



UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CHAPECÓ
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

JORGE PORTO

**PIRÓLISE: UMA ALTERNATIVA PARA TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NAS
COMUNIDADES RURAIS**

CHAPECÓ

2019

JORGE PORTO

**PIRÓLISE: UMA ALTERNATIVA PARA TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NAS
COMUNIDADES RURAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado
como requisito para obtenção de grau de Bacharel em
Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da
Fronteira Sul.

Orientador: Prof. Guilherme Martinez Mibielli

CHAPECÓ

2019

JORGE ARENILSON FERREIRA PORTO

**PIRÓLISE: UMA ALTERNATIVA PARA TRATAMENTO DE
RESÍDUOS SÓLIDOS NAS COMUNIDADES RURAIS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul.

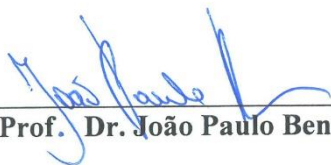
Orientador: **Prof. Guilherme Martinez Mibielli**

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e
aprovado pela banca em: 05 / 12 / 2019

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Guilherme Martinez Mibielli- UFFS



Prof. Dr. João Paulo Bender – UFFS



Prof. Dr. Leandro Bordin - UFFS

PIRÓLISE: UMA ALTERNATIVA PARA TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NAS COMUNIDADES RURAIS

Jorge Porto¹

Guilherme Martinez Mibielli²

Resumo

As tecnologias termoquímicas que podem ser empregadas nos tratamentos dos resíduos sólidos antes de serem dispostos em aterros, são divididas em três: a combustão, a pirólise e a gaseificação. Neste estudo foi realizada a caracterização do resíduo sólido com 10,71% da população residente na linha comunidade rural no interior da cidade de Nova Itaberaba, quantificando-se a parte orgânica e reciclável. Para ensaios pirolítico com resíduos sólidos foi construído um reator tipo batelada, construído em aço inox. Para os ensaios foi montado um sistema pirolítico com 4 partes básicas: 1) reator tipo batelada, 2) mufla, 3) condensador e 4) banho de refrigeração. Foram realizados três ensaios de pirólise do resíduo sólido. No primeiro ensaio foi utilizado resíduos de palha de milho, sendo a temperatura da mufla definida em 400° C e 600°C, obtendo-se a decomposição em frações sólida, líquida e gasosa, sendo que na Temperatura de 400°C predominou a formação de sólidos, enquanto na temperatura de 600°C predominou a formação da fase de gasosa. No segundo ensaio a Biomassa utilizada foi o resíduo sólido da comunidade na sua forma natural, sendo os testes realizados em triplicatas, nas temperaturas de 600°C, 650°C e 700°C, obtendo-se os resultados de 63,46%, 50,32% e 27,96% para fração líquida, já fração sólida apresentou 8,90%, 11,84% e 11,74% e fração gasosa. No terceiro ensaio foi utilizada biomassa seca, sendo que os resultados apresentaram para ensaio 1: fração sólida 25%, fração líquida 15% e fração gasosa 60% e para ensaio 2: fração sólida 26%, fração líquida 14% e fração gasosa 60%. Foi possível identificar que o reator batelada o definido para o trabalho não se mostrou eficaz para a produção do bio-óleo, pois tem uma eficiência baixa na transferência de calor.

Palavras Chaves: Resíduos, bio-óleo, pirólise, reator.

Abstract

The thermochemical technologies that can be employed in the treatment of solid waste before being landfilled are divided into three: combustion, pyrolysis and gasification. In this study, the solid waste was characterized with 10.71% of the population residing in the rural community line in the interior of Nova Itaberaba, quantifying the organic and recyclable part. For pyrolytic tests with solid waste, a batch reactor was built, made of stainless steel. For the tests, a pyrolytic system was assembled with 4 basic parts: 1) batch reactor, 2) muffle furnace, 3) condenser and 4) cooling bath. Three pyrolysis assays of the solid residue were performed. In the first test, corn straw residues were used, and the muffle temperature was set at 400 ° C and 600 ° C, resulting in the decomposition in solid, liquid and gas fractions. solids, while at the temperature of 600 ° C the formation of the gas phase predominated. In the second test the biomass used was the solid waste of the community in its natural form, being the tests performed in triplicates, at temperatures of 600 ° C, 650 ° C and 700 ° C, obtaining the results of 63.46%, 50.32% and 27.96% for liquid fraction,

¹ Graduando do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal Fronteira Sul.

² Professor do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal Fronteira Sul.

while solid fraction presented 8.90%, 11.84% and 11.74% and gas fraction. In the third test dry biomass was used, and the results presented for test 1: solid fraction 25%, liquid fraction 15% and solid fraction 60% and for test 2: solid fraction 26%, liquid fraction 14% and solid fraction 60%. . It was possible to identify that the batch reactor defined for the work was not effective for bio-oil production, as it has a low efficiency in heat transfer.

