modelo de desenvolvimento mais sustentável (ao incentivar a reutilização de matéria prima), e a redução do impacto ambiental, uma vez que materiais que levam anos para se decomporem recebem uma destinação final correta.

Os materiais coletados são transportados para uma unidade, onde a mesma é equipada basicamente com esteira, mesas de separação, prensa de materiais e balança em uma estrutura adequada com as sequencias das atividades organizadas (MORAES, 2017).

Quando comparado ao processo de pirólise a triagem é classificada como uma das etapas iniciais do mesmo e o que difere essencialmente é que os materiais que não são aproveitados durante a triagem, seguem para outras etapas onde serão aproveitados posteriormente.

- INCINERAÇÃO

A produção de energia também pode ser considerada um destaque neste tipo de tecnologia. Quanto à eficiência do processo, conforme DEFRA (2007), de toda energia disponível nos resíduos, mais de 80% pode ser aproveitada por uma caldeira durante a produção do vapor. Entretanto, estudos realizados indicam que a produção energética está diretamente ligada ao tipo de resíduo.

Dentre os principais problemas desse tipo de tecnologia, destacam-se a produção de compostos como dióxido de carbono, toxinas e metais pesados. A fim de evitar a emissão desses compostos para atmosfera é necessário instalar, nos incineradores, filtros e sistemas de tratamento dispendiosos. Os filtros usados, fortemente contaminados, devem ainda ser depositados em aterros (COSTA, 2006).

A diferença fundamental deste processo em relação ao de pirólise é que durante a combustão dos resíduos existe a presença do oxigênio em alta quantidade, ou seja, ocorre a queima, fazendo com que sejam gerados gases poluentes, cinzas e escória. Com isto ocorre uma degradação acentuada dos componentes mecânicos que o constituem.

- ATERROS SANITÁRIOS

De acordo com Obladen, e Barros (2009) são classificados em dois tipos; aterros controlados e sanitários.

- Os aterros controlados são locais onde o ambiente é comprometido, porém em menor escala com relação aos lixões, pois possui alguns fatores de proteção ambiental, como impermeabilização do solo ou cobertura de terra sobre os resíduos, sendo estes insuficientes para serem considerados adequados.
- Os aterros sanitários, que são obras de engenharia de disposição dos resíduos que possuem algumas características mínimas, como impermeabilização do solo, tratamento de percolados e dos gases liberados. A Figura 12 traz o esquema de um aterro sanitário.

Figura 12 - Esquematisação de um aterro sanitário.



Fonte: Portal Resíduos Sólidos, 2019.

Além do fato de não aproveitar os resíduos orgânicos para geração de energia ou obtenção de subprodutos, os aterros sanitários possuem um alto custo desde o projeto, passando por sua execução até seu funcionamento, de acordo com o Tribunal de Contas da União em seu relatório de auditoria operacional para o monitoramento do programa de resíduos sólidos em 2012 a média do custo por tonelada aterrada era de 81 reais.

3.5.1 Quadro comparativo

A comparação entre as diferentes tecnologias para o tratamento de RSU não dependem apenas dos processos, mas do contexto quanto à finalidade, caracterização dos resíduos, formas de custeio e receita, levando tudo isto em consideração a Tabela 3 traz um comparativo geral entre os processos citados acima com relação ao processo de pirólise lenta.

Tabela 3 - Comparativo entre procedimentos alternativos em relação à pirólise lenta.

TRIAGEM	INCINERAÇÃO	ATERROS SANITÁRIOS	PROCESSO DE PIRÓLISE LENTA
Aproveitam-se apenas materiais recicláveis.	A combustão ocorre na presença do oxigênio.	Utiliza em sua maioria somente a parte orgânica dos resíduos.	Aproveitam-se a grande maioria dos tipos de resíduos gerados.
É constituída por somente uma etapa.	Alto teor de gases poluentes, cinzas e escória.	Não há geração de outros produtos a partir dele.	O processo ocorre na ausência de oxigênio, logo não há combustão.
Baixa Viabilidade Econômica	Baixa vida útil dos componentes, média de 10 anos.	Possui limite de capacidade e tem um alto custo	Geração de subprodutos e boa viabilidade econômica.

Fonte: Autoria, 2019.

4 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foi elaborada uma pesquisa de caráter bibliográfico, a respeito da viabilidade econômica da instalação de uma planta de pirólise lenta, bem como os principais equipamentos e especificações técnicas necessárias para o município de Mossoró-RN, tomando como base uma planta com capacidade semelhante a do estudo em questão, para isto fez-se necessário o recolhimento de dados contidos em artigos, dissertações e documentos que fazem referência ao tema, de posse dessas informações tornou-se possível estimar o arrecadamento bruto com a instalação e seus produtos de potencial comercialização para um período de 25 anos de funcionamento, é importante salientar que foi levado em consideração como um dos pontos de partida a restrição imposta pela ANEEL para mini geração de energia de 1 MWh.

