

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CÂMPUS LONDRINA

CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ANDRÉ LUIZ LOSANO ROCHA

**DESENVOLVIMENTO DE UM REATOR DE PIRÓLISE EM ESCALA DE BANCADA
PARA ESTUDOS COM RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2016

ANDRÉ LUIZ LOSANO ROCHA

**DESENVOLVIMENTO DE UM REATOR DE PIRÓLISE EM ESCALA DE BANCADA
PARA TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Aulus Roberto Romão Bineli

LONDRINA

2016



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina
Coordenação de Engenharia Ambiental



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia

Desenvolvimento de um reator de pirólise em escala de bancada para tratamento de resíduos sólidos urbanos

por

André Luiz Losano Rocha

Monografia apresentada no dia 29 de novembro de 2016 ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho _____ (aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

Prof. Dr. Alexandre Sordi
(UTFPR)

Prof. Dr^a. Tatiane Cristina Dal Bosco
(UTFPR)

Prof. Dr. Aulus Roberto Romão Bineli
(UTFPR)
Orientador

Profa. Dra. Ligia Flávia Antunes Batista
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Cinara e Marco, por sempre me apoiarem, confiarem em mim e não me deixar desanimar nunca.

Agradeço aos meus amigos que me aguentaram com muita paciência durante esses longos anos da graduação, em especial ao Leonardo que esteve sempre presente para ajudar nesse trabalho, e ao Bruno que sempre me acompanhou dentro e fora da universidade.

Agradeço à minha namorada, Samara, que junto aos nossos cachorros, sempre me fizeram companhia e me apoiaram nas dificuldades do percurso.

Agradeço aos professores Alexandre e Alexei que sempre estiveram ali para fornecer ajuda com o trabalho. Agradeço à professora Tati que me chamou atenção para a problemática dos resíduos e foi corresponsável pela escolha do tema deste trabalho.

Agradeço ao professor Aulus que me apresentou um tema de trabalho tão interessante, e que com muita paciência e dedicação, me ajudou a fazer tudo dar certo.

Agradeço ainda à UTFPR – Londrina pela bolsa de auxílio ao TCC concedida.

Muito obrigado a todos.

RESUMO

ROCHA, André Luiz Losano. **Desenvolvimento de um reator de pirólise em escala de bancada para tratamento de resíduos sólidos urbanos**. 2016. 45 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.

A produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) vem crescendo a cada ano, juntamente com a produção e consumo de bens. Aproximadamente 41% destes resíduos são destinados de forma incorreta, em aterros controlados e lixões, causando grandes impactos negativos no ambiente como um todo. Com o objetivo de diminuir desses impactos, novas formas de tratamento e aproveitamento destes resíduos vêm sendo investigados e desenvolvidos. Um meio de tratamento proposto pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos é a recuperação energética. Este processo pode ser feito por meio da pirólise, método este que consiste na degradação térmica do material em uma atmosfera inerte, sob altas temperaturas, resultando em gás, carvão e óleo, todos combustíveis. Desta forma, neste trabalho procurou-se desenvolver um reator de pirólise para o aproveitamento energético de RSU. Para isso, foi confeccionado um reator em aço inox acoplado a um sistema de aquecimento. Foram realizados experimentos em batelada e em fluxo contínuo, até uma temperatura de 550°C. O processo se mostrou capaz na conversão dos RSU em materiais como o bio-óleo e o carvão, sendo a conversão melhor em regime de batelada, devido a problemas no transporte do material, como por exemplo o material ficar preso no alimentador. Além disso, foi identificada a necessidade de ajustes no sistema de alimentação e aquecimento para um melhor controle do processo, e conseqüentemente, uma melhor obtenção dos produtos.

Palavras-chave: Resíduo sólidos urbanos. Pirólise. Recuperação energética.

ABSTRACT

ROCHA, André Luiz Losano. **Development of a bench scale pyrolysis reactor for municipal solid waste treatment**. 2016. 45 p. Course Conclusion Work (Bachelorship in Environmental Engineering) - Course of Environmental Engineering - Federal Technological University of Paraná (UTFPR), Londrina, 2016.

The production of municipal solid waste (MSW) is increasing every year, along with the increase of goods consumption and production. Nearly 41% of these MSW are incorrectly disposed, causing huge negative impacts on the whole environment. In order to diminish these impacts, new means of treatment and reuse of MSW has been studied and developed. A treatment proposed by the National Solid Waste Plan (PNRS, 2011) is energy recovery. This process can happen through pyrolysis, which consists on the thermal degradation of the material on an inert atmosphere, under high temperatures, resulting in gas, coal and oil, all of which combustible. In this way, this work sought to develop a pyrolysis reactor for energy recovery of MSW. For this, a stainless steel reactor coupled to a heating system was made. Experiments were performed, in batch and continuous regime, until 550°C. This process proved to be capable of converting MSW to materials such as bio-oil and coal. The conversion was better in batch regime due to problems in material transport, such as material getting stuck inside the feeder. Besides that, it was identified the need for adjustments in the feeding and heating system for a better process control, and, consequently, a better products obtainment.

Keywords: Municipal solid waste. Pyrolysis. Energy recovery.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. OBJETIVOS	7
2.1 Objetivo geral	7
2.2 Objetivos específicos	7
3. REFERENCIAL TEÓRICO	8
3.1 Biorrefinarias	8
3.2 Pirólise	9
3.3 Biomassa	13
3.3.1 Resíduos sólidos urbanos	13
3.5 Bio-óleo	14
3.6 <i>Syngas</i>	15
3.7 <i>Biochar</i>	16
4. MATERIAL E MÉTODOS	17
4.1 Pirolisador, resistência e sistema de aquecimento.....	18
4.2 Preparo das amostras	23
4.3 Ensaio de temperatura	24
4.4 Realização dos experimentos	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1 Frações obtidas.....	31
5.2 Alimentador/fuso	35
5.3 <i>Trap</i>	36
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
7. RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	38
REFERÊNCIAS	39

1. INTRODUÇÃO

Em 2015, no Brasil, a geração total de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) foi de aproximadamente 80 milhões de toneladas. Desta quantidade, 72 milhões de toneladas foram coletadas (ABRELPE, 2015). Destes, uma fração aproximada de 51% é composta por material orgânico, ou seja, restos de alimentos, podas entre outros, que, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), não deveriam ser destinados aos aterros sanitários para evitar a redução de sua vida útil. Com isso seria evitado gastos com criação de novas obras ou mesmo com obras de ampliação dos aterros já existentes.

A PNRS define uma escala de prioridades em relação aos resíduos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos e disposição final ambientalmente adequada.

A PNRS enumera formas de destinação final ambientalmente adequada para os resíduos sólidos urbanos, e dentre elas, está o aproveitamento energético. Este aproveitamento pode ocorrer de diversas formas: incineração direta, gaseificação, pirólise, entre outras (PNRS, 2010).

Segundo Morgado e Ferreira (2006) a incineração consiste na combustão dos resíduos em altas temperaturas (500°C até 1250°C). O material incinerado é reduzido a cinzas. Os gases gerados no processo recebem, posteriormente, o tratamento adequado. A gaseificação consiste na degradação térmica dos resíduos com temperaturas entre 500°C e 1300°C resultando como produto o *syngas* (gás de síntese).

De acordo com Chen a pirólise é um processo de degradação térmica de materiais na ausência de oxigênio, resultando em produtos gasosos, líquidos e sólidos. Os gases produzidos variam de acordo com as condições operacionais, mas são compostos principalmente de monóxido e dióxido de carbono, hidrogênio e alguns

hidrocarbonetos leves. O produto líquido é o bio-óleo e o produto sólido é o carvão (*biochar*). Todos estes possuem características combustíveis (CHEN et al., 2014).

No Brasil pode-se citar as empresas Atteris e Delta Bravo que utilizam do processo de pirólise para a destinação de resíduos e, conseqüentemente, geração e comercialização de produtos de pirólise. A nível global, empresas como Metso e Global Green International trabalham e desenvolvem trabalhos com pirólise de diversos resíduos.

A fim de realizar o aproveitamento energético ou produtos de diversos tipos de resíduos e/ou materiais brutos têm-se as chamadas biorrefinarias, que de acordo com Demirbas (2009), são instalações que integram processos e equipamentos para converter biomassa em produtos de maior valor agregado, tais como combustíveis e outros insumos químicos.