Keywords: Waste, bio-oil, pyrolysis, reactor.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente o cenário ambiental permite, talvez pela obrigatoriedade da sobrevivência dos seres vivos, principalmente dos humanos, uma receptividade a tudo que está relacionado ao tema da preservação ambiental. Desta forma, as pessoas são receptivas em aceitar toda ajuda possível, tratando-se de conhecimentos e/ou de equipamentos, máquinas ou instrumentos que minimizam os impactos causados ao meio ambiente.

As atividades laborativas da comunidade rural são diversificadas trazendo benefícios para as pessoas, no entanto, estas atividades também podem produzir uma grande quantidade de resíduo ocasionando problemas relacionados a destinação dos resíduos, temática especialmente preocupante quando relacionada às áreas rurais, onde praticamente não há coleta de resíduo, e os mesmos são queimados ou despejados na natureza, muitas vezes, às margens dos cursos d'água.

Especificamente na comunidade rural Linha Barra da Taquara, Interior do Município de Nova Itaberaba-SC, é possível perceber os impactos causados pelos descartes (lançamentos) desordenados e sem controle de resíduos sólidos no meio ambiente. Os resíduos independentemente do seu tipo, são encontrados de uma forma inadequada e sem nenhum tipo de tratamento, resultando na contaminação do solo e dos cursos d'água, como também servindo de risco à saúde da população.

Em relação à responsabilidade ambiental, ainda há muito o que se fazer, pois um fato que chama atenção é que mesmo com a preocupação da população com o meio ambiente, pesquisas (ABRELPE, 2017) evidenciam em seus resultados, a falta de conhecimento do cidadão a respeito de resíduos do tipo recicláveis e das possibilidades de seu reaproveitamento. Ainda levando em consideração os dados levantados, foi constatado que 75% dos brasileiros não realizam a separação de seus resíduos em casa, e menos da metade da população sabe que o alumínio, papel e PET são materiais recicláveis.

Concomitante aos resultados da pesquisa constatou-se que o montante de resíduos sólidos (RS) coletados em 2017 foi de 71,6 milhões de toneladas, correspondente a um índice de 91,2% de cobertura de coleta no país. O número demonstra que 8,8% dos resíduos, que correspondem a 6,9

milhões de toneladas, não foram objeto de coleta e, conseqüentemente, tiveram destino impróprio (ABRELPE, 2017).

Segundo o Censo Demográfico (IBGE, 2010), a população rural atingiu o índice de 15,6% dos mais de 190 milhões de pessoas residentes no país. Os resíduos gerados nas áreas rurais são um problema quando descartado de maneira inadequada, seja queimando, enterrando ou simplesmente lançando no mato, como expõe Pasquali (2012), podendo causar impactos ambientais, sociais, econômicos e de saúde pública.

As atividades relacionadas a comunidade rural são diversas, e com a evolução tecnológica, o homem do campo passou a ter maior facilidade de acesso aos alimentos, produtos e materiais industrializados, fracionados em pequenas porções e embalados por vários tipos de materiais recicláveis e não recicláveis. Porém a efetividade das políticas públicas não acompanhou esta evolução, e a cobertura de coleta é extremamente limitada (IBGE, 2010).

Segundo Gonçalves et al. (2013), a forma de destinação correta para os resíduos sólidos (RS) passa por uma boa qualidade de materiais selecionados para que se realize posteriormente uma separação dos mesmos, sendo que os resíduos orgânicos podem ser processados ou recuperados, por exemplo para o tratamento térmico ou a compostagem, e os recicláveis sejam encaminhados para centros específicos de reaproveitamento.

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) estabelece outros processos de destinação ambientalmente apropriados de RS. Entre eles estão a recuperação e o emprego do material de forma energética. Assim, para tais atividades, podem ser empregado técnicas através de vias bioquímicas ou termoquímicas. (BRASIL, 2010).

As tecnologias termoquímicas que podem ser empregadas nos tratamentos dos resíduos sólidos antes deles serem dispostos em aterros, são divididas em três: a combustão, a pirólise e a gaseificação. A combustão é umas das mais utilizadas em algumas regiões do mundo, como Europa, Ásia e América do Norte. No Brasil é um tema polêmico, pois essa técnica é utilizada para resolver a questão da disposição final de resíduos perigosos e parte dos resíduos hospitalares. Não se tem registro de aplicação do potencial energético gerado por esse processo no país. Quando realizado em ambiente com excesso de oxigênio prevalece a formação de vapor de água, dióxido de carbono e a liberação de calor, que podem ser convertidos em eletricidade. A pirólise é o processo de degradação térmica de materiais sem a presença de oxigênio, resultando em produtos gasosos, líquidos e sólidos (Basu, 2010). Por último, a gaseificação, processo de conversão de um material sólido ou líquido com quantidade baixa de oxigênio resultando na produção de combustível gasoso (Gómez, 2002).