A pesquisa ainda abordou um estudo de caso a respeito do Núcleo Tecno-Ambiental Railton-Faz, esta também de cunho bibliográfico, em que o grande motivador foi a capacidade do protótipo produzir não só os produtos convencionas da pirólise lenta, mas utilizar parte

deles para produção de energia limpa e comercializável que é gerada em uma termelétrica acoplada a própria planta.

5 DESENVOLVIMENTO

5.1 VIABILIDADE ECONOMICA PARA A CIDADE DE MOSSORÓ.

Diariamente o município de Mossoró-RN produz em média cerca de 160 toneladas de RSU por dia, de acordo com o estudo feito por meio de análises quantitativas e qualitativas, bem como análises gravimétricas realizadas a partir de visitas ao aterro da cidade e as associações de resíduos recicláveis ACREVI E ASCAMAREM. (FERREIRA, CAMACHO e NETO, 2012). Portanto tendo como propósito de solução de tratamento de parte desses resíduos que de acordo com Ferreira, Camacho e Neto (2012) praticamente esgotaram a capacidade do aterro sanitário da cidade, será feita uma estimativa levando em consideração condições de operação que atendam aos seguintes aspectos: solucionar a disposição final de resíduos sólidos, eliminar passivos ambientais existentes como os lixões e outras áreas contaminadas, aliviar o volume das células dos aterros, condições economicamente viáveis e sustentáveis com aproveitamento energético.

Para isto devem-se levar em consideração as condições de aproveitamento da mini geração estabelecidas na resolução Aneel 482/2012, que estabelece que o modelo proposto tem necessariamente que ter sua produção de energia limitada a 1MWh.

Segundo Rodrigues et al. (2014, p. 8) uma unidade de 1MWh tem capacidade de oferta de 24MW por dia, em regime de operação de 24h, e consome em torno de 47 toneladas no processo de pirólise lenta. Sua oferta de energia, com base na resolução da mini geração, pode ser utilizada para compensar a energia consumida pelo município.

Devido à limitação imposta pela Aneel citada acima a estimativa terá como base a utilização de apenas 30% da quantidade de RSU produzida diariamente no município, que dá um total de 48 toneladas, portanto das 160 toneladas de lixo produzidas 48 seriam destinadas a planta de pirólise lenta para geração de 24MW de energia por dia.

Nesse contexto, a energia gerada na usina poderia ser utilizada, por exemplo, para alívio das células do aterro da cidade que se encontram praticamente saturados, bem como compensar uma parte do consumo de unidades vinculadas ao CNPJ da prefeitura da cidade, podendo ser escolas, prédios públicos municipais, iluminação pública municipal, entre outras.

A prefeitura municipal no ano de 2017 calculou um consumo com iluminação pública de aproximadamente 47.376 MW/ano, levando em consideração que o período máximo de

funcionamento da planta seja de 330 dias por ano, tem-se que a quantidade de energia produzida seria de 7920MW/ano.

Por conta da limitação imposta para a utilização de apenas 30% a quantidade de energia não seria suficiente para compensação total, porém ainda sim a prefeitura poderia obter uma economia considerável anualmente.

Conforme Rodrigues et al. (2014, p. 8), uma usina desse porte consumiria em média cerca de 72MW/mês utilizando cerca de 2.8 toneladas do bio-carvão gerado diariamente, sendo assim para ser autossustentável, a mesma consumiria 864MW/ano da própria energia gerada. Logo a estimativa de geração anual de energia produzida a ser comercializada seria a diferença entre a quantidade de energia gerada no processo e o quanto ela consome para funcionar, ou seja, seria cerca de 7056MW por ano.

Tal operação traduz uma compensação energética que pode evitar um custo estimado para o município de até R\$ 3.570.336,00 por ano, levando em conta a tarifa atual do município que é de R\$ 0,506 por kW.

Já o bio-carvão, subproduto gerado no processo, também possui valor no mercado, onde Caibre (2013, p. 104), através de consultas a empresas do ramo na cidade de Concórdia, estimou o valor médio pago por tonelada, que fica em torno de 225 reais. Logo para o cálculo da receita com a venda do bio-carvão tem-se que: a cada 48 toneladas de RSU processados produzem-se aproximadamente 14,4 toneladas de bio-carvão/dia, já que no processo cerca de 30% da porcentagem em massa depois do processamento é composto pela fração sólida. Logo, como a planta consome cerca de 15% a 20% do próprio carvão para gerar sua própria energia, e aproximadamente 7 toneladas para gerar 1MW/dia sobram ainda por volta de 5 toneladas por dia para serem comercializadas, sendo assim anualmente o mesmo gera cerca de R\$ 371.250,00. A Tabela 4 traz um resumo da estimativa feita da receita bruta gerada por uma planta com capacidade de 48 toneladas por dia.