Sendo assim, a utilização do RSU nas biorrefinarias de pirólise apresenta um grande potencial para produção de combustíveis e mesmo insumos químicos, que além de oferecer reduções tanto no volume dos resíduos destinados aos aterros possibilita reduções nas emissões de metano provenientes da decomposição anaeróbica dos materiais nestes locais. Além destas reduções, pode-se produzir carvão, óleo, e *syngas*, podendo ainda produzir insumos químicos provenientes deste, substituindo o uso do petróleo para o mesmo fim. Ao realizar trabalhos sobre pirólise é possível verificar a capacidade energética dos componentes do RSU e a viabilidade de sua utilização como matéria prima na produção de biocombustíveis e insumos químicos.

Portanto, neste trabalho foi desenvolvido um reator de pirólise em escala de bancada para a realização de experimentos de pirólise de RSU e obtenção de bio-óleo e gás de síntese. A proposta deste reator é integrar uma plataforma termoquímica e desenvolver uma estratégia inovadora para a produção de combustíveis e produtos químicos de alto valor provenientes de resíduos.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um reator de pirólise em escala de bancada e avaliar as condições de operação para produção de três frações distintas de bio-óleo, biochar e gás de síntese.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar ensaios variando as condições de operação do reator (temperatura e tempo de residência);
- Analisar o funcionamento dos componentes do reator;
- Analisar qualitativamente as frações obtidas.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

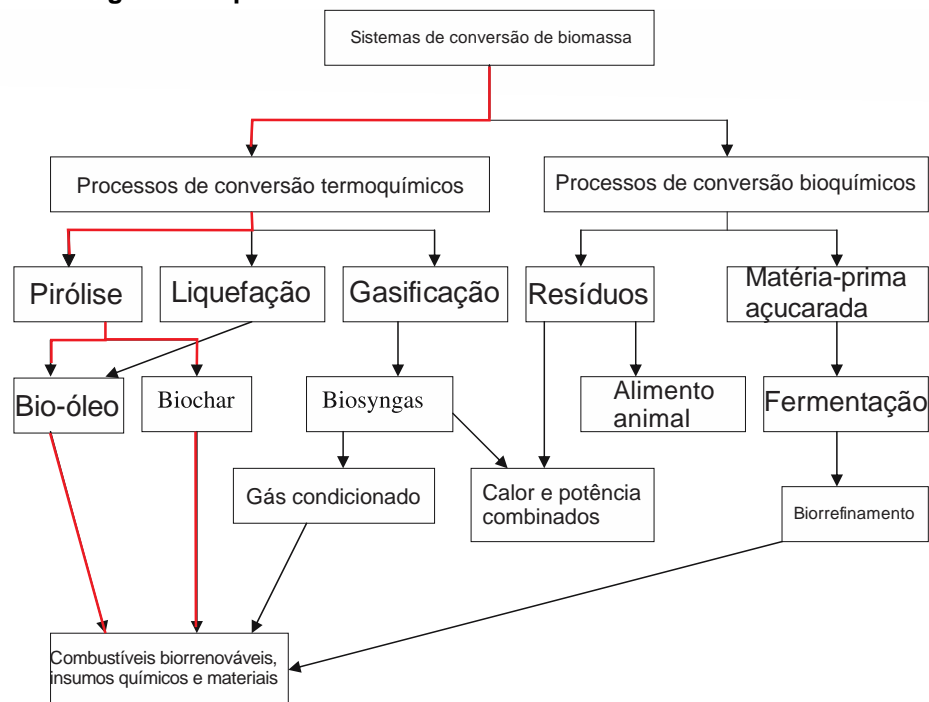
3.1 BIORREFINARIAS

Segundo Demirbas (2009) as biorrefinarias são instalações que integram processos e equipamentos para converter a biomassa em combustíveis, insumos químicos e trabalho. Elas produzem insumos químicos semelhantes aos produzidos por uma refinaria de petróleo, porém com menos emissões e impactos. Estas instalações podem ser classificadas em dois grupos principais: conversão termoquímica e conversão bioquímica.

Budzianowski e Postawa afirmam que estas instalações valorizam a biomassa, convertendo-a e refinando-a em bioenergias e bioprodutos com um maior valor agregado, como biocombustíveis, polímeros, alimentos, insumos químicos e fertilizantes.

Na Figura 1 está representado um diagrama geral dos processos de conversão que podem ocorrer em diferentes biorrefinarias. O traçado em vermelho destaca a rota de interesse e o foco deste trabalho.

Figura 1 : Diagrama de processo de biorrefinaria.



Fonte: Adaptado de Demirbas, 2009.

3.2 PIRÓLISE

A pirólise é caracterizada pelo aquecimento de materiais na ausência de oxigênio (ALMEIDA, 2008). Assim, o material presente não entra em combustão, sendo somente decomposto em gases, líquidos e sólidos, todos combustíveis.

A proporção desses componentes depende de diversos fatores, tais como composição do material a ser pirolisado, temperatura, e tempo de retenção (BROUST, 2009). Temperaturas baixas e um longo tempo de retenção favorecem a formação de sólidos, enquanto temperaturas altas e um curto tempo de retenção favorecem a formação do bio-óleo e temperaturas muito elevadas e um longo tempo de retenção favorecem a formação de gás, sendo este último composto por CO, CO₂, H₂, CH₄ (gases

não condensáveis). Na Tabela 1 são representados os rendimentos médios da pirólise em função das condições de operação.

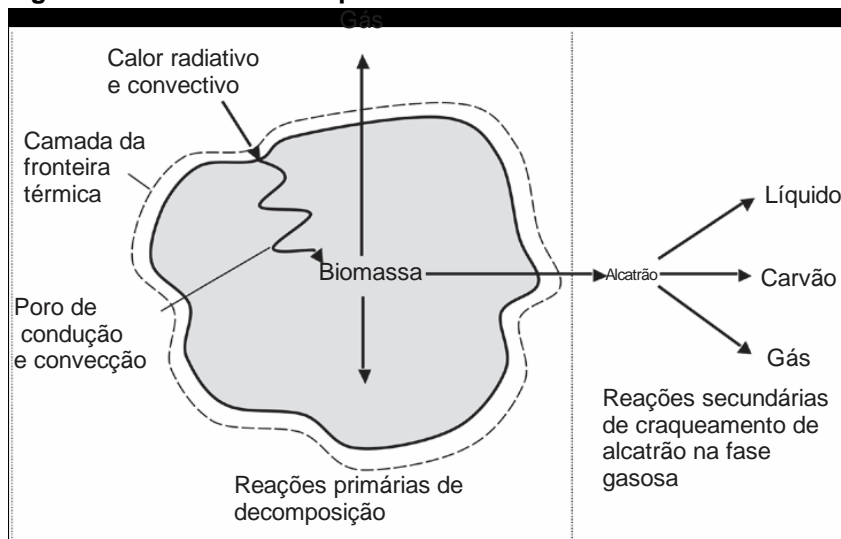
Tabela 1 – Rendimentos da pirólise em função das condições operacionais

Tempo de retenção	Temperatura	Líquidos (%)	Sólidos (%)	Gases (%)
Curto	alta	75	12	13
Muito longo	baixa	30	35	35
Longo	muito alta	5	10	85

Fonte: Adaptado de Bridgwater, 2004

Segundo Basu (2010), na pirólise, grandes moléculas de hidrocarbonetos constituintes da biomassa são quebrados em hidrocarbonetos menores. Ainda, na pirólise de biomassa, a faixa de temperatura é de 300 a 650°C. Na Figura 2 está representada a ação pirolítica em uma partícula de biomassa.

Figura 2: Pirólise em uma partícula de biomassa

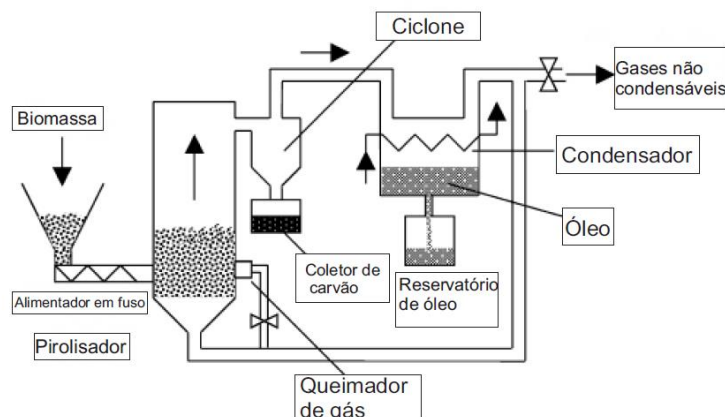


Fonte: Traduzido de Basu, 2010.

