

Avaliação do potencial energético dos resíduos orgânicos de um restaurante de Tietê/SP – um estudo de caso

MAZZONETTO, Alexandre Witier
CARNIEL, Renata Brandolise Foltran
CATALA, Luiza Brabo
PEDRO, Alexandre da Costa

Resumo

A matriz elétrica brasileira é composta por aproximadamente 75,0% de fontes renováveis, das quais a energia hidráulica responde por 64%, sendo sujeita à sazonalidade. Além disso, a irregularidade das chuvas tem proporcionado crises no abastecimento das cidades e na geração de energia. A diversificação da matriz energética é fundamental para a estabilidade da oferta de energia e se trata de uma boa opção para diversificar com sustentabilidade. Concomitantemente, cuidar do ambiente é destinar os resíduos sólidos urbanos para a produção energética, de modo que isto proporcionaria algumas vantagens adicionais tais como: proteger a sociedade da proliferação de enfermidades, não imobilizar grandes áreas para o depósito destes resíduos e ainda oferecer um destino e tratamento aos resíduos próximo do local de sua geração. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) propõe alterar as práticas de descarte e destinação dos resíduos. Tendo em vista que os restaurantes são grandes geradores de resíduos orgânicos, este trabalho teve como objetivo a caracterização do potencial energético desses resíduos, tanto *in natura* quanto os processados, através das Análises Imediata, Elementar e Poder Calorífico, discutindo as possíveis rotas tecnológicas para geração de energia e tratamento dos resíduos. As rotas tecnológicas disponíveis foram estimadas e comparadas a fim de se obter o maior rendimento – a maior produção de energia com menor massa de rejeitos dos processos. Os resíduos processados demonstraram melhor resultado quando comparados à literatura, proporcionando a melhor opção para geração de energia. O aproveitamento energético dos resíduos apresentou contribuição significativa para suprir uma fração da demanda de energia elétrica do município de Tietê – SP, origem das amostras, podendo ocasionar uma economia média de cento e setenta mil reais por mês (R\$ 170.000,00/mês), dependendo do processo térmico a ser utilizado.

Palavras-chave: Resíduo orgânico, biomassa, energia elétrica, biogás, processos térmicos.

Abstract

The Brazilian energy matrix is composed of 75.5% from renewable resources, which hydraulic energy is responsible for 64%, being subject to seasonality. In addition to this, irregular rainfall has caused crises in the water supply of cities as well as problems in power generation. The diversification of the energy matrix is critical to the stability of energy supply and a great option to diversify with sustainability. At the same time, protect the environment, is to destinate solid waste to energy production, so this would provide some additional advantages such as: protecting society from the proliferation of diseases, not immobilizing large areas for waste disposal and still offer a destination and treatment of waste close to the source where it is produced. The National Policy on Solid Waste (PNRS) proposes to change the waste disposal practices and procedures. Given that restaurants are great generators of organic waste, this study aimed to characterize the energy potential of this waste, both *in natura* as well as processed, through Immediate, Elementary and Calorific Value Analyses, discussing the possible technological routes to power generation and waste treatment. Technological routes available were estimated and compared in order to obtain the highest yield - the process with highest output power with less mass waste. The processed waste showed better results when compared to the literature, and provided the best option for generating energy. The energy recovery

from waste presented significant contribution to supply a fraction of the electricity needs of the city of Tietê - SP, where our samples came from, what may lead to saving an average of one hundred and seventy thousand reais per month (R\$ 170,000.00/month) depending on the thermal process used.

Keywords: organic waste, biomass, electricity, biogas, thermal processes.