Tabela 4 - Estimativo da receita bruta de uma planta de pirólise com capacidade de 48 t.

Capacidade do Equipamento	Eficiência	Preço	Receita Bruta/Ano (330 dias)
48 toneladas de RSU/dia	1MWh	R\$ 0,506 por kW	R\$ 3.570.336,00
5 toneladas de bio-carvão/dia	1 ton de RSU = 312 kg de bio-carvão	R\$ 225,00/t	R\$ 371.250,00
	Total		R\$ 3.941.586

Fonte: Autoria, 2019.

Para os custos operacionais compostos por pessoal, foram determinados de acordo com Caibre (2013, p. 103) e tendo como base e a situação de cada região levando em consideração os salários médios pagos atualmente para cada cargo e tendo em vista o funcionamento da planta em três turnos de 8 horas. A Tabela 5 mostra os salários médios e a quantidade de funcionários necessários para a operação da planta de pirólise com capacidade de processamento de 48 toneladas por dia.

Tabela 5 - Salários médios e a quantidade de funcionários necessários para a operação da planta de pirólise com capacidade de processamento de 48 toneladas por dia.

Profissional	Quantidade	Média Salarial Mensal	Salário Anual
Supervisor de manutenção	1	R\$ 6.189,00	R\$ 74.268,00
Engenheiro Químico	1	R\$ 6.189,00	R\$ 74.268,00
Técnico de Manutenção	7	R\$ 2.097,38	R\$ 176.179,92
Operador de produção	21	R\$ 998,00	R\$ 251.496,00
Assis. Administrativo	5	R\$ 1.575,00	R\$ 94.500,00
		Subtotal	R\$ 670.711,92
		Encargos 70%	R\$ 469.4988,34
		Total	R\$ 1.140.210,26

Fonte: Adaptado de Caibre 2013.

O custo de mão-de-obra para a operação da planta foi estimado como descrito na tabela acima, tendo como custo direto um subtotal de R\$ 670.711,92.

Os encargos sociais levam em conta os impostos e contribuições às instituições como: SESI (Serviço Social da Indústria), INSS (Instituto Nacional de Serviços Sociais), SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial), INCRA (Instituto nacional de Colonização e Reforma Agrária), SEBRAE (Serviço de Apoio a Pequena e Média Empresa), Salário Educação, Serviço Contra Acidentes de Trabalho, FGTS (Fundo de Garantia por Tempo de Serviço, entre outros.

Já os encargos trabalhistas são formados pelo recebimento de férias, 13º salário, descanso semanal remunerado, acidente de trabalho, auxílio doença, licença maternidade/paternidade, faltas justificadas e o aviso prévio.

Portanto a soma destes encargos sobre o salário mínimo varia de 70% a 100% e depende do tipo de indústria e as condições de trabalho. Para o estudo foi utilizado o valor de 70% justificando uma maior viabilidade econômica do processo de instalação da planta.

Diante desta estimativa os custos operacionais fixos compostos por mão-de-obra resultam em um total de R\$ 1.140.210,26.

Ainda de acordo com Caibre (2013, p. 101) o investimento inicial para instalação de uma planta que processa 47 toneladas por dia é de R\$ 13.686.073,25, como mostrado na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6 - Custo do investimento inicial para uma planta com capacidade de 47 toneladas por dia.

Ativos de Capital Inicial	Valor (R\$)
Aquisição de terreno (7.500,00 m ²)	0,00
Projetos de engenharia e licenças ambientais	238.809,77
Construção civil 2000 (m ²)	1.400.000,00
Unidade de pirólise 47 t/dia	11.936.263,48
Unidade de segregação de resíduos	111.000,00
Total R\$	13.686.073,25

Fonte: Caibre 2013.

Quando comparado com a planta de Unaí-Mg, que processa quase o dobro dessa capacidade, e teve um investimento de quase 30 milhões de acordo com a TMJC Empreendimentos, que é a empresa responsável pela usina; o investimento da tabela acima se justifica já que gira em torno de 13 milhões.

Tomando como base a estimativa feita para 47 toneladas, o investimento inicial para uma planta com capacidade para 48 toneladas seria de um valor um pouco acima, que ficará em torno de 13.800.000,00.

Portanto tendo em vista que uma planta como esta possui vida útil de 25 anos em média, tem-se que o ganho total com a mesma durante sua vida útil gira em torno de R\$ 70.034.393,5 e, portanto subtraindo o valor do investimento inicial de R\$ 13.800.000,00, tem-se que o retorno seria em torno de R\$ 56.234.393,5.