O funcionamento de um reator de pirólise simplificado, com alimentação por fuso para biomassa, como exemplificado na Figura 3, se dá por:

1. Primeiro a biomassa triturada entra no forno empurrada pelo fuso.
2. As partículas de biomassa são degradadas e transformadas em gás e carvão. Parte deste carvão fica no forno e parte é carregada pelo gás até o ciclone;
3. O gás, carregado com partículas de carvão passa pelo ciclone onde estes materiais são separados. O ciclone retira a energia cinética do carvão, fazendo-o descer por gravidade para ser coletado, enquanto a fase gasosa, com baixa massa específica, segue pela tubulação.
4. A fase gasosa segue para o condensador, onde uma fração é condensada em bio-óleo, que é coletado. A parte não condensável da fase gasosa (CO , CO_2 , H_2 e CH_4) é coletada e pode ser recirculada no sistema para o fornecimento de energia térmica.

Figura 3: Esquema básico de um processo de pirólise.



Fonte: Traduzido de Basu, 2010.

Segundo Chen et al (2014) a pirólise reduz emissões na atmosfera, uma vez que seus gases são coletados e utilizados como matéria prima. É necessário ter cautela com a escolha do material a ser pirolisado, uma vez que alguns materiais podem contaminar os produtos, tal como o PVC, que libera HCl durante o processo, podendo corroer os equipamentos e contaminar os produtos. É importante escolher uma biomassa que não contenha contaminantes, pois estes podem se agregar ao carvão produzido, e após sua queima, serem liberados para a atmosfera.

Broust (2009) afirma que a pirólise é uma tecnologia promissora, uma vez que produz o bio-óleo, que, por ser líquido, é mais fácil de ser transportado e armazenado que o gás.

Inicialmente, a tecnologia de pirólise foi desenvolvida para produzir gases a partir da biomassa (RADLEIN, PISKORZ e SCOTT, 1987). Todavia, vários estudos apresentaram um alto rendimento na produção de líquido. Observou-se que temperaturas elevadas, como na produção de gás, não eram necessárias.

Bridgwater e Peacocke (2000) afirmam que, para a produção do bio-óleo, algumas condições devem ser estabelecidas, como uma alta taxa de aquecimento, uma baixa granulometria do material a ser pirolisado, uma temperatura próxima de 500°C e um rápido resfriamento dos vapores. Qiang et al. (2009) ressaltam que o tempo de retenção dos gases deve ser inferior a 2 segundos e que os gases devem ser resfriados rapidamente. Basu (2010) complementa: a taxa de aquecimento deve ser de 1000 a 10000°C.s⁻¹. Qiang et al. (2009) ainda chamam a atenção para a existência de vários tipos de reatores de pirólise rápida, tais como reator de leito fluidizado, leito fluidizado circulante cone rotativo, ciclone, a vácuo, ablativo e de fuso.

3.3 BIOMASSA

De acordo com Yaman (2003) biomassa pode ser definida como qualquer material hidrocarboneto constituído majoritariamente de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, podendo conter enxofre em menores proporções. Basu (2010) afirma que biomassa é qualquer material orgânico derivado de alguma planta ou animal. Yaman (2003) ainda ressalta que alguns tipos de biomassa podem conter quantidades de materiais inorgânicos, que correspondem de 1 a 15%, dependendo da origem, das cinzas provenientes da queima destas biomassas.

A biomassa engloba materiais naturais e processados, tais como madeira, grama, bagaço de vegetais, resíduos agrícolas, restos de papeis, resíduos do processamento de alimentos, RSU, resíduos de poda, resíduos de animais (dejetos e carcaças), algas, grãos, lodo de esgoto, entre outros. Esta pode ser utilizada como matéria prima tanto para fins energéticos quanto para produção de insumos químicos, como álcoois, ácidos alifáticos e orgânicos, polímeros, entre outros, que são utilizados como alternativas aos derivados de petróleo (BASU, 2010).

Basu (2010) sugere a cultura de plantas de crescimento rápido, como o *Miscanthus* e o *Panicum virgatum*, que possuem um ciclo de crescimento de alguns meses, para a produção de energia.

3.3.1 Resíduos Sólidos Urbanos

Segundo a Lei 12.305 de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010), que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, RSU é definido por: “resíduos originários de atividades domésticas em residências urbanas e os originários de varrição, limpeza de vias públicas e outros serviços de limpeza urbana”. A lei ainda afirma que os resíduos originários de atividades comerciais, industriais e de serviços cuja responsabilidade não caiba ao seu gerador, podem ser considerados como RSU (SINIR, 2010), sendo estes

os restos de comida, embalagens de alimentos, pedaços de vestimentas, metais, vidros, folhas, plásticos e papéis.

Segundo o Panorama dos resíduos sólidos no Brasil (ABRELPE, 2014) 41,6% dos RSU que são coletados no Brasil são destinados incorretamente, em sua grande maioria indo para os “lixões” (que ainda que proibidos, são facilmente encontrados em diversos municípios) e aterros, causando diversos problemas tais como mal cheiro, doenças, contaminação de solo e lençóis freáticos. Segundo pesquisas da ABRELPE realizadas em 2016, somente em 2015 foram gerados 79,9 milhões de toneladas de RSU, ou seja, neste ano cada habitante produziu, em média, cerca de 391 kg de RSU.

Uma destinação correta para o RSU consiste em separação entre os resíduos orgânicos (para a pirólise ou compostagem) e os recicláveis (reciclagem de material ou energética). A reciclagem de material consiste em utilizar o material para produzir novos materiais. Já a reciclagem energética consiste em usar o material reciclável como combustível, substituindo outras fontes (GONÇALVES et al. 2013).

3.4 BIO-ÓLEO

Com uma preocupação cada vez maior em reduzir as emissões de poluentes e a redução na utilização de combustíveis fósseis, o interesse pelo bio-óleo vem aumentando. Segundo Rodrigues et al. (2011), o bio-óleo é uma mistura de compostos orgânicos e água (de 15 a 30% em massa), em fase única, e com densidade média de $1,120\text{kg.L}^{-1}$. Ainda, possui um poder calorífico de 17 MJ.kg^{-1} , podendo ser utilizado na geração de eletricidade, aquecimento para casa, aditivos para combustíveis e, após seu refino, pode ser utilizado como combustível, fertilizantes, flavorizantes, resinas ou

adesivos. O bio-óleo ainda possui, devido à sua alta densidade, de 50 a 60% da densidade energética de combustíveis tais como gasolina, querosene, óleo diesel,

O bio-óleo pode ser produzido por processos pirolíticos que utilizam um curto período de residência combinado com um rápido resfriamento do gás, que leva à sua condensação. Segundo Qi (2006) sua composição varia de acordo com diversos fatores, tais como constituição da biomassa utilizada e condições de funcionamento do reator. Ele apresenta uma composição diferente do óleo derivado de petróleo, apresentando menos carbono e mais oxigênio. Na Tabela 2 estão apresentadas algumas propriedades do bio-óleo.

Tabela 2 – Principais propriedades do bio-óleo

Propriedade	Valor médio
Umidade	15 – 30%
Densidade	1,220kg.L ⁻¹
Carbono	50 – 58%
Hidrogênio	5 – 7%
Oxigênio	35 – 60%
Poder calorífico	17 MJ.kg ⁻¹

Fonte: Adaptado de Rodrigues et al. (2011)

Segundo o BP Statistical Review of World Energy (2015) o Brasil consumiu 3,229 milhões de barris de óleo por dia. O bio-óleo proveniente da pirólise de RSU poderia substituir parte do óleo provenientes de outras fontes.

3.5 SYNGAS

Segundo Samiran et al. (2015) o *syngas* (gás de síntese) proveniente de biomassa tem sido identificado como uma potencial fonte de energia renovável. Ele

consiste principalmente de CO e H₂, que podem ser utilizados diretamente para a produção de energia e trabalho, ou como matéria prima para a produção de outros insumos químicos e outros gases.

Para uma maior produção de *syngas* são necessárias temperaturas mais elevadas (~900°C) e um longo tempo de residência (~1800s), para que a maior quantidade possível de sólido e líquido seja convertida em gás, sendo, para esse objetivo, a gaseificação muito mais eficiente que a pirólise.

As propriedades do *syngas* variam de acordo com a biomassa utilizada e das condições de funcionamento do reator. O poder calorífico inferior do *syngas* varia entre 3 e 10 MJ.kg⁻¹. Ele pode ser convertido em gasolina (por meio da reação de Fischer-Tropsch), fertilizantes, metanol e pode ser utilizado em turbinas a gás e motores para a geração de energia elétrica.