Resumen

La matriz eléctrica brasileña está compuesta por aproximadamente un 75,0% de fuentes renovables, de las cuales la energía hidráulica representa el 64%, estando sujeta a la estacionalidad. Además, la irregularidad de las lluvias ha provocado crisis en el suministro de las ciudades y en la generación de energía. La diversificación de la matriz energética es fundamental para la estabilidad del suministro energético y es una buena opción para diversificar con sostenibilidad. Paralelamente, cuidar el medio ambiente es disponer de los residuos sólidos urbanos para la producción de energía, por lo que esto aportaría algunas ventajas adicionales como: proteger a la sociedad de la proliferación de enfermedades, no inmovilizar grandes áreas para el depósito de estos residuos y seguir ofreciendo un destino y tratamiento de residuos cerca del lugar de su generación. La Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS) propone cambiar las prácticas de disposición y disposición de residuos. Teniendo en cuenta que los restaurantes son grandes generadores de residuos orgánicos, este trabajo tuvo como objetivo caracterizar el potencial energético de estos residuos, tanto in natura como procesados, a través del Análisis de Poder Inmediato, Elemental y Calorífico, discutiendo las posibles vías tecnológicas de generación, tratamiento de energía y residuos. Se estimaron y compararon las rutas tecnológicas disponibles para obtener el mayor rendimiento: la mayor producción de energía con la menor masa de residuos de proceso. Los residuos procesados mostraron mejores resultados en comparación con la literatura, proporcionando la mejor opción para la generación de energía. El aprovechamiento energético de los residuos contribuyó de manera significativa a abastecer una fracción de la demanda eléctrica en el municipio de Tietê - SP, origen de las muestras, lo que puede ocasionar un ahorro promedio de ciento setenta mil reales mensuales (R \$ 170.000,00 / mes), dependiendo del proceso térmico a utilizar.

Palabras-clave: Residuo orgánico, biomasa, energía eléctrica, biogás, procesos térmicos.

INTRODUÇÃO

A biomassa, como fonte de energia renovável, desempenha um papel fundamental no contexto energético, ambiental e socioeconômico. As biomassas são provenientes de resíduos urbanos, da madeira, de culturas agrícolas, de plantas aquáticas, algas, animais, processamento de alimentos e seus resíduos (GUEDES et al., 2010). A crescente geração de resíduos, falta de espaços próximos às grandes cidades, necessidade de tratar esses resíduos bem como o aumento da demanda por energia, faz com que o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos (RSU) passe a ser uma alternativa a ser estudada para acrescentar energia ao sistema elétrico e resolver inúmeros problemas.

O aumento da população é mais um fator agravante nesse cenário, pois como consequência a produção de resíduos. Os Estados, municípios e União, estão se adequando a nova Lei 12.305 que foi regulamentada em 2010, a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS).

Vários setores contribuem para a geração de resíduos em um município, dentre eles estão os restaurantes, que são grandes geradores de resíduos orgânicos, cujo destino final desses resíduos, normalmente, são aterros sanitários. E há cada vez menos disponibilidade de áreas para esta finalidade próximas aos grandes centros urbanos.

Este trabalho teve como objetivo caracterizar e analisar os resíduos de alimentos, *in natura* e processados. Além disso, estimar o potencial energético (kW) considerando-se as tecnologias disponíveis. Sendo assim, neste trabalho foram abordados dois tipos de resíduos orgânicos, os processados dos quais passaram por processos térmicos e os “*in natura*” que são verduras, frutas, legumes que não tiveram sua composição alterada.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A lei 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS prevê a elaboração do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, sendo o seu processo no Decreto no. 7.404/2010, que a regulamentou. Cabe à União, por intermédio da coordenação do Ministério do Meio Ambiente, elaborar o Plano Nacional de Resíduos Sólidos num amplo processo de mobilização e participação social (MMA, 2012).

Todos os geradores de resíduos sólidos são responsáveis pelo transporte, armazenamento, reciclagem, tratamento e disposição final dos seus resíduos, podendo encaminhá-los às unidades receptoras desde que estejam licenciadas pelo órgão ambiental competente para manipular, reciclar e tratar, além disso, cabe aos geradores a recuperação das áreas degradadas (BRASIL, 2010).

De acordo com relatório divulgado pela FAO (2013), o volume de alimentos desperdiçados anualmente chega a 1,3 bilhões de toneladas, valor considerado inaceitável, pois isso acarreta em prejuízos à população e aos recursos naturais. O mesmo destaca que o volume de água gasto nos alimentos produzidos, porém não consumidos. Dentre os alimentos, as frutas e hortaliças, em média, são produzidas 16,85 milhões de toneladas, porém 5,45 milhões de toneladas são desperdiçadas.