5.1.1 Equipamentos e maquinário

Uma unidade de pirólise lenta é composta por uma série de maquinários e equipamentos necessários para processar e transformar os resíduos em subprodutos e obter energia, podendo variar de acordo com cada tipo.

Para a situação da estimativa feita acima, a planta seria uma unidade baseada em outras existentes, porém de menor porte e com configuração particular, já que sua capacidade seria de 48 toneladas por dia. A Tabela 7 menciona os equipamentos necessários e suas funções para instalação da planta.

Tabela 7 - Equipamentos e maquinário necessários para instalação da unidade.

EQUIPAMENTOS / MAQUINÁRIO	FUNÇÃO
Moega Primária	Armazenar os resíduos coletados
Alimentador de resíduos	Depositar os resíduos na esteira primária
Esteira Primária	Acesso ao túnel de secagem
Esteira Secundária	Triagem de recicláveis
Triturador de Orgânicos	Diminuir a granulometria e inserção no Funil
Funil com parafuso sem Fim	Inserção para dentro do Reator
Esteira Final	Saída dos materiais do Reator
Peneira	Separar o pó de carvão
Forno na parte inferior do Reator	Aquecer o Reator
Sistema de Filtragem de gases	Filtrar os Gases
Condensador	Obtenção dos produtos líquidos
Exaustor	Saída de vapor de gases
Prensa	Obtenção dos briquetes de carvão
Sistema termelétrico	Obtenção de energia elétrica

Fonte: Autoria, 2019.

- Principais Especificações.

Alimentador de Resíduos

Modelo / Fabricante: DOOSAN DX280 / JONYANG

Peso total: 25 Toneladas.

Comprimento total: 13 metros.

Comprimento do braço: 5,2 metros.

Altura Máxima da carga: 5 metros.



Fonte: Catálogo Jonyang , 2019.

Capacidade Máxima de elevação: 1800 kg.

Contra peso: Nenhuma necessidade.

Custo Médio: 250.000,00 US\$ ou 1.000.000,00 R\$.

Esteiras primária e secundária:

Modelo / Fabricante: ER25 / DEMAINE

Comprimento: 25 metros.

Comprimento de correia: 2,5 metros.

Tração do motor: 7,5cv.

Velocidade: 20m/min.

Capacidade: 70 kg/m.

Custo: 16.000,00 R\$ a 20.000,00 R\$

Esteira Final:

Modelo / Fabricante: ER15 / DEMAINE

Comprimento 15 metros.

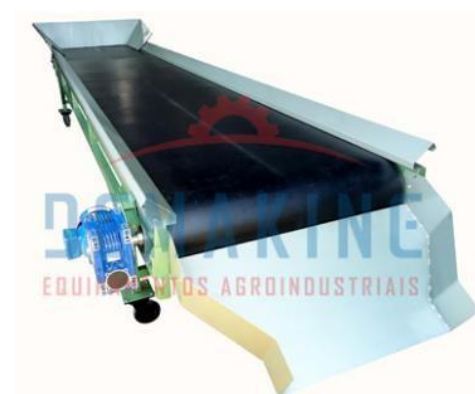
Largura de correia 1.5 metros

Tração do motor: 4cv.

Velocidade: 15m/min.

Capacidade: 60 kg/m.

Custo: 13.000,00 R\$ a 15.000,00 R\$



Fonte: Catálogo Demakine , 2018.

Triturador:

Modelo / Fabricante: SHARK 440D / TANA

Capacidade de processamento: 2 ton/h.

Potência: 595 cv.

Peso operativo: 27.100 kg.

Comprimento do rotor: 3 metros.



Fonte: Catálogo Tana Shark , 2018.

Largura Total: 2.52 metros.

Custo Médio: 500.000,00 US\$ ou 2.000.000,00 R\$.

Peneira:

Fabricante: DEMAKINE

Tipo: Vibratória

Medidas: 2,9m x 2m.

Processamento: de 1500 kg/hora.

Tração do Motor: 2.5 cv.

Custo: 7000,00 R\$.



Fonte: MFRural, 2018.

Reator de Pirólise / Forno:

Modelo / Fabricante: WJ-9 / BESTON

Tipo: Horizontal Rotativo.

Material do forno: Refratário.

Material do reator: Aço Q245R.

Temperatura máxima do reator: 1100°C.

Dimensões 2.8m x 7.1m.

Custo Médio: 1.500.000,00 R\$.



Fonte: Catálogo BESTON, 2015.

Prensa Hidráulica:

Modelo / Fabricante: BRL-35 / LIPPEL

Capacidade Máxima: 3.5 ton/horas.

Tamanho dos briquetes: 40 cm.