3.6 BIOCHAR

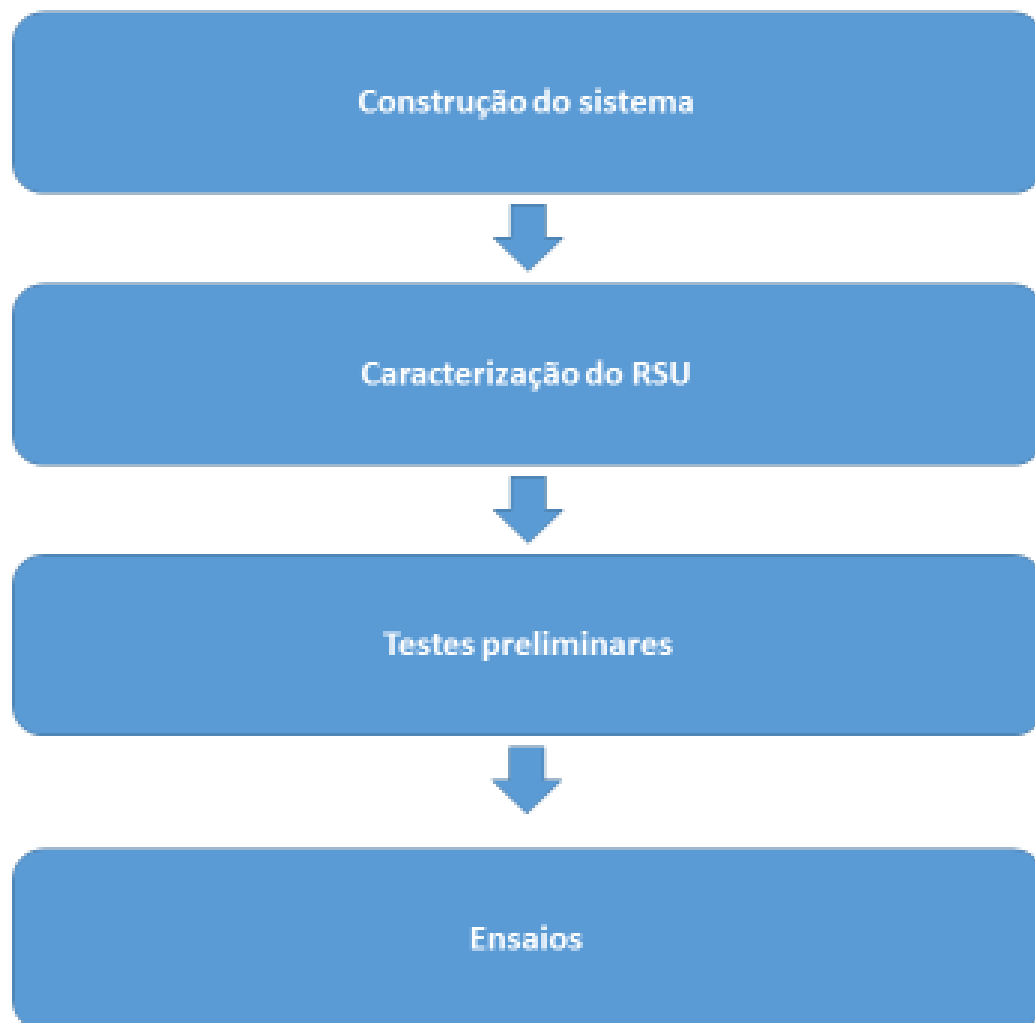
O *biochar* é composto por aproximadamente 85% de carbono (Basu, 2010) e possui poder calorífico inferior (PCI) de 32 MJ.kg⁻¹. Segundo Demirbas et al (2009) a produção de *biochar* na pirólise diminui à medida que a temperatura aumenta. Yaman (2004) afirma que o *biochar* obtido na pirólise possui uma estrutura porosa e uma área superficial apropriada para a utilização como carvão ativo.

Segundo o BP Statistical Review of World Energy, divulgado em junho de 2015, o Brasil consumiu 15,3 milhões de toneladas equivalente de petróleo (TEP) e produziu 3,2 milhões de TEP de carvão. Com uma utilização mais ampla das diversas formas de pirólise, o *biochar* poderia possuir uma parcela significativa nesses números.

4. MATERIAL E MÉTODOS

No fluxograma (Figura 4) estão apresentadas as atividades realizadas.

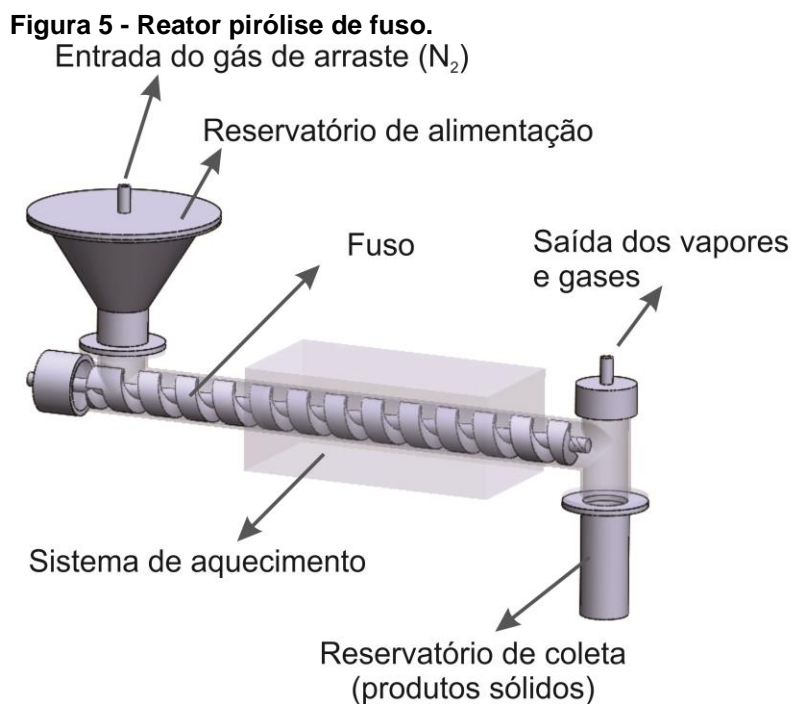
Figura 4: Etapas das atividades realizadas



Fonte: Autoria própria

4.1 PIROLISADOR, RESISTÊNCIA E CONTROLADOR DE TEMPERATURA

O modelo do reator escolhido para o presente desenvolvimento foi o de fuso, que apresenta a vantagem de trabalhar em fluxo contínuo. Tal regime apresenta algumas vantagens sobre reatores de batelada, como uma maior facilidade de trabalho, principalmente em se tratando de grandes quantidades de massa a serem utilizadas e a remoção automática da fração sólida, diminuindo o craqueamento de vapor. Na Figura 5 é representado o projeto do reator e seus componentes, o qual foi baseado no trabalho de Maximino (2013).



Fonte: Autoria própria.

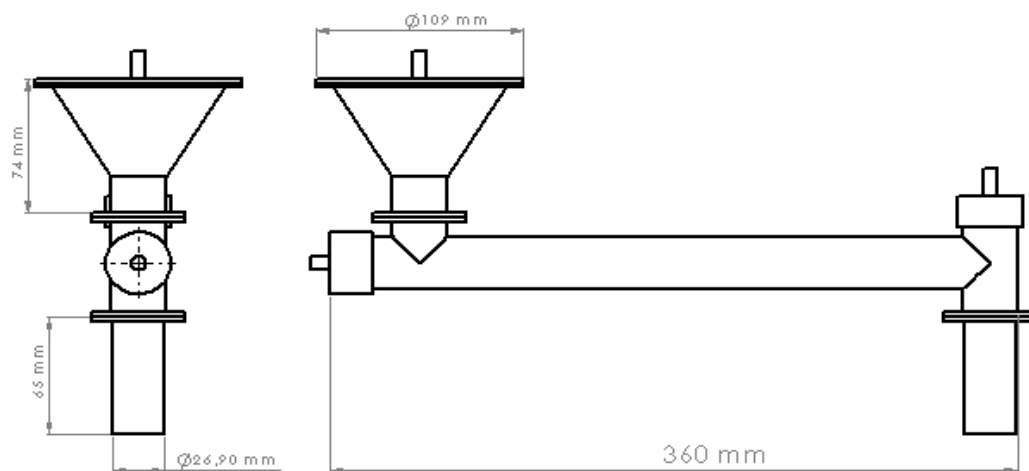
O material a ser pirolizado é inserido no reservatório de alimentação e, por gravidade, é levado para o fuso. O fuso carrega o material até a região do forno,

compreendida pelo sistema de aquecimento, onde ele sofre o processo de pirólise, liberando vapores condensáveis e não condensáveis, além de carvão. O carvão é arrastado pelo fuso até o reservatório de coleta, e os vapores são carregados pelo gás de arraste até a saída de vapor.