Alheira (2014) realizou um estudo, totalizando 28 dias, no qual foram avaliados dez restaurantes no município do Rio de Janeiro, os resultados encontrados da quantia total do resíduo alimentar foram de 2811,75 kg sendo uma média diária por restaurante de 100,42 kg. Para avaliar o cenário, foi considerada a possibilidade de desperdício de comida em três etapas do manuseio do alimento sendo estes no armazenamento, produção e pelos clientes que são os consumidores finais. Os resultados obtidos nesta pesquisa foram de 5%, 15% e 80% de desperdício respectivamente.

Biomassa

“Biomassa é uma fonte renovável de produção de energia em escala suficiente para desempenhar um papel expressivo no desenvolvimento de programas vitais de energias renováveis e na criação de uma sociedade ecologicamente mais consciente” (Rossilo-Calle et al., 2005).

De acordo com Cortez et al. (2008) um dos maiores pontos para a motivação da utilização de biomassa é a necessidade de mudar a postura da sociedade, alterando sua matriz energética e tornando-a menos dependentes do uso de derivados de petróleo e conseqüentemente reduzirem a dependência dos países exportadores de petróleo, com isso a emissão dos gases que promovem o efeito estufa, grande problema encontrado no cenário atual.

Como disse Rossilo-Calle et al. (2005, p. 26) “quando produzida de forma eficiente e sustentável, a energia da biomassa traz inúmeros benefícios ambientais e sociais em comparação com os combustíveis fósseis”. Os benefícios proporcionados são inúmeros, sendo os principais a redução da emissão de CO₂, melhor manejo da terra e reciclagem de nutrientes.

Tecnologias Disponíveis

Os principais métodos considerados para conversão termoquímica da biomassa são: pirólise, gaseificação e a combustão. Para definir melhor qual o processo e método a ser utilizado, é necessário caracterizar da biomassa por meio da análise imediata, análise elementar e análise de poder calorífico (FIGUEIREDO, 2009).

O processo de incineração envolve a combustão das substâncias orgânicas presentes nos resíduos. Em outro aspecto, pode-se considerá-lo como um processo de reciclagem energética, pois a energia contida nos resíduos é liberada na queima e, conseqüentemente, reaproveitada em outros processos. Neste processo os resíduos são transformados em cinzas que são formadas pelos constituintes inorgânicos, gases de combustão os quais necessitam de tratamento para reduzir a emissão de alguns gases poluentes e o calor. Alguns dos fatores limitantes deste processo são as variações de umidade e a quantidade de materiais presentes nos RSU; além disso, este processo gera substâncias tóxicas de alto poder cancerígeno (SANTOS, 2011).

Segundo Sánchez (2010), gaseificação é a conversão de qualquer combustível sólido em um gás energético, pela oxidação parcial a temperaturas elevadas (800° - 1000° C). O autor ainda completa que as vantagens de se realizar a gaseificação de biomassa é permitir a redução da dependência de regiões e países às flutuações nos preços dos combustíveis importados além da geração de eletricidade em pequena escala apenas pela queima do gás em um motor interno.

Cortez et al. (2008) dizem que “ao processo de gaseificação são supridas quantidades restringidas de oxigênio, na forma de oxigênio puro ou simplesmente ar atmosférico, dependendo, principalmente, do uso final do gás obtido”. Os autores ainda destacam que este material carbonoso sólido, quando se tem o objetivo de produzir gás de síntese que é rico em hidrogênio e monóxido de carbono, é gaseificado por vapor de água superaquecido sendo incorporado ao agente de gaseificação.

Pode-se definir pirólise como a decomposição térmica de matéria orgânica na ausência de ar ou de oxigênio. Cortez et al. (2008) completam que a pirólise é um processo físico-químico no qual a biomassa é aquecida a temperaturas consideradas baixas (280° C - 800° C) em atmosfera não oxidante, formando carvão que é rico em carbono e uma fração volátil que é composta por gases e vapores orgânicos condensáveis.

Caracterização da Biomassa

Há quatro classes de procedimentos para realizar a caracterização da biomassa quanto suas características físicas e químicas: a Granulometria, Análise Imediata, Análise Elementar e Poder Calorífico (SANCHÉZ, 2010).