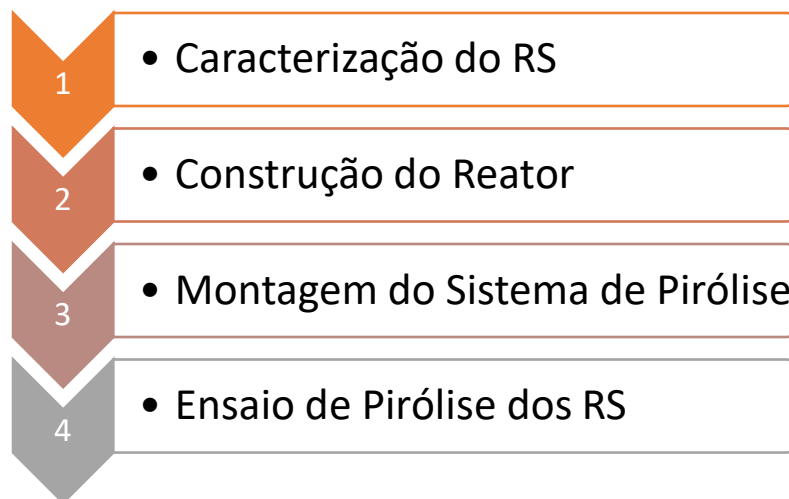
O presente trabalho tem como objetivo estudar o potencial energético da pirólise como uma forma de tratamento e uso dos resíduos sólidos da comunidade rural da Linha Barra da Taquara, interior do município de Nova Itaberaba-SC.

Pelos fatos apresentados, o trabalho se justifica para melhorar a disposição final dos resíduos sólidos da comunidade rural. Desta forma pode-se diminuir os impactos ambientais que afetam principalmente a qualidade do ar e do solo e ainda verificar a possibilidade de produção de bio-óleo com o aproveitamento dos resíduos.

2 METODOLOGIA

O percurso metodológico da presente pesquisa segue as etapas da Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma da Pesquisa



Fonte: Próprio Autor

2.1 Caracterização do Resíduo Sólido

Área de Estudo

A primeira etapa da pesquisa foi realizada in loco na zona rural do município de Nova Itaberaba /SC, especificamente na linha Barra da Taquara. Sua independência política e administrativa ocorreu no dia 25 de setembro de 1991. Em 2010 contava com uma população estimada em 4.267 habitantes, dos quais 1.530 são residentes na zona urbana e 2.737 habitantes

residem na zona rural. A economia do município conta com a forte influência do setor agropecuário e das indústrias de beneficiamento.

Levantamento de dados

A caracterização por gravimetria dos resíduos sólidos foi realizada mediante a separação dos resíduos orgânicos e recicláveis seguindo o método utilizado por Fideles (2016).

A coleta dos dados de caracterização foi realizada com 10,71% da população do conselho da comunidade. No mês de julho de 2019, a população era de 38 (trinta e oito) moradores. Entre estes, 10 (dez) não moram na comunidade, portanto não foram considerados na presente pesquisa.

Com um intuito que a caracterização tivesse uma representação considerável o conselho comunitário selecionou e indicou três famílias para o estudo. As famílias selecionadas foram assim denominadas: CASA 1, CASA 2 e CASA 3. Nestas casas selecionadas moram 2, 3 e 2 pessoas respectivamente.

O levantamento dos pesos dos resíduos sólidos foi realizado utilizando-se uma balança eletrônica da marca BELFORT, modelo SF-400, com capacidade de 10 kg (divisão 1g). O resíduo orgânico foi pesado na medida em que os recipientes utilizados pelos moradores das residências para o seu armazenamento estavam cheios. Os resíduos recicláveis foram separados e posteriormente pesados. Os mesmos foram acondicionados em embalagens plásticas e ou em sacolas, conforme as Figuras 2. Os dados dos pesos foram anotados em uma planilha e posteriormente transferidos para uma planilha do Excel.

Figura 2 – Separação, Armazenamento dos Resíduos

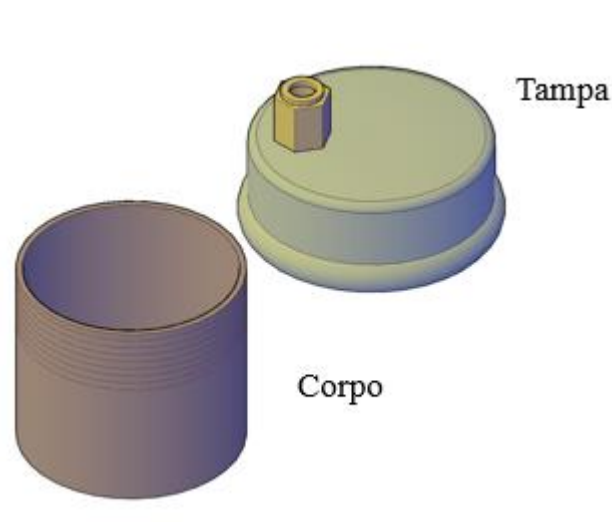


Fonte: Próprio autor (2019)

2.2 Construção do Reator

Para a transformação dos resíduos sólidos em energia foi construído um reator tipo batelada, adaptado da metodologia Bridgwater (2012) e Nikolini et al. (2013), conforme Figura 3. O mesmo foi construído na forma cilíndrica, formado por duas partes denominados corpo e tampa, produzido em aço inox que é um material que suportar temperaturas altas de até 1000 °C, conforme Chiaverni (1998).