Para que o reator fosse eficiente, foi necessário que o material a ser pirolizado fosse primeiramente triturado, aumentando assim sua área superficial e facilitando seu aquecimento (Tinwala et al., 2015). A trituração foi feita com o auxílio de uma faca e uma tesoura.

O reator foi desenvolvido em escala de bancada, porém isso não impedirá a repetitividade dos experimentos em reatores maiores. Na Figura 6 estão apresentadas suas dimensões.

Figura 6 – Dimensionamento do pirolisador



Fonte: Autoria própria

Na Figura 7 está representado o pirolisador já confeccionado, porém sem os componentes de aquecimento.

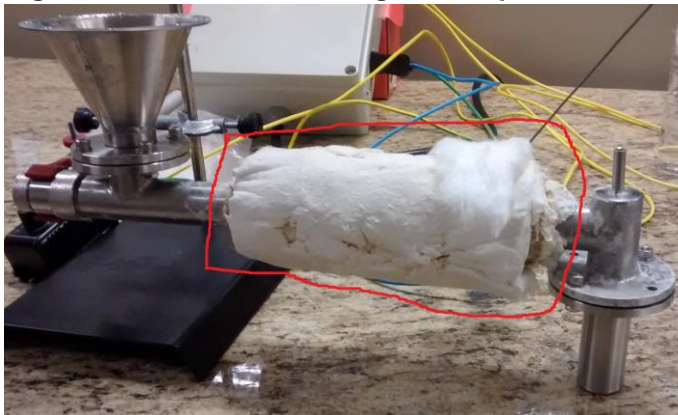
Figura 7 – Pirolisador confeccionado.



Fonte: Autoria própria.

A resistência utilizada no aquecimento foi montada com aproximadamente 5 metros de fio de níquel-cromo (Ni-Cr), com diâmetro de 0,5 mm, enrolados ao longo de 30 cm do corpo do equipamento, comprimento este que compreende o forno de aquecimento. Na Figura 8 é representado o pirolisador com a região de aquecimento em destaque, e na Figura 9 está representado o fio de Ni-Cr utilizado.

Figura 8 – Pirolisador com região de aquecimento em destaque.



Fonte: Autoria própria.

Figura 9 – Fio de níquel-cromo utilizado como resistência.



Fonte: Autoria própria

Para a montagem da resistência foi colocada uma camada de fibra cerâmica refratária, a qual permaneceu na estufa a 104°C até estar completamente seca. Tal material serve como isolante térmico e elétrico. Após, enrolou-se o fio sobre a camada de isolante e foi aplicada outra camada do mesmo isolante, permanecendo novamente na estufa até sua secagem completa. Depois das camadas estarem totalmente secas e rígidas, uma porção de manta cerâmica (também isolante térmico e elétrico) foi embebida em uma resina e enrolada sobre a camada de isolante. A resina, quando seca em estufa enrijece o material deixando-o com a aparência de gesso.

Ainda foram realizadas outras tentativas para o sistema de aquecimento, como a utilização de um fio de níquel-cromo de 0,14mm, com 1m de comprimento e uma resistência de secador de cabelos de 0,25mm. O primeiro fio de níquel-cromo rompeu-se rapidamente ao ligar e a resistência de secador rompeu após funcionar por alguns minutos.

Para controlar o aquecimento do reator foi confeccionado um sistema de controle, onde foram instalados os controladores de temperaturas (PID) conectados em relês de estado sólido, que por sua vez estavam conectados em tomadas, para ligação dos cabos da resistência de aquecimento. Na Figura 10 está ilustrada a caixa de controle parcialmente construída e na Figura 11, a caixa de controle em funcionamento.

Figura 10 - a) Caixa de controle com switch on-off e controladores de temperatura.
b) interior da caixa de controle com os relês de estado sólido e as tomadas



Fonte: Autoria própria.

Figura 11 – Caixa de controle em funcionamento.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 12 está representado o equipamento montado. Um béquer plástico com água e detergente foi utilizado como indicador de fluxo de gás e também como atenuador de odores.

Figura 12 – Equipamento montado.



Fonte: Autoria própria.

4.2 – PREPARO DAS AMOSTRAS

Tendo como base a composição gravimétrica utilizada por Souza, (2014), as amostras foram preparadas. As frações correspondentes a metal e vidro foram desconsideradas, pois não são degradáveis nas temperaturas utilizadas nos experimentos ocorreram. Para formar a fração orgânica foram utilizados arroz, feijão, bife, casca de cebola, folhas de alface, pedaços e folhas de morango, pó de café e pedaços de tomate. Ressalta-se que as amostras foram utilizadas *in natura*, todas com a suas umidades naturais.

No quadro 1 está apresentada a composição média das amostras.

Quadro 1 – Massa das amostras do primeiro experimento e média das amostras dos demais 4 experimentos

Material	Primeiro experimento		Demais experimentos	
	Massa (g)	%	Massa (g)	%
Isopor	0,0944	0,4	0,0488	0,4
Plástico	1,4840	6,3	1,03875	8,8
Papel/papelão	2,7860	11,8	1,2158	10,3
Resto de alimento	19,2286	81,5	9,65285	81,3
Total	23,5930	100	11,85025	100

Fonte: Autoria própria.

As amostras foram pirolisadas sob diferentes condições (taxa de aquecimento, tempo de retenção, tamanho de partícula), pois segundo Basu (2010), partículas mais finas facilitam a passagem de gases condensáveis, o que resulta numa maior produção de líquido, enquanto partículas maiores facilitam a ocorrência de *cracking* secundário, resultando em mais sólidos. Temperaturas mais altas resultam em mais gás, enquanto as mais baixas produzem mais óleo.

4.3 – ENSAIOS DE TEMPERATURA

Para medir a temperatura atingida na parte externa do equipamento, um termopar foi encaixado em um ponto arbitrário. Para medir a temperatura do interior do equipamento, um termopar foi introduzido em seu interior pela parte onde seria encaixado o fuso. Tais ensaios foram importantes para conhecer o comportamento da

temperatura interna, já que quando o equipamento estivesse em funcionamento, não seria possível a introdução de um termopar ao interior do cilindro, impedindo assim a sua medição. Os ensaios consistiram em um acréscimo de 50°C em 50°C, aguardando a temperatura externa ser atingida e estabilizada, e a temperatura interna ser atingida. O interior do cilindro demorou mais tempo para atingir a temperatura desejada devido à presença de material isolante entre a resistência e a parede do cilindro, porém, esta se manteve mais aquecida por mais tempo. Nos ensaios, a temperatura interior foi atingida após cerca de 20 minutos e a exterior após aproximadamente 7 minutos.

Sem nenhum material, o interior atingiu 550°C, enquanto o exterior se encontrava em 450°C. Tal diferença de temperatura garantiu que, quando o equipamento estivesse operando com o material em seu interior e seu exterior atingisse 550°C, o interior atingiria, no mínimo, 550°C.

Além disso, utilizando um alicate amperímetro foi medida a corrente que passava pela resistência montada, sendo a mesma de 2,2A. Como o sistema estava ligado em uma rede de 220V, a potência dissipada pela resistência foi de 484W. O controle de corrente foi realizado por meio de um dimmer (Figura 13) ligado ao sistema, controlando assim, a potência dissipada pela resistência. Isto foi realizado afim de garantir uma corrente adequada para um aquecimento gradual do sistema.

Figura 13 – Dimmer controlador de corrente.

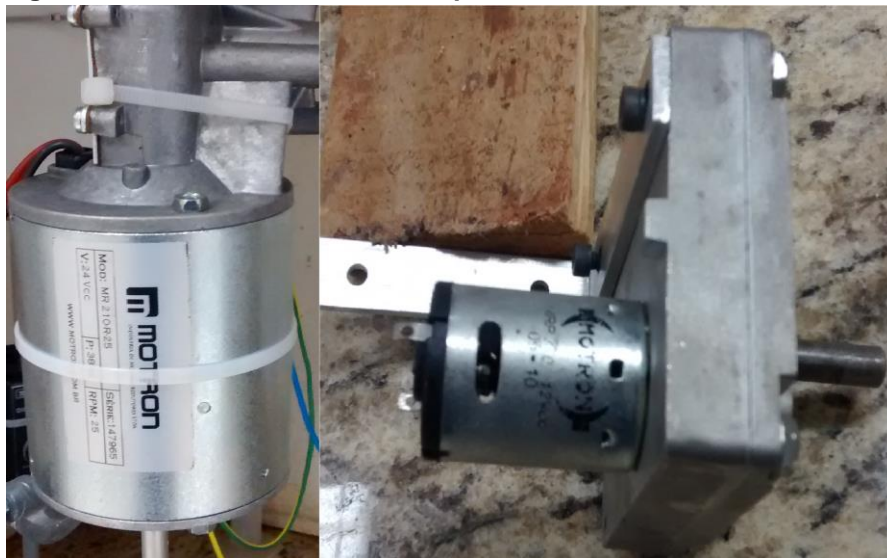


Fonte: Autoria própria.