As Tabelas 1 e 2 apresentam os resultados encontrados por Mazzonetto et al. (2012) de resíduos de poda, capina e serragem urbana; de Miller & Tillman (2008) com Resíduo de Poda Urbana; resíduo alimentício de uma churrascaria por Mazzonetto, Oliveira e Lopes (2018); resíduo

sólido urbano de dez bairros de Piracicaba/SP feito por Vessalli, Favarin Neto, Oliveira (2013); e resíduo vegetais do CEAGESP de Piracicaba/SP por Silva (2019).

Tabela 1: Composição Imediata de várias biomassas residuais

| Biomassas | Análise Imediata (B. S.) [%] | | | |
|--|------------------------------|--------------|------------------|------------|
| | Umidade [%] | Voláteis [%] | Carbono Fixo [%] | Cinzas [%] |
| Capina Urbana e Rodoviária ¹ | 63,66±0,06 | 86,42±0,62 | 6,78±0,62 | 6,80±0,09 |
| Serragem Urbana (Garapeira e Peroba) ¹ | 11,85±2,38 | 84,05±0,44 | 9,00±0,69 | 6,95±0,82 |
| Resíduo de Poda Urbana ¹ | 60,30±1,41 | 82,37±1,10 | 11,17±1,06 | 6,46±0,43 |
| Resíduo de Madeira Urbana ² | 30,80 | 76,00 | 18,10 | 5,9 |
| Resíduo de churrascaria de Piracicaba ³ | 68,27 | 83,41 | 11,77 | 4,41 |
| RSU Piracicaba ⁴ | - | - | - | - |
| Ceagesp Piracicaba ⁵ | 85,82 | 76,68 | 15,42 | 7,90 |

Fonte: Adaptado de 1- Mazzonetto *et al.* (2012); 2- Miller & Tillman (2008); 3- Mazzonetto, Oliveira e Lopes (2018); 4- Vessalli, Favarin Neto, Oliveira (2013); 5- Silva (2019).

Tabela 2: Composição Elementar e Poder Calorífico [MJ.kg⁻¹] de várias biomassas residuais

| Biomassas | Análise Elementar (B. S.) | | | | PCS [MJ.kg ⁻¹] |
|--|---------------------------|----------------|----------------|--------------|----------------------------|
| | Carbono [%] | Hidrogênio [%] | Nitrogênio [%] | Oxigênio [%] | |
| Capina Urbana e Rodoviária ¹ | 41,70 | 5,90 | 1,15 | 44,45 | 17,80 |
| Serragem Urbana (Garapeira e Peroba) ¹ | 42,87 | 5,67 | 0,38 | 44,13 | 19,07 |
| Resíduo de Poda Urbana ¹ | 42,73 | 5,86 | 1,34 | 43,61 | 18,47 |
| Resíduo de Madeira Urbana ² | 48,00 | 5,50 | 1,40 | 39,20 | 18,28 |
| Resíduo de churrascaria de Piracicaba ³ | 57,19 | 6,10 | 0,35 | 29,66 | 17,71 |

| | | | | | |
|---|-------|------|------|-------|-------|
| RSU Piracicaba⁴ | 46,57 | 6,32 | 2,05 | 35,00 | 18,64 |
| Ceagesp Piracicaba⁵ | 40,85 | 5,79 | 3,63 | 49,23 | 13,37 |

Fonte: Adaptado de 1- Mazzonetto *et al.* (2012); 2- Miller & Tillman (2008); 3- Mazzonetto, Oliveira e Lopes (2018); 4- Vessalli, Favarin Neto, Oliveira (2013); 5- Silva (2019). * O Oxigênio foi determinado pela diferença de C, H, N e cinzas.

METODOLOGIA

Este projeto se aplica na cidade de Tietê que está localizada a 121 km da capital paulista, com aproximadamente 40 mil habitantes atualmente. Possui 404 km² de área, sendo 52 km² de zona urbana e 352 km² zona rural. Dentre os restaurantes situados no município de Tietê, optou-se pelo restaurante M. A. Cancian, localizado no bairro São Pedro, para o fornecimento dos resíduos, uma vez que a localização é a de mais fácil acesso e maior disponibilidade no fornecimento de todas as amostras. Os tipos de resíduos encontrados são resto de ingesta, cascas de frutas e legumes, guardanapos de papéis, lata e plástico. Computa-se uma média de 50 kg por dia de resíduos orgânicos.