Figura 3 – Protótipo Reator Batelada

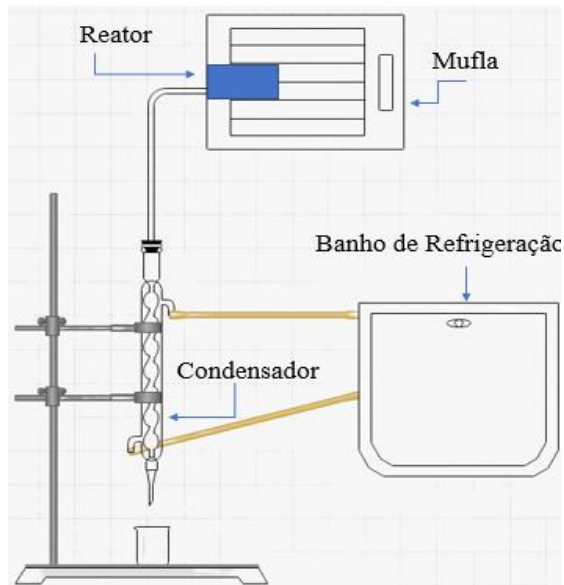


Fonte: Próprio autor (2019)

2.3 Montagem do Sistema de Pirólise

O sistema para processo pirolítico foi montado conforme especificação de Nikolini et al. (2013), com pequenas adaptações. O sistema possui quatro partes básicas: 1) reator tipo batelada, 2) mufla, 3) condensador e 4) banho de refrigeração, conforme mostrado Figura 4. As partes 2, 3 e 4 não foram construídas, pois foram utilizados equipamentos disponíveis no laboratório.

Figura 4: Representação da Montagem do Sistema de Pirólise



Fonte: Próprio autor (2019)

2.4 Ensaio de Pirólise do Resíduo Sólido

Primeiro Ensaio: Verificação

O primeiro teste foi realizado com intuito de verificar o funcionamento do sistema pirolítico, onde neste primeiro teste foi utilizado uma biomassa de palha de milho. Foi selecionada uma amostra de palha de milho devidamente seca e triturada conforme Figura 5. Foram realizados dois testes. No primeiro teste com uma massa de 12g e o segundo teste com 16g de biomassa. As quantidades de biomassa foram escolhidas com intuito que não ultrapassassem o volume máximo do reator. A biomassa foi pesada em uma balança analítica marca Shimadzu, modelo UX620H com capacidade 620g (0,01g). Nos dois testes a biomassa foi colocada no reator e levada a mufla quando a temperatura já tinha atingido o ponto de ajuste pré-determinado. As temperaturas dos testes se deram em 400°C e 600°C respectivamente, com a temperatura do banho fixada em 10°C para ambos.

Figura 5: Biomassa Palha de Milho



Fonte: Próprio autor (2019)

Segundo Ensaio: Biomassa com umidade natural

Para análise dos resultados das frações sólida, líquida e gasosa resultantes do processo pirolítico, os testes foram realizados em triplicatas, nas temperaturas de 600°C, 650°C e 700°C. A metodologia seguida foi baseada no estudo de Basu (2010). Respeitou-se a umidade natural da biomassa utilizada, sendo a mesma triturada com auxílio de uma faca e tesoura, assegurando uma boa homogeneidade dos resíduos. O reator com biomassa foi levado a mufla quando a temperatura já atingiu o ponto de ajuste pré-determinado.

Para a composição das amostras foram utilizados resíduos orgânicos e recicláveis, (não foram utilizados vidro para composição da amostra por motivos de segurança), conforme definido na caracterização gravimétrica que estabeleceu um percentual para cada um dos resíduos, como mostrado na Figura 6 (a) e (b). A quantidade total de biomassa utilizada variou para cada teste, sendo anotada sua massa inicial para posterior cálculo das frações. A biomassa foi pesada em balança analítica marca SHIMADZU, modelo UX620H com capacidade 620g (0,01g). Os dados foram anotados em uma planilha do Excel para posteriormente gerar as tabelas necessárias.

Figura 6: Amostras dos tipos de resíduos separadamente: papel (sulfite, papelão, tetra pak), metal, plástico (PEAD), e matéria orgânica (resto de alimentos).