Para rotacionar o fuso, foi escolhido um motor com um redutor acoplado. Porém, tal motor não apresentou torque suficiente para rotacionar o fuso caso algum material se enroscasse nele. Para solucionar este problema, um motor de maior torque foi utilizado.

Na Figura 14 estão representados os motores, e na figura 15 está representada uma caixa controladora confeccionada para controlar a rotação do motor.

Figura 14 – Motores testados. A esquerda o motor utilizado.



Fonte: Autoria própria.

Figura 15 – Caixa controladora de rotação do motor.



Fonte: Autoria própria.

Com este novo motor, foi possível realizar 2 experimentos de fluxo contínuo.

4.4 REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Para a realização dos experimentos, o controlador de temperatura foi acoplado à resistência montada no pirolisador, formando assim o sistema de aquecimento. Por meio de um termopar colocado em um ponto pré-determinado, a temperatura foi monitorada e usada como referência para o sistema. Tal ponto foi escolhido, pois nos ensaios de temperatura foi constatado que ele apresentava uma temperatura inferior à temperatura no interior do cilindro, o que garantia um melhor aquecimento durante os experimentos.

Foram realizados cinco experimentos, sendo três deles em batelada e dois em fluxo contínuo. Os quatro primeiros experimentos utilizaram uma taxa de $120 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ de nitrogênio para garantir uma atmosfera inerte. O último utilizou $90 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. Os experimentos em batelada foram realizados anteriormente à chegada do motor utilizado para rotacionar o fuso.

Em todos os experimentos, seguiu-se a seguinte ordem de processos:

- 1-) Adição de material a ser pirolisado;
- 2-) Passagem de N_2 para inertizar o interior do aparato;
- 3-) Aquecimento do sistema;
- 4-) Degradação do material;
- 5-) Passagem do gás gerado durante o processo pelo condensador;
- 6-) Condensação da fração condensável e liberação do gás restante;

Na tabela 2 estão apresentadas as condições de realização de cada experimento.

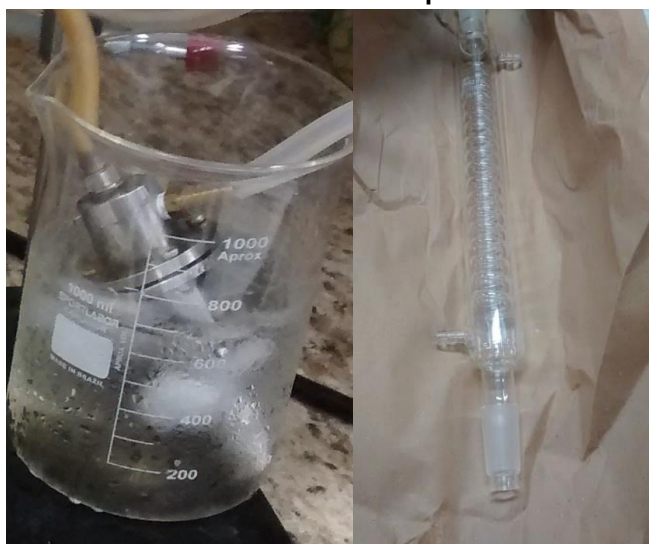
Tabela 2: Condições de execução dos experimentos

Experimento/ Parâmetros	1	2	3	4	5
Quantidade de material (g)	23,5930	11,68946	11,8905	11,8102	12,2101
Taxa de N ₂ (mL.min ⁻¹)	120	120	120	120	90
Velocidade de rotação (RPM)	0 (batelada)	0 (batelada)	0 (batelada)	19	4

Fonte: Aatoria própria

Nos dois primeiros experimentos foi utilizado um *trap* (Figura 16) dentro de um banho de gelo para reter a fração condensável do gás e condensá-la em óleo. Posteriormente, foi utilizado um condensador (Figura 16) em espiral ligado a um equipamento de banho refrigerado.

Figura 16 – A esquerda o *Trap* imerso em gelo, água, sal e álcool etílico. A direita o condensador em espiral.



Fonte: Autoria própria

Nos experimentos em batelada, o material foi inserido no cilindro e empurrado até o meio do forno, onde foi aquecido lentamente, da temperatura ambiente (aproximadamente 23°C) até 550°C (temperatura programada).

Em 200°C foi possível observar a evaporação e a condensação da água presente no material e a formação do óleo. Em aproximadamente 500°C foi possível observar uma acentuada produção de gás.

O sistema permaneceu em 550°C por aproximadamente 15 minutos para uma maior degradação do material. Após este tempo, o aquecimento foi interrompido. O gás de arraste foi mantido até uma temperatura de aproximadamente 200°C para impedir a combustão de possíveis materiais não degradados. Ao atingir aproximadamente 60°C, o pirolisador foi desmontado para a coleta do óleo e do carvão gerados.

Nos dois experimentos em fluxo contínuo o material foi inserido pela tampa superior do alimentador. A região do forno foi aquecida gradualmente até 550°C. Ao atingir a temperatura desejada, o motor do fuso foi ligado a uma velocidade de, aproximadamente 19 RPM no primeiro experimento e aproximadamente 4 RPM no segundo, transportando o material pela área do forno até o coletor de carvão.

O motor ficou ligado por aproximadamente 15 minutos, tempo que foi estimado ser suficiente para carregar todo o material a ser pirolisado. Após o desligamento do motor e o resfriamento do sistema, foi realizada a coleta das frações sólidas e líquidas produzidas.

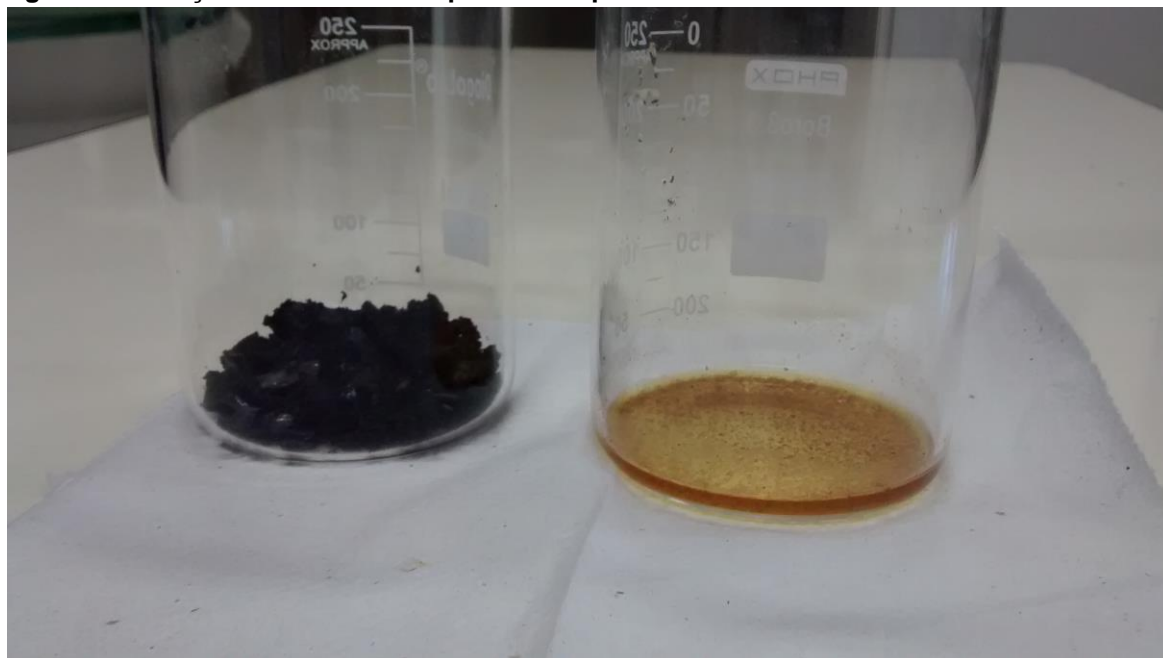
Todas as amostras obtidas em todos os experimentos foram acondicionadas em béqueres e tampadas com papel alumínio para evitar a dispersão de odores e a evaporação do bio-óleo, que é volátil.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Frações obtidas

No primeiro experimento em batelada notou-se que algumas parcelas do material não sofreram degradação completa. Isso pode ter sido causado pelo tamanho das partículas ou pela quantidade de massa inserida. Decidiu-se reduzir em aproximadamente 50% a massa das amostras e reduzir o tamanho das partículas. Na Figura 17 estão representadas as frações sólida e líquida resultantes do primeiro experimento. Estas amostras foram recolhidas em béqueres de 250 mL.