Pressão de trabalho: 20 toneladas.

Peso total: 2610 kg.

Potência do motor: 15 a 20 cv.

Custo: 300.000,00 R\$



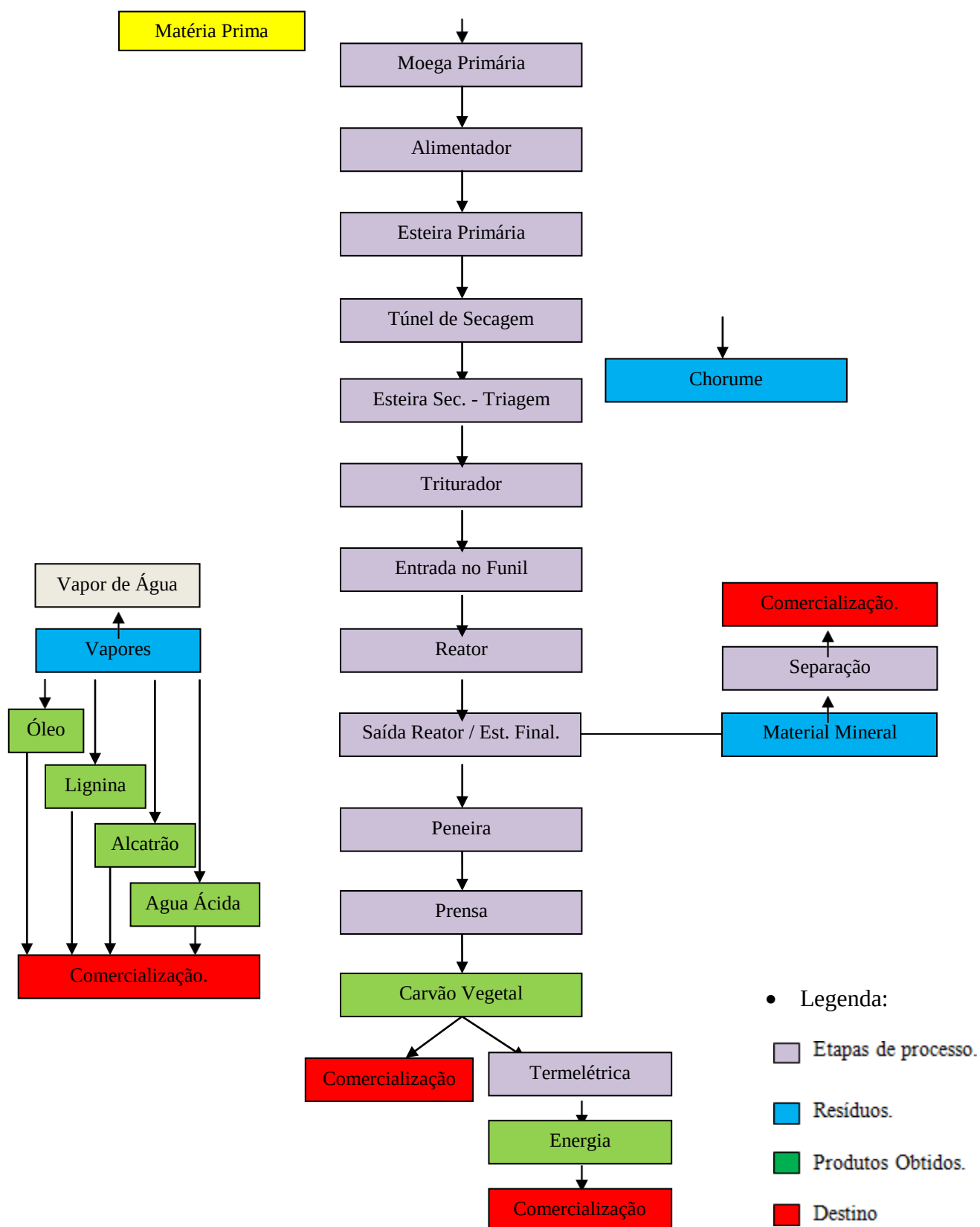
Fonte: LIPPEL, 2019.

As especificações técnicas foram obtidas a partir dos catálogos da Jonyang, Demakine, Tana, Beston e Lippel, assim como nos sites dos fabricantes, a partir de equipamentos que atendessem as solicitações e tivessem seu custo médio disponível.

Pôde-se observar um gasto médio de aproximadamente 5 milhões de reais com maquinários principais, porém os valores com instalação e as outras partes e não foram inclusas nesse somatório já que a moega de armazenamento é fabricada por conformação mecânica e o seu custo depende de orçamento acordado cliente e fabricante, ou seja, não se encontra modelos prontos com as necessidades do projeto no mercado. Os sistemas de gases utilizando condensadores assim como o termelétrico devem ser dimensionados, executados e instalados por profissional habilitado, por meio de projeto.