Fonte: Próprio autor (2019)

Terceiro Ensaio: Biomassa Seca

Com o objetivo de obter mais dados sobre o RS estudado, foram realizados testes com biomassa seca. Para determinar sua umidade foi seguida a norma americana ASTM D-3173/17 com adaptações. As amostras de resíduos orgânico foram pesadas com auxílio de uma balança analítica da marca GEHAKA, com capacidade 199,9990 g (0,1 mg), com aproximadamente 13,5000g e colocadas em placa de Petri. Em seguida levadas a estufa a uma temperatura de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e deixadas por aproximadamente 1 h 30 min. Após o tempo fixado foram retiradas e colocadas no dessecador para resfriar, e pesadas posteriormente com a mesma precisão. Esse procedimento se repetiu até a massa ficar constante na amostra, deixada no mínimo 24h em estufa. O teor de umidade foi calculado de acordo com a seguinte equação.

$$W = \frac{[(m_0 - m_1)]}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

W- Teor de Umidade, em %

m0 - Massa Inicial da Amostra, em g.

m1- Massa Final da Amostra, em g.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização do RS

Essa caracterização auxiliou na configuração de um cenário em relação à quantidade de resíduos sólidos gerados na comunidade, bem como para que se saiba a geração per capita desses resíduos, os quais são demonstrados nas Tabelas 4, 5 e 6.

Tabela 4 – Quantidade de RS Orgânico gerado (kg).

| Casa | 1° Sem.Ago | 2° Sem.Ago | 3° Sem.Ago | 4° Sem.Ago | 5° Sem.Ago | Total | Per capita (kg/dia) |
|------|------------|------------|------------|------------|------------|--------|------------------------|
| 1 | 2,015 | 6,755 | 6,659 | 6,791 | 6,809 | 29,029 | 0,323 |
| 2 | 1,821 | 5,128 | 5,352 | 5,183 | 5,261 | 22,745 | 0,379 |
| 3 | 1,726 | 4,501 | 4,352 | 4,458 | 4,156 | 19,193 | 0,320 |

Fonte: Próprio autor (2019)

Tabela 5 – Quantidade de RS Reciclável gerado (kg),

| Casa | 1° Sem.Ago | 2° Sem.Ago | 3° Sem.Ago | 4° Sem.Ago | 5° Sem.Ago | Total | Per capita (kg/dia) |
|------|------------|------------|------------|------------|------------|-------|------------------------|
| 1 | 0,251 | 0,650 | 0,556 | 0,621 | 0,794 | 2,872 | 0,032 |
| 2 | 0,158 | 0,526 | 0,626 | 0,534 | 0,562 | 2,406 | 0,040 |
| 3 | 0,176 | 0,483 | 0,545 | 0,495 | 0,625 | 2,324 | 0,039 |

Fonte: Próprio autor (2019)

Tabela 6 – Percentual de RS gerado por composição química.

| Casa | % Org. | % Média Org. | % Rec. | % Média Rec. |
|------|--------|--------------|--------|--------------|
| 1 | 91% | | 9% | |
| 2 | 90% | 90% | 10% | 10% |
| 3 | 89% | | 11% | |

Fonte: Próprio autor (2019)



Fonte: Próprio autor (2019)

Nota: Figura 2: (a) Lixeiro Orgânico; (b) Pesagem dos Resíduos Orgânicos; (c) Armazenagem dos resíduos recicláveis; (d) Pesagem dos resíduos recicláveis.

De acordo com IPEA (2013) municípios com até 9.999 habitantes tem uma geração de lixo de 0,460 kg/dia, sendo observado nas Tabelas 4, 5 e 6 que os dados levantados nos estudos de produção per capita de RS por dia junto à comunidade, ficaram abaixo em todas as residências. Pelo fato da pesquisa considerar os dados do IPEA (2013), esse índice baixo encontra uma possível explicação na inexistência de diagnósticos completos em propriedades rurais sobre a geração resíduos

sólidos. Existem estudos isolados em algumas regiões do país sobre o tema, mas não podendo representar o todo e conseqüentemente pode influenciar na alteração dos índices para menos ou para mais, a exemplo da pesquisa realizada.

3.2 Construção do Reator

O reator foi construído com um tubo de aço inox com medidas 50 mm de comprimento e um diâmetro 38,1 mm. Uma das pontas do tubo foi fechada com um tampão roscado e na face desse tampão foi confeccionado uma rosca de ¼”, conforme Figura 7(a), (b) e (c). Na outra extremidade foi utilizado uma tampa cega, que foi unida ao reator pelo processo de soldagem TIG. Para a canalização de saída do gás foi utilizada uma conexão engate rápido de latão ¼”.

Figura 7: Partes do Reator



Fonte: Próprio autor (2019)

3.3 Montagem do Sistema de Pirólise

O reator foi ligado ao condensador através de uma tubulação de cobre nas medidas de 1000 mm de comprimento por 8 mm de diâmetro, conforme Figura 8 (a). Na extremidade do reator a tubulação foi conectada utilizando-se uma conexão de engate rápido conforme Figura 8 (b) e no condensador a conexão aconteceu através de rolha de cortiça furada na dimensão da tubulação de cobre conforme Figura 8 (c). O condensador foi fixado em um suporte através de 2 garras e 1 haste.