Figura 17 – Frações resultantes do primeiro experimento.



Fonte: Autoria própria.

O segundo experimento foi realizado com aproximadamente metade da amostra do primeiro, e apresentou uma degradação total do material inserido. Na Figura 18 estão representadas as frações líquida e sólida resultantes do segundo experimento, acondicionadas em béqueres de 250 mL.

Figura 18 – Frações resultantes do segundo experimento.



Fonte: Autoria própria.

O terceiro experimento em batelada apresentou diferença dos demais devido ao uso do condensador em espiral, que assegurou uma condensação livre de impurezas, o que justifica a aparência mais clara. Na Figura 19 estão ilustradas as frações sólida e líquida resultantes, ambas recolhidas em béqueres de 250 mL.

Figura 19– Frações resultantes do terceiro experimento.

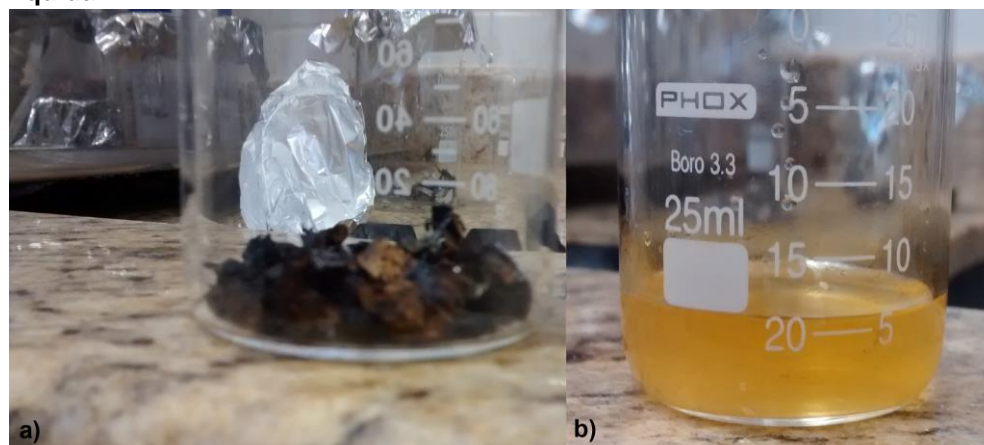


Fonte: Autoria própria.

Comparando os resultados obtidos nestes três experimentos com os resultados obtidos no trabalho de Silveira (2015), é possível notar uma semelhança no que diz respeito à aparência do material obtido. A diferença de quantidade de material se deve a quantidade de material utilizado (aproximadamente 12g no presente trabalho contra aproximadamente 2,5g no trabalho de Silveira). Outras causas de diferenças se devem ao fato do tamanho do reator utilizado.

Os experimentos seguintes apresentaram grande diferença dos outros. Nos experimentos em batelada, a amostra ficou por aproximadamente 30 minutos sob aquecimento, o que resultou em uma maior degradação. No primeiro experimento em fluxo contínuo, o material não foi degradado totalmente, o que pode ser explicado pela velocidade de rotação do fuso. Uma quantidade de material não alcançou o fuso, devido à baixa fluibilidade do material utilizado. Houve uma intensa produção de gás logo que o material adentrou na região do forno. Houve ainda a saída de vapores condensáveis no balde d'água, o que pode ser justificado pela vazão elevada de N_2 ou pela falta de mais um condensador. Na Figura 20 estão ilustradas as frações para este experimento. A fração sólida foi recolhida em um béquer de 100 mL e a líquida em um béquer de 25 mL.

Figura 20 – Frações resultantes do quarto experimento a) fração sólida, b) fração líquida



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 21 está ilustrado o fuso, após o experimento. A parte escurecida corresponde à parte que fica na região do forno, e sua cor é devida à incrustação do carbono liberado no próprio processo.

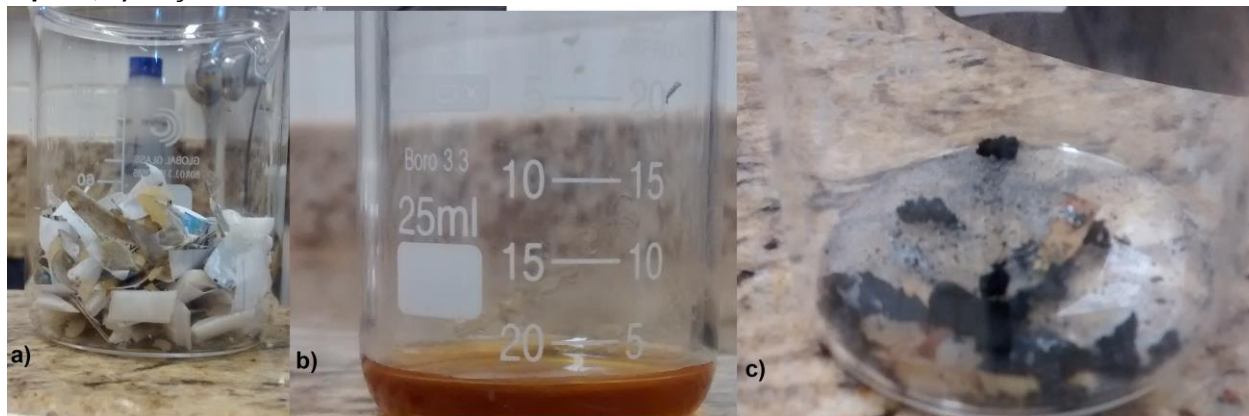
Figura 21 – Fuso após o experimento.



Fonte: Autoria própria.

No quinto e último experimento, decidiu-se diminuir a velocidade de rotação do fuso para que o tempo de residência fosse maior. Diminuiu-se também o fluxo de N_2 para verificar se ele interferia na velocidade com que as partículas eram transportadas. Não foi possível obter um resultado satisfatório deste experimento, uma vez que a maior parte do material inserido ficou presa no alimentador e só uma pequena porção foi transportada pelo fuso. Na Figura 22 estão apresentadas as frações sólidas (béquer de 100 mL) e líquidas (béquer de 25 mL) e a porção que ficou presa no alimentador. Ressalta-se que apesar da baixa rotação (4 RPM) o material ainda não foi totalmente degradado.

Figura 22– Frações resultantes do quinto experimento. a) amostra que não foi pirolisada, b) fração líquida, c) fração sólida

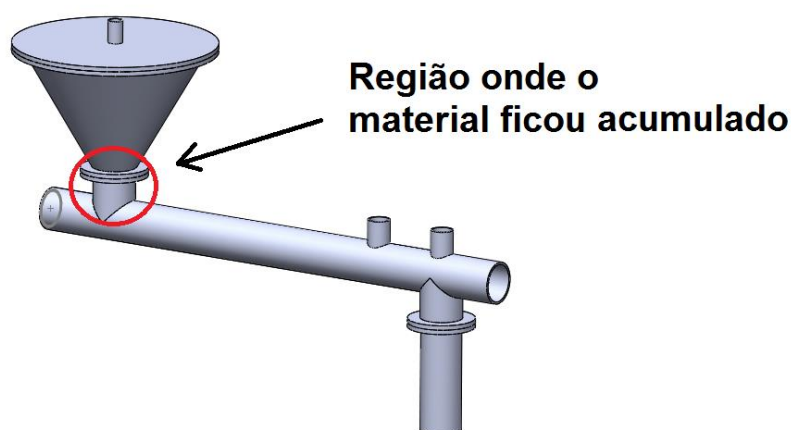


Fonte: Autoria própria.

5.2 Alimentador/Fuso

Observou-se que o material não foi encaminhado corretamente para o fuso. Por ser um material, em sua maior parte, pouco denso, ele não deixou o alimentador para o fuso, ficando a maior parte do mesmo sem sofrer o processo de pirólise. Na Figura 23 está representado o equipamento com a região onde o material se acumulou.