Dependendo do processo, do volume de resíduos sólidos e de quais produtos se deseja obter ao final existe uma grande possibilidade de layouts possíveis. As especificações acima são para a implantação de uma planta na cidade de Mossoró e de acordo com os dados já apresentados anteriormente. O fluxograma presente na Figura 13 abaixo traz o fluxo dos processos na planta.

Figura 13 - Fluxograma do processo produtivo.



Fonte: Aurtoria, 2019.

O fluxograma acima trata da sequência do processo, bem como dos resíduos gerados e os produtos obtidos ao final do processo que é destinado ao uso interno para manter a planta em funcionamento e comercialização.

6. ESTUDO DE CASO: NÚCLEO TÉCNO-AMBIENTAL RAILTON-FAZ

Situado na cidade de Lagarto no estado de Sergipe o núcleo funciona a partir dos procedimentos desenvolvidos pelo pesquisador e engenheiro mecânico brasileiro José Railton Souza de Lima, destaca-se especialmente pela simplicidade e potencialidade oferecida para o tratamento e destinação dos resíduos, bem como pelo teor tecnológico envolvido, visto que boa parte do processo é automatizada.

Os rejeitos passíveis de carbonização são muitos, vão desde pó de serra, podas de árvores, bagaço de cana, restos animais, estrume bovino, até o popular “lixo” urbano, objeto principal deste estudo.

Os materiais de origem mineral como metais e vidros não são passíveis de carbonização, porém não é necessária separação prévia e podem ser aproveitados normalmente após o processo.

Da carbonização dos RSU são obtidos cinco itens que podem integrar novamente a cadeia produtiva, a saber: pó de carvão; óleo vegetal que pode ser usado para gerar biocombustível, alcatrão, lignina e água ácida.

Com exceção do primeiro, os demais são líquidos presentes na massa vegetal e animal que são volatilizados ao estado gasoso, passam por um processo de destilação e retornam ao estado líquido, sendo coletados e encaminhados para comercialização posterior com as indústrias químicas, de cosméticos, abrasivos, entre outras. O vapor de água é liberado para a atmosfera.

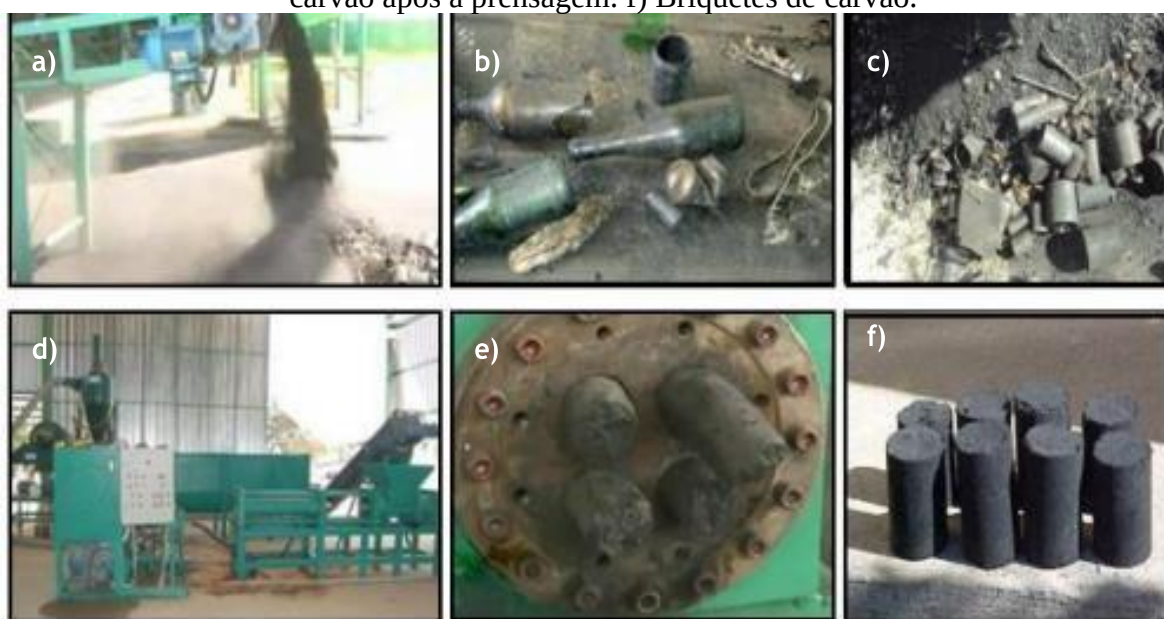
De acordo com Moraes (2012) para cada 5 toneladas processadas pelo núcleo são obtidos aproximadamente:

- Óleo vegetal – 32 Litros.
- Alcatrão – 18 Litros.
- Lignina – 12 Litros.
- Água ácida – 18 Litros
- Pó de carvão – 2 toneladas

Após a passagem pelo reator/forno de pirólise os materiais processados são resfriados até 60° C no próprio reator em cerca de 50 min, um sensor reconhece a temperatura e automaticamente abre o compartimento, a esteira é ativada transportando o material carbonizado, com sua separação feita através de duas etapas:

A primeira é uma separação manual dos materiais de origem mineral de forma manual pelos funcionários do núcleo. Já a segunda etapa é feita por um exaustor elétrico faz a sucção das partículas menores do material carbonizado direcionando-as para o formulador, onde são adicionados pigmentos vegetais ao pó de carvão, de forma a facilitar a prensagem e transformação em briquetes. A Figura 14 mostra as etapas de produção dos briquetes.

Figura 14 - Etapas de produção e briquetes. a) Despejo do material na saída do reator. b) Material mineral. c) Resultado do processamento. d) Pó de carvão no formulador. e) Pó de carvão após a prensagem. f) Briquetes de carvão.



Fonte: Moraes, 2012.

Os briquetes são encaminhados para uma prensa e mantêm o poder calorífico podendo ser aproveitados de diferentes formas, inclusive como fonte de energia para geração de eletricidade.

Paralelamente ao processo de produção de carvão foi implantada uma termelétrica alimentada com parte do carvão produzido (Figura 15). A capacidade de geração de energia vai depender do empreendimento, mas segundo Lima (2012) por se tratar de um circuito fechado são necessários entre 300 a 350 kg/h de briquetes para gerar 1 MW/h. A queima do

carvão eleva a temperatura de um cilindro contendo água que se transformará em vapor e moverá a turbina a 1.800 r.p.m com força de torção de 1.300 cv. Após concluir o giro da turbina o vapor é condensado voltando novamente à forma líquida e ao cilindro.

Segundo o inventor no sistema em circuito fechado de utilização de vapor e pressão, não há desperdício de energia térmica, em comparação com o tradicional que é utilizado caldeira, dessa forma o aproveitamento do calor é maior, reduzindo o custo de depreciação dos equipamentos e produção, gerando energia mais barata para a população. O sistema de geração de energia pode ser visto na Figura 15.

Figura 15- Termelétrica acoplada ao sistema.



Fonte: Moraes, 2012.

Segundo Lima (2012), no sistema de carbonização não sobram rejeitos, visto que os produtos resultantes possuem destinação comercial na construção civil e outros ramos da indústria. Da mesma forma, os minerais (vidro, ferro, latas e peças metalizadas) não se decompõem sendo também reinseridos na cadeia produtiva. Os fornos se auto-alimentam de uma pequena fração (10%) do próprio carvão produzido in loco, não necessitando de suplemento combustível externo e os vapores e gases são purificados por um sistema de filtros, denominado RAITEC, eliminando quase por completo os odores gerados pela decomposição natural dos resíduos orgânicos.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando todos os fatores expostos no decorrer do presente trabalho e observados as devidas ressalvas, pode-se concluir que o processo de pirólise lenta utilizando resíduos sólidos urbanos (RSU) apresenta muitas vantagens em relação a outras formas de destinação e aproveitamento do mesmo, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico com uma e pode sim ser uma alternativa de destinação dos resíduos sólidos urbanos, não apenas para a cidade de Mossoró, mas para a maioria dos municípios brasileiros. O município citado serviu de base para que se fosse feita uma estimativa bruta dos ganhos financeiros com uma possível instalação de unidade de pirólise com capacidade de processar 30% dos RSU produzidos diariamente, obtendo R\$ 3.941.586 por ano com a comercialização da energia e bio-carvão gerados, economizando por volta de R\$ 56.234.393,5 durante os 25 anos de vida útil da planta.

O processo também seria ambientalmente viável já que diminuiria consideravelmente o volume de resíduos destinados a aterros que se encontram em sua maioria com seus volumes próximo ou superior à capacidade máxima bem como em lugares inapropriados para despejo. Logo, como consequência a instalação de uma usina de pirólise, a mesma traria também benefícios sociais como: a geração de empregos diretos e indiretos, projetos de educação ambiental por meio das escolas e comunidade, diminuição no índice de doenças causadas por pragas, melhor qualidade de vida para as pessoas, além dos benefícios já citados. Futuras pesquisas podem auxiliar ainda mais na grande problemática que é a imensa quantidade de resíduo que é gerado diariamente, visando aproveitar todo potencial energético de maneira mais específica e promovendo possíveis soluções sustentáveis para o mesmo.