Para circulação da água gelada do banho de refrigeração conforme Figura 8 (d) ao condensador, foram instaladas 2 mangueiras de silicone 10mm de diâmetro por 4 metros de comprimento, sendo uma de alimentação e outra de retorno da água gelada, conforme Figura 8 (e).

Figura 8: Sistema Pirólise Montado



Fonte: Próprio autor (2019)

Ensaio Pirólise do Resíduos Sólido

Os ensaios foram divididos em três testes com diferentes características.

Primeiro Ensaio

Para verificação do funcionamento do reator batelada foi utilizado uma biomassa de palha de milho, matéria prima conhecida, já utilizada em outros trabalhos no laboratório. A Tabela 7 demonstra os resultados desse teste.

Tabela 7 – Teste de Funcionamento do Sistema Pirolítico

| Tipo RS | Teste | Peso (g) | Temperatura Mufla (°C) | Temperatura Banho (°C) | Composição estados (%) | | |
|----------------|-------|----------|------------------------|------------------------|------------------------|---------|-------|
| | | | | | Sólido | Líquido | Gases |
| Palha de Milho | 1 | 12 | 400 | 10 | 81 | 8 | 11 |
| Palha de Milho | 2 | 16 | 600 | 10 | 21 | 29 | 50 |

Fonte: Próprio autor (2019)

Pode-se observar nos resultados apresentados na Tabela 7 que no processo de pirólise a biomassa não entrou em combustão por ausência parcial ou total de oxigênio, conforme salienta BARROS et al. (1996) nos seus estudos. A biomassa sofreu a decomposição em frações sólida, líquida e gasosa conforme observado na Figura 9. Com o aumento da temperatura foi observado uma variação nas frações sólida, líquida e gasosa da biomassa, sendo que na Temperatura de 400°C predominou a formação de sólidos, enquanto na temperatura de 600°C predominou a formação da fase de gasosa, conforme comenta Basu (2010) em seu estudo.

Figura 9 – Amostra da Pirólise Fração Líquida e Sólida produzido no teste



Fonte: Próprio autor (2019)

Segundo Ensaio

No segundo teste foram utilizados resíduos sólidos que representaram a caracterização obtida perante a comunidade ou seja 90% orgânico e 10% reciclável. Os resíduos foram testados com umidade natural e triturados. Na Tabela 8 são apresentados os resultados das frações obtidas durante o processo de pirólise da biomassa.

Tabela 8 – Frações da BIOMASSA- Natural

| Tipo Biomassa | Teste | Temperatura Mufra (°C) | Temperatura Banho (°C) | Composição Estados (%) | | | | |
|---------------|-------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------|-------------|----|----|
| | | | | Sólido DP | Líquido DP | Gases DP | DP | DP |
| RSU | 1 | 600 | 10 | 8,90 ±0,28 | 63,46 ±6,61 | 27,64 ±6,45 | | |
| RSU | 2 | 650 | 10 | 11,84 ±0,03 | 50,32 ±0,1 | 37,83 ±0,06 | | |
| RSU | 3 | 700 | 10 | 11,74 ±0,15 | 27,96 ±5,78 | 60,30 ±5,64 | | |

Fonte: Próprio autor (2019)

Seguindo mesmo padrão dos estudos de Diniz (2005), os resultados na Tabela 8 mostram que os rendimentos da fração gasosa e líquida apresentam variações com o aumento da temperatura da pirólise. Segundo BROUST (2009), a fração desses estados depende de alguns fatores, tais como composição do material, temperatura, e tempo de retenção. O rendimento em fração gasosa aumentou, enquanto que o da fração líquida diminuiu. Na fração sólida, manteve estável durante variação da temperatura. A diminuição da fração líquida pode estar relacionada ao aumento da temperatura, que influenciou na formação de outros compostos como o monóxido de carbono (CO) e o hidrogênio molecular (H₂), de acordo com os estudos de Samiran et al. (2015). Além disso, nos testes teve a presença do carvão devido ao arraste do mesmo através do reator para o béquer. Segundo Rodrigues et al. (2011), a fração líquida (bio-óleo) não é composta somente por óleo, mas também pela água, pois devido à umidade dos resíduos, oxigênio, e diversos compostos, tais como os hidrocarbonados de estruturas heterogêneas complexas, entre eles os hidroxialdeídos, hidroxicetonas, açúcares, ácidos carboxílicos e compostos fenólicos.

Já nos rendimentos da fração gasosa prevaleceram gases não condensáveis, sendo o gás de síntese, o principal produto gerado. Com o aumento da temperatura pode ter ocorrido o processo de gaseificação que não permitiu oxidação completa do carbono e do hidrogênio, com isso deixando de formar CO₂ e H₂O reagem com o carbono para formar CO, H₂ e CH₄, conforme explica Cortez et al. (2008).