Figura 23: Representação do equipamento. Em destaque, a região onde o material se acumulou.



Fonte: Autoria própria.

Constatou-se ainda que o tempo de aproximadamente 4 minutos em que o material passou pela área do forno não foi suficiente para a degradação completa do material.

Ainda, o fuso possuía uma excentricidade que o fazia girar levemente fora de eixo. Isso causava a queda de material abaixo dele e o impossibilitava de carregar este material.

5.3 *Trap*

Houve um entupimento na entrada do gás no *trap*, causada pela incrustação de óleo que ali condensou precipitadamente. Isto causou uma inversão no fluxo do gás de arraste e o vazamento de óleo em alguns pontos. Este problema foi resolvido substituindo o *trap* pelo condensador em espiral, que se mostrou mais eficiente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o presente trabalho, foi possível construir um reator de pirólise em escala de bancada e testar seu funcionamento. A importância de tal trabalho está numa aproximação do tema com a graduação, uma vez que na literatura encontram-se, em sua maioria, apenas dissertações de mestrado e teses de doutorado.

Foi possível ainda verificar as dificuldades presentes na montagem do sistema, bem como os desafios que foram surgindo no decorrer dos experimentos, tais como vazamentos em diferentes pontos, problemas no alimentador, problemas no fuso e diversas tentativas de escolha de uma resistência para aquecimento.

A pirólise se mostrou capaz na conversão dos RSU em materiais como o bio-óleo e o carvão. A fração gasosa não pode ser analisada por falta de equipamentos adequados. Neste estudo, o processo em batelada se mostrou mais eficiente que a em fluxo contínuo, porém isso foi atribuído aos problemas de transporte das amostras que enroscaram no alimentador, a velocidade de rotação do fuso ou até mesmo a temperatura interna ser menor que a esperada/desejada.

O projeto do reator de pirólise proposto se mostrou capaz de produzir os produtos desejados, porém ainda são necessários ajustes no sistema de alimentação e aquecimento para um melhor controle sobre a operação do processo, e conseqüentemente, obtenção dos produtos com maior confiabilidade.

7.Recomendações para futuros trabalhos

Seguem algumas recomendações para os trabalhos a serem realizados futuramente:

- Secagem prévia, em estufa, do material a ser utilizado, uma vez que este apresenta um alto teor de umidade;
- Desenvolvimento de algum aparato para não deixar o material ficar retido no alimentador. Sugere-se um vibrador, como utilizado por Maximino (2013);
- Análise calorimétrica das frações líquidas e sólidas, e ainda a análise de CG-MS da fração líquida para uma melhor e mais acurada identificação de seus componentes;
- Modificações no sistema de aquecimento para que possa ser trabalhada tanto a pirólise rápida quanto a pirólise lenta.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2015.
- ALMEIDA, M. B. B de. **Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gás-óleo em craqueamento catalítico**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- ATTERIS. **Sustentabilidade que transforma**. Disponível em: <<http://www.atteris.eco.br/>>. Acesso em: 9 dez. 2016.
- BALAT, M. et al. **Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems**. Energy Conversion and Management, v. 50, n. 12, p. 3147-3157, 2009.
- BASU, P. **Biomass Gasification and Pyrolysis – Practical Design**. Elsevier. Oxford. p. 365, 2010
- BP Statistical Review of World Energy*. **BP**. 2015. Disponível em: <<http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-coal-section.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2016.
- BP Statistical Review of World Energy*. **BP**. 2015. Disponível em: <<http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-oil-section.pdf>>
- BRAMMER, E. A.; BREM, G.t. **The pyros reactor - a cyclonic flash pyrolysis reactor with internal particle filter**. Disponível em: <[https://www.utwente.nl/ctw/thw/People/Professors and senior staff/staff/bramer/Poster Bioten.pdf](https://www.utwente.nl/ctw/thw/People/Professors%20and%20senior%20staff/staff/bramer/Poster%20Bioten.pdf)>. Acesso em: 17 out. 2015.
- BRASIL. EPE. **Inventário energético de resíduos sólidos urbanos**. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/Série Estudos de Energia/DEA 18 - Inventário Energético de Resíduos Sólidos Urbanos.pdf](http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/Série%20Estudos%20de%20Energia/DEA%2018%20-%20Inventário%20Energético%20de%20Resíduos%20Sólidos%20Urbanos.pdf)>. Acesso em: 15 out. 2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional De Resíduos Sólidos**. Brasília. 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_publicacao/253_publicacao02022012041757.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2016.

BRIDGEWATER, A. V. **Biomass fast pyrolysis**. *Thermal science*, v. 8, n. 2, p. 21-50, 2004.

BRIDGEWATER, A. V.; PEACOCKE, G. V. C. **Fast pyrolysis processes for biomass**. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 4, n. 1, p. 1-73, 2000.

BROUST, F. **Overview of Fast Pyrolysis Principles, Processing and Applications**. In: Curso de Gaseificação da Biomassa. II Escola de Combustão, São José dos Campos, SP. 22 a 26 de junho de 2009. p. 78 – 88.

CHEN, D., YIN, L., WANG, H., HE, P. **Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review**. *Waste management*, v. 34, n. 12, p. 2466-2486, 2014.

DELTA BRAVO RECICLAGEM. **Usina de pirólise**. Disponível em: <<http://www.deltabravoreciclagem.com/>>. Acesso em: 9 dez. 2016.

DEMIRBAS, M. F.; BALAT, M.; BALAT, H. **Potential contribution of biomass to the sustainable energy development**. *Energy Conversion and Management*, v. 50, n. 7, p. 1746-1760, 2009.

DEMIRBAS, A. **Biorefineries: current activities and future developments**. *Energy Conversion and Management*, v. 50, n. 11, p. 2782-2801, 2009.

GGIENERGY. **Waste Streams for Pyrolysis**. Disponível em: <<http://www.ggienergy.com/waste-streams-for-pyrolysis/>>. Acesso em: 9 dez. 2016.

GONÇALVES, M. A.; TANAKA, A. K.; AMEDOMAR, A. de A. **A destinação final dos resíduos sólidos urbanos: alternativas para a cidade de São Paulo através de casos de sucesso**. *Future Studies Research Journal*. São Paulo, p. 96-129. jan. 2013. Disponível em: <www.spell.org.br/documentos/download/10663>. Acesso em: 17 out. 2015.

MAXIMINO, R. I. M. da S. **Pyrolysis of Biomass in a Screw Reactor**. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2013.

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

METSO. **Tire pyrolysis systems.** Disponível em: <www.metso.com/products/pyro-process/tire-pyrolysis-sytems/>. Acesso em: 09 dez. 2016.

PROCLIMA – CETESB. **Gases do efeito estufa.** Disponível em: <<http://proclima.cetesb.sp.gov.br/material-de-apoio/efeito-estufa/gases-do-efeito-estufa/>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

QI, Z., JIE, C., TIEJUN, W., YING, X. **Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research.** *Energy Conversion and Management*, v. 48, n. 1, p. 87-92, 2007.

QIANG, L., WEN-ZHI, L., XI-FENG, Z. **Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils.** *Energy Conversion and Management*, v. 50, n. 5, p. 1376-1383, 2009.

RADLEIN, D., ST. A. G.; PISKORZ, J.; SCOTT, D. S. **Lignin derived oils from the fast pyrolysis of poplar wood.** *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 12, n. 1, p. 51-59, 19

RODRIGUES, T. O., ROUSSET, P., VALE, A. T. do, BROUST, F. **Bio-óleo: uma alternativa para valorização energética da biomassa.** *Revista Brasileira de Energia*, Vol. 17, No. 2, 2o Sem. 2011, pp. 39-56

SAMIRAN, N. A., JAAFAR, M. N. M., NG, J. **Progress in biomass gasification technique—With focus on Malaysian palm biomass for syngas production.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 62, p. 1047-1062, 2016.

SINIR - Ministério do Meio Ambiente. **Resíduos Sólidos Urbanos.** Disponível em: <<http://sinir.gov.br/web/guest/residuos-solidos-urbanos>>. Acesso em: 17 out. 2015.

SOUZA, J. L. N. de. **Influência da taxa de recirculação de lixiviado na degradação de resíduos sólidos urbanos e produção de biogás.** 2014. 72 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina. 2014.

TINWALA, F., MOHANTY, P., PARMAR, S., PATEL, A., PANT, K. K. **Intermediate pyrolysis of agro-industrial biomasses in bench-scale pyrolyser: Product yields and its characterization.** *Bioresource technology*, v. 188, p. 258-264, 2015.

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