REFERÊNCIAS

ALVES, H. **Processo de Pirólise da TJMC Empreendimentos**, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE), **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2013**. São Paulo, 2014.

BASU, Prabir. **Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory**. Burlington: Ed. Elsevier, 2010.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União (DOU). Poder Legislativo, Brasília, DF. 03 de agosto de 2010. Seção 1, p. 3.

BELGIORNO, V. et al. **Energy from gasification of solid wastes**. Waste Management, v. 23, n. 1, p. 1-15, 2003. ISSN 0956-053X.

BOSCOV, Maria Eugênia Gimenez. **Geotecnia ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248p.

CAIBRE, D.I. **Análise da viabilidade econômica do processo de pirólise para tratamento de resíduo urbano: Estudo de caso aplicado a uma cidade de médio porte**. Passo Fundo-RS, 2013.

CHEN, D. et al. **Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review**. Waste Management, n. 0, 2014, ISSN 0956-053X.

CHHITI, Y.; KEMIHA, M., **Thermal Conversion of Biomass, Pyrolysis and Gasification: A Review**. 2013. The International Journal of Engineering And Science, v. 2, n.3 p. 75-85.

DEMIRBAS, A. **The influence of temperature on the yields of compounds existing in biooils obtained from biomass samples via pyrolysis**. Fuel Processing Technology, v. 88, n. 6, p. 591-597, 2007.

FONTES, OLIVEIRA L. A.. **Desenvolvimento de uma unidade pirolítica com reator de cilindro rotativo: Obtenção de bio-óleo**. 2011. [s.n]. Tese (Doutorado em Engenharia de Petróleo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Petróleo, Natal, RN.

GÓMEZ, E. O. **Estudo da pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão**. 2002. 412f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2002.

HALWACHS, M.; KAMPICHLER, G.; HOFBAUER, H. **Low temperature pyrolysis of agricultural residues – first results of a pilot plant**. International Conference on Polygeneration Strategies, 2009.

IEA - International Energy Agency. Annual Report, 2006: IEA Bioenergy: Task 34, **Pyrolysis of Biomass**; International Energy Agency: Paris, France, v. 31, 2006.

JAHIRUL, M. I.; RASUL, M. G.; CHOWDHURY, A. A.; ASHWATH, N. **Biofuels Production through Biomass Pyrolysis - A Technological Review**. Energies v. 5, p. 4952-5001, 2012.

MELO, F. **Processo de Pirólise da Innova Energias Renováveis**, 2016.

MESA PÉREZ, J.M.. **Testes em uma planta de pirólise rápida de biomassa em leito fluidizado: critérios para sua otimização**. 2004. [s.n]. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP.

MOHAN, Dinesh; PITTMAN JR., Charles U.; STEELE, Philip H. **Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review**. Energy & Fuel, v. 20 n. 3 p. 848 – 889, 2006.

MORAES, Marília. **Pirólise catalítica de biomassa vegetal para a produção de Biocombustíveis**. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

MORGADO, Túlio C., FERREIRA, Osmar M., **Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos, Aproveitamento na Co-Geração de Energia. Estudo para a Região Metropolitana de Goiânia.** Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2006.

OBLADEN, Nicolau L. OBLADEN, Neiva T. R. BARROS, Kelly R. - **Guia para Elaboração de Projetos de Aterros Sanitários para Resíduos Sólidos Urbanos**, Volume II. Curitiba: CREA-PR, 2009.

RAJA A.S.; **Parametric studies on pyrolysis of Jatropha oil cake in fluidized bed reactor.** Chapter 5: Pyrolysis Reactor. Karunya University, 2012. Disponível em: http://shodhganga.inflibnet.ac.in:8080/jspui/bitstream/10603/10119/12/12_chapter5.pdf, acesso em Junho de 2019.

RIBEIRO, Túlio. F.; LIMA, Samuel do C. **Coleta Seletiva de Lixo Domiciliar - Estudo de Casos.** Caminhos da Geografia, Uberlândia, v. 2, p. 50-69, 2001.

RODRIGUES, V. et al. **Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos e Produção de Energia: Análise de Legislação para Viabilidade Econômica de Soluções Conjuntas.** XI SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO. Rio de Janeiro 2014..

SISINNO, Cristina Lucia Silveira; OLIVEIRA, Rosália Maria de (Org.). **Resíduos sólidos, ambiente e saúde: uma visão multidisciplinar.** Rio de Janeiro, RJ: FIOCRUZ, 2003. 138 p.

TECNOLOGIA: o modelo Natureza Limpa. TJMC Empreendimentos. **Natureza Limpa.** Disponível em: <http://naturezalimpa.com/> . Acesso em: 16 jun. 2019.

YAMAN, S. **Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks**, Energy Conversion and Management, v. 45, n.5, p. 651-671, 2004.