As Figuras 10, 11 e 12 mostram a fração líquida (óleo) e sólida do processo de pirólise após ser coletado do béquer e retirado do reator no teste 1, teste 2 e teste 3, respectivamente. Foi observado que para cada aumento de temperatura a quantidade de óleo diminuiu. Analisando a quantidade de fração sólida formada, não apresentou uma variação na quantidade de carvão com aumento das temperaturas. Assim, o aumento da temperatura pode ter levado a formação de outros compostos gasosos não condensáveis, diminuindo a quantidade de óleo.

Figura 10: Amostra da Pirólise Fração Líquida e Sólida produzido no teste com temperatura 600°C



Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 11: Amostra da Pirólise Fração Líquida e Sólida produzido no teste com temperatura 650°C



Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 12: Amostra da Pirólise Fração Líquida e Sólida produzido no teste com temperatura 700°C



Fonte: Próprio autor (2019)

Terceiro Ensaio

Nesse teste foi determinado a umidade do resíduo sólido para verificar qual a sua influência nos testes. Esta etapa foi realizada antes do processo pirolítico, sendo os resultados mostrados na Figura 13. Para tal, foi definida uma temperatura de trabalho, como mostram os dados nas Tabela 11 e 12.

Figura 13: Determinação umidade Resíduo Orgânico



Fonte: Próprio autor (2019)

Tabela 11 – Determinação da umidade Biomassa

| Tipo Biomassa | Teste | Umidade (%) | Média umidade (%) |
|---------------|-------|-------------|-------------------|
| RS-Orgânico | 1 | 65% | 63% |
| RS-Orgânico | 2 | 61% | |

Fonte: Próprio autor (2019)

Tabela 12 – Frações da Biomassa SECA

| Tipo Biomassa | Teste | Peso (g) | Temperatura Mufla (°C) | Temperatura Banho (°C) | Composição Estados (%) | | |
|---------------|-------|----------|------------------------|------------------------|------------------------|---------|-------|
| | | | | | Sólido | Líquido | Gases |
| RS | 1 | 19,8491 | 650 | 10 | 25 | 15 | 60 |
| RS | 2 | 17,1373 | 650 | 10 | 26 | 14 | 60 |

Fonte: Próprio autor (2019)

O rendimento em fração gasosa, sólida e líquida mantiveram-se quase constantes nos dois testes, conforme mostra a Tabela 12. Os estudos apresentados por Mesa-Pérez (2004), afirmam que conseguindo manter a igualdade dos procedimentos operacionais, podemos ter resultados equivalentes. Mesmo que Kabir e Hameed (2017) afirmarem que temperaturas altas favorecem a formação da fração líquida (bio-óleo), podemos constatar que essa possibilidade acabou por não se

confirmar. Uma explicação para o ocorrido consta nos estudos de Bridgwater (2004), que por se tratar de um sistema batelada a taxa de aquecimento ficou entre baixa e muito baixa e o tempo retenção ficou entre muito longo a longo. Outro ponto a ser analisado é a grande quantidade de fração gasosa, que pode estar relacionada com a umidade dos resíduos orgânicos. Pelo fato da amostra estar seca, diminuiu água e conseqüentemente aumentou a formação de gás síntese.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao término da pesquisa foi possível determinar a quantidade gerada por composição química do resíduo, da comunidade Linha Barra da Taquara no município de Nova Itaberaba, separando-os em sólidos e recicláveis. A análise dos dados coletados e seu confronto com os estudos realizados pelo IPEA (2013), mostraram que a geração *per capita* ficou abaixo da média.

O trabalho propiciou a construção de um reator em batelada de pirólise em escala laboratorial e testar o seu funcionamento. Sua construção foi de suma importância, tanto para esse trabalho, bem como para auxiliar em pesquisas futuras na área, dentro do *campus* Chapecó-SC da Universidade Federal da Fronteira Sul, já que os laboratórios não possuíam esse equipamento.

Foi possível ainda verificar os problemas na montagem do sistema pirolítico, bem como as dificuldades que surgiram durante os testes realizados, sendo estes de mais simples a mais complexas soluções. Dentre as dificuldades encontradas, pode-se destacar: entupimento da tubulação com biomassa, coleta dos gases condensáveis do reator, conexão com o engate rápido do reator, manipulação do reator para colocar e retirar da mufla, trabalho com temperaturas elevadas e vazamentos de água pela mangueiras.

Através do processo termoquímico de pirólise do RS, o sistema pirolítico demonstrou um bom funcionamento, produzindo as três frações diferentes e que podem ser empregadas para diferentes propósitos. Entretanto, ainda são essenciais estudos mais minuciosos para se entender melhor as condições nas quais pode ser obtido o produto de interesse.