Foram coletadas nove (9) amostras de cada tipo de resíduo (processado e *in natura*), pois o restaurante escolhido tem uma variância de nove (9) cardápios.

Análise Imediata

“A análise imediata fornece as frações, em peso, de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo de uma amostra de biomassa” (Sánchez, 2010).

Análise de Umidade

A determinação de umidade é a primeira análise a ser realizada seguindo o roteiro da norma ASTM E1756-08 (2020). A amostra foi submetida à estufa, sob temperatura entre 104 a 110° C, de modo que o tempo é variável uma vez que este depende de cada tipo de material a ser analisado. O cálculo do porcentual de umidade é dado pelas Equações 1 e 2:

$$\%sólidos = \left[\frac{(Pf - Pc)}{(Pi - Pc)} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$\%umidade = 100\% - \%sólidos \quad (2)$$

Onde:

Pi = peso inicial da massa úmida com o cadinho tampado;

Pf = Peso final da amostra seca e estabilizada com o cadinho tampado;

Pc = peso do cadinho vazio e tampado.

Voláteis

A amostra é aquecida por 6 minutos a 950° C. Esta análise segue roteiro adaptado da norma ASTM E872-82 (ASTM, 2019). O cálculo do percentual de voláteis é dado pelas Equações 3 e 4:

$$\% \text{ voláteis} = A - B \quad (3)$$

$$A = \left[\frac{(Pf - Pc)}{(Pi - Pc)} \right] \times 100 \quad (4)$$

Onde:

Pi = peso inicial da massa desumidificada na análise de umidade e com o cadinho tampado;

Pf = peso final da amostra volatilizada com o cadinho tampado;

Pc = peso do cadinho vazio e tampado;

B = valor % de umidade calculando na norma ASTM E871-82 (ASTM, 2019).

Análise de Cinzas

A determinação de cinzas segue roteiro da norma ASTM E1755-01 (ASTM, 2020). O cálculo do percentual de cinzas é dado pela Equação 5:

$$\% \text{ cinzas} = \left[\frac{(Pf - Pc)}{(Pi - Pc)} \right] \times 100 \quad (5)$$

Onde:

Pc = peso do cadinho vazio e tampado

Pi = peso inicial da massa volatilizada com o cadinho tampado

Pz = peso do cadinho tampado com as cinzas

Determinação do Teor de Carbono Fixo

A determinação do carbono fixo foi feita por diferença entre a soma dos teores (%) de umidade, matéria volátil e cinzas e 100%. O cálculo para esta análise é dado pela Equação 6:

$$\% \text{ carbono fixo} = 100\% - \% \text{ umidade} - \% \text{ voláteis} - \% \text{ cinzas} \quad (6)$$

Poder Calorífico

O poder calorífico de combustíveis sólidos foi determinado através de ensaio de bomba calorimétrica seguindo a norma ASTM E711-87 (ASTM, 2004). Essa técnica determina o poder calorífico superior a volume constante, que pode ser convertido em poder calorífico inferior. Essa

conversão pode ser realizada através da Equação 7, retirada da norma ASTM E711-87 (ASTM, 2004):

$$PCI = PCS - 23,96 (9H) \quad (7)$$

Onde:

- PCI: Poder calorífico inferior (kJ/kg);
PCS: Poder calorífico superior (kJ/kg);
H: Teor em massa de Hidrogênio no combustível (%).

Em algumas aplicações, como em dimensionamentos preliminares de sistemas, é suficiente conhecer o poder calorífico a partir das equações empíricas. Porém, para uma melhor precisão e aplicação real do combustível é imprescindível o teste em bomba calorimétrica. Para se calcular o Poder Calorífico Superior (PCS) e Inferior (PCI) das amostras, segundo Lopes (2007) podem ser utilizadas as equações de Mendeleev (Equação 8) e a equação de Dulong (Equação 8).

Equação de Mendeleev:

$$PCI = 339C + 1030H - 109(O - S) - 25,2 W \text{ [kJ/kg]} \quad (8)$$

Equação de Dulong:

$$PCS = 33774C + 141744[H - (O/8)] + 9238 S \text{ [kJ/kg]} \quad (9)$$

Onde:

- PCI = poder calorífico inferior [kJ/kg];
PCS = poder calorífico superior [kJ/kg];
C = teor de Carbono (kg de Carbono/ kg de combustível);
H = teor de Hidrogênio (kg de Hidrogênio/ kg de combustível);
O = teor de Oxigênio (kg de Oxigênio/ kg de combustível);
S = teor de Enxofre (kg de Enxofre/ kg de combustível);
W = umidade ou teor de água (kg de água/ kg de combustível).

Análise Elementar

A análise elementar fornece frações, em peso, dos elementos constituintes da biomassa, sendo os principais elementos carbono, nitrogênio, hidrogênio e oxigênio. O ensaio é destrutivo e a análise, realizada com os gases provenientes da pirólise da amostra (SÁNCHEZ, 2010).

O resíduo desta análise é considerado como cinzas. Entretanto, a porção deste resíduo não se iguala a concentração de cinzas determinada pela análise imediata. Entretanto, de qualquer modo, a amostra com alto teor de cinzas possui também alto teor de resíduos.

Análise Imediata

A Análise Imediata foi realizada com a finalidade encontrar as taxas de umidade, o teor de voláteis, cinzas e carbono fixo de cada amostra.

A princípio foram utilizados cinco cadinhos de porcelana para cada uma das amostras. Os cadinhos foram pesados na balança analítica, e seus valores anotados; em seguida, preenchidos até 2/3 do seu volume, e pesados novamente. Após este procedimento, os cadinhos foram transferidos para a estufa, onde ficaram expostos a uma temperatura de 105° C, por 24 horas. Após o tempo de secagem, os cadinhos são transferidos para o dessecador, com o auxílio de uma pinça, por meia hora; e, em seguida, pesados. Após isso, voltam-se os cadinhos na estufa por mais uma hora, e se repete o procedimento anterior, comparando os valores para avaliar a estabilização da umidade - não ocorrer variação dos valores até a segunda casa decimal. A partir desse processo de secagem, foi possível descobrir as taxas de umidade das amostras através da comparação entre a primeira pesagem e a última.

Em continuação à Análise Imediata, os cadinhos já secos seguiram para a mufla a uma temperatura de 950° C, por 6 minutos, para a determinação da fração de voláteis. Para esse processo, utilizaram-se luvas térmicas e pinça para colocar e retirar os cadinhos da mufla. Saindo da mufla, os cadinhos devem ser resfriados no dessecador. Após o resfriamento, os cadinhos foram pesados novamente e seus novos pesos anotados. Com base nos dados encontrados, podemos calcular o tamanho da chama que a biomassa atingirá representada pelos hidrocarbonetos e gases hidrogênio, monóxido de carbono e metano.

A última análise realizada no laboratório foi a determinação da quantidade de cinzas da amostra. Para isso, os cadinhos voltaram para a mufla sob uma temperatura de 575° C \pm 20° C, onde ficaram expostas ao calor por duas horas. Em seguida, os cadinhos foram transferidos para o dessecador por mais uma hora para resfriamento. Por fim, foram pesados os cadinhos e anotados os valores finais - ASTM E1755-01 (ASTM, 2020).

Para encontrar o valor do carbono fixo não foi necessário um experimento; ele foi determinado através da diferença de peso.

Análise Elementar

A análise elementar é baseada na combustão da amostra para a determinação de seus principais elementos. A técnica fornece os valores de Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio e Oxigênio (o Oxigênio é obtido por diferença). Esta análise foi realizada na Central Analítica do Instituto de Química (IQ) da Universidade de São Paulo (USP), no Campus de São Paulo/SP.

Poder Calorífico

De acordo com a norma ASTM E711-87 (ASTM, 2004), o poder calorífico de combustíveis sólidos pode ser determinado através de ensaio em bomba calorimétrica. Porém, como não foi possível obter resultados através deste ensaio, foi determinado através das equações de Mendeleev (Equação 8) e Dulong (Equação 9).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para se obter o potencial energético dos resíduos processados e *in natura* do restaurante estudado, foi necessário obter inicialmente a composição Imediata, Elementar, além de seu Poder Calorífico através das equações de Medeleev e Dulong (Equações 8 e 9, respectivamente).

A Tabela 4 e o Gráfico 1 apresentam os valores médios obtidos na Análise Imediata dos resíduos alimentícios *in natura* e processados, os quais foi comparado com dados da literatura para o resíduo de poda urbana (Tabelas 1 e 2). Notou-se que todos os valores destacados na Tabela 4 estão entre o intervalo dos valores da literatura.

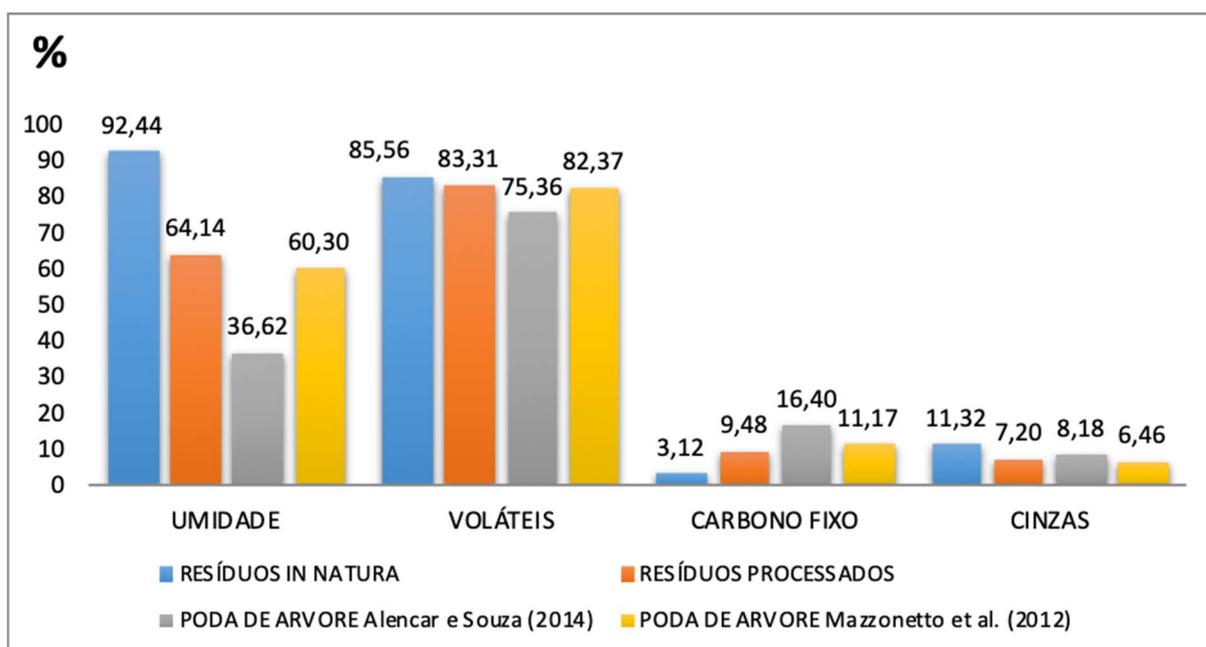
Tabela 3: Comparação dos valores obtidos pela Análise Imediata comparando-se com outros trabalhos

| Biomassas | Análise Imediata (B. S.) [%] | | | |
|---|------------------------------|-------------------|------------------|------------------|
| | Umidade [%] | Voláteis [%] | Carbono Fixo [%] | Cinzas [%] |
| <i>Alimentos In Nataura</i> | 92,44 | 85,56 | 3,12 | 11,32 |
| Resíduos | | | | |
| Alimentícios | 64,14 | 83,31 | 9,48 | 7,20 |
| Processados | | | | |
| Capina Urbana e Rodoviária ¹ | 63,66±0,06 | 86,42±0,62 | 6,78±0,62 | 6,80±0,09 |
| Serragem Urbana (Garapeira e Peroba) ¹ | 11,85±2,38 | 84,05±0,44 | 9,00±0,69 | 6,95±0,82 |

| | | | | |
|--|------------|------------|------------|-----------|
| Resíduo de Poda Urbana¹ | 60,30±1,41 | 82,37±1,10 | 11,17±1,06 | 6,46±0,43 |
| Resíduo de Madeira Urbana² | 30,80 | 76,00 | 18,10 | 5,9 |
| Resíduo de churrascaria de Piracicaba³ | 68,27 | 83,41 | 11,77 | 4,41 |
| RSU Piracicaba⁴ | - | - | - | - |
| Ceagesp Piracicaba⁵ | 85,82 | 76,68 | 15,42 | 7,90 |

Fonte: 1- Mazzonetto et al. (2012); 2- Miller & Tillman (2008); 3- Mazzonetto, Oliveira e Lopes (2018); 4- Vessalli, Favarin Neto, Oliveira (2013); 5- Silva (2019).

Gráfico 1: Comparação de resultados referentes às análises imediatas



Fonte: Autores e adaptação de Alencar & Souza (2014); Mazzonetto et al. (2012).

Como é possível observar na Gráfico 1, a umidade encontrada através das análises realizadas nos resíduos *in natura* é bem superior àquela encontrada nos resíduos processados e nas podas de árvores dos autores Alencar e Souza (2014) e Mazzonetto et al. (2012). Isso também foi observado nas demais variações e inversões dos valores esperados de voláteis, cinzas e carbono fixo. Segundo Mazzonetto et al. (2012), a determinação de voláteis é importante para uma previsão do comprimento da chama a ser gerada, pois, através da devolatilização ocorre o desprendimento de gases combustíveis formados durante a elevação da temperatura. Portanto, como os valores do teor de voláteis para ambos os resíduos estudados neste trabalho se encontram na média em comparação com as podas de árvore, isso significa que todos os resíduos processados e *in natura*

do restaurante de Tietê/SP possuem formação da chama. Para os resíduos *in natura*, os valores de carbono fixo estão abaixo de todas as comparações realizadas; e os teores de cinzas estão elevados, comparados às demais amostras. Já para os resíduos processados, os valores encontrados para o teor de carbono fixo estão abaixo dos valores expressos por ambos os autores - Alencar e Souza (2014) e Mazzonetto et al. (2012); e os teores de cinzas desses resíduos estão abaixo dos valores do Mazzonetto et al. (2012) e acima dos encontrados por Alencar e Souza (2014).

De acordo com Mazzonetto et al. (2012), as cinzas são os materiais residuais da oxidação completa do combustível sólido sendo composta basicamente por constituintes inorgânicos, sendo estes: óxido de alumínio (Al_2O_3); óxido férrico (Fe_2O_3); óxido de silício (SiO_2); óxido de potássio (K_2O); óxido de cálcio (CaO); óxido de magnésio (MgO), entre outros. Desta forma, os resíduos “*in natura*” possuem maior teor de impurezas. É importante lembrar que as cinzas de biomassa são sempre um ótimo adubo, pronto para uso; portanto, as cinzas não precisam ser dispostas em aterros, antes podem adubar qualquer produção agrícola ou jardim.

Devido ao alto teor de voláteis, ambos os tipos de resíduos – *in natura* e processados - proporcionam maior facilidade de ignição, ou seja, são de fácil combustão. Todavia, já quanto à geração de calor e sua manutenção da combustão, os resíduos processados são mais indicados devido ao maior teor de “carbono fixo” do que o encontrado nos resíduos *in natura*.

Ainda sobre o Gráfico 1, fica evidente que os valores obtidos pelos autores estão “próximos” ou o intervalo obtido compreende os valores encontrados por Mazzonetto, Oliveira e Lopes (2018) e Silva (2019). Percebeu-se que os teores de carbono fixo presentes nas amostras estão compreendidos entre os valores encontrados para capina e serragem urbana fornecidos pela literatura.

A Tabela 5 e o Gráfico 2 apresentam valores médios obtidos e estimados na Análise Elementar dos resíduos *in natura* e processados dos resíduos alimentícios *in natura* e processados, os quais foram comparados com dados da literatura (Tabelas 1 e 2). A Tabela 5, ainda, apresenta os resultados da Análise do Poder Calorífico estimado pelas equações de Mendeleev e Dulong (Equações 8 e 9, respectivamente) para os resíduos estudados e sua comparação com os valores fornecidos pela literatura. É possível notar que os valores destacados estão entre o intervalo dos valores encontrados em outros trabalhos.