Os experimentos foram realizados através de três testes diferente de pirólise. O primeiro teste foi utilizado a biomassa palha de milho e teve somente o intuito de verificação do sistema, sendo o mesmo realizado com as temperaturas 400°C e 600°C, que mostrou bem definidas e distintas as frações sólida, líquida e gasosa. O segundo teste foi realizado com uma representação do resíduo sólido da comunidade estudada em diferentes temperaturas, sendo elas 600°C, 650°C e 700°C, objetivando a obtenção das frações. A composição química dos resíduos sólidos, parte orgânica foi utilizada no seu estado natural. Pelos resultados foi possível concluir, que quanto maior a temperatura,

há a predominância da fração gasosa, gases não condensáveis, gás de síntese. A fração líquida (bio-óleo) era o principal produto desejado, entretanto não se obteve em condições para sua utilização. Contudo, os estudos realizados poderão ser utilizados em pesquisas futuras para que se consiga utilizar tais resíduos como fonte de energia. No ensaio com temperatura 600°C, tivemos o predomínio da fração líquida, pode ser relacionada com uma grande quantidade de água presente na amostra de resíduos orgânico. As quantidades dos produtos líquidos diminuíram com o aumento na temperatura de 600°C para 650°C e 700°C (63,46%, 50,32% e 27,96% da biomassa respectivamente). Os produtos sólidos, nas mesmas temperaturas, mantiveram uma estabilidade de resultados, ficando em 8,90%, 11,84% e 11,74%, respectivamente. O terceiro ensaio com biomassa seca e temperatura de 650°C tivemos predominância da fração gasosa, e a fração líquida mostrou quantidade menor de água presente no bio-óleo.

A Pirólise é um método eficiente que pode ser utilizado em diversas áreas da ciência, e tem sido muito difundida na geração de energia e no tratamento térmico de resíduos. Existem vários tipos de reatores possíveis para utilização no processo de pirólise, o definido para o trabalho não se mostrou eficaz para a produção do bio-óleo, pois tem uma eficiência baixa na transferência de calor, além das temperaturas não serem fáceis de se controlar. Portanto, é necessário aprofundar os estudos no sentido de encontrar um reator que possa atender essa demanda, no intuito de converter resíduos sólidos com alta umidade em bio-óleo, e conseqüentemente gerar energia para as famílias residentes na zona rural.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2017.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2019.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
3. ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. D3175 – 18 Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. Annual Book of ASTM: [s.n.], 2018.
4. BASU, Prabir. **Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory**. Burlington: Ed. Elsevier, 2010.
5. BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. 2. ed. Campinas: Ed. UNICAMP p.299,1996.

6. BRASIL. Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 18 maio 2019.
7. BRIDGWATER, T. Biomass for energy. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 86, n. 12, p. 1755-1768, 2006.
8. BRIDGEWATER, A. V. **Biomass fast pyrolysis**. **Thermal science**, v. 8, n. 2, p. 21-50, 2004.
9. 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.
10. CHIAVERINI, V. **Aços e Ferro Fundidos**. 6 ed. São Paulo: Ed. Associação Brasileira de Metais, 1988.
11. CORTEZ, L. A. B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O.(org.) **Biomassa para energia**. Campinas: Ed. da Unicamp, 2008.
12. DINIZ, J. **Conversão térmica de casca arroz à baixa temperatura: produção de bio-óleo e resíduo silico-carbonoso adsorvente**. Tese (Doutorado em Química) – Setor de ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
13. FIDELES, A. M.; FRANÇA, R. **Caracterização física dos resíduos sólidos domiciliares e comerciais no município de Chapecó/sc**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Chapecó, 2016.
14. FUNDAÇÃO NACIONAL DA SAÚDE. **Panorama do Saneamento Rural no Brasil**. Disponível em: <<http://www.funasa.gov.br/web/guest/panorama-do-saneamento-rural-no-brasil>> Acesso em : 20 maio 2019
15. 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.
16. 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 maio 2019.
17. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, **Censo Demográfico 2010 no Brasil**. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/.htm>> Acesso em: 20 maio 2019.
18. KABIR, G.; HAMEED, B. H. Recent progress on catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass to high-grade bio-oil and bio-chemicals. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017.

- 19.MESA-PÉREZ, J. M. **Testes em uma Planta de Pirólise Rápida de Biomassa em Leito Fluidizado: Critérios para sua Otimização.** - Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Campinas, Campinas, 2004.
- 20.NICOLINI, K.P. (org.); CASAGRANDE, M.; JESUS, A.C. **Pirolise de biomassa em baixas temperaturas.** 1.ed..Campinas: Ed.Átomo, 2013.
- 21.PASQUALI, Luiz. **Composição gravimétrica de resíduos sólidos recicláveis domiciliares no meio rural de Chopinzinho/PR.** 2012. 66 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2012. Disponível em: <<http://www.utfpr.edu.br/patobranco/estruturauniversitaria/diretorias/dirppg/posgraduacao/mestrados/ppgdr2/arquivos/14.LuizPasquali.PDF>>. Acesso em: 09 maio 2019.
- 22.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
- 23.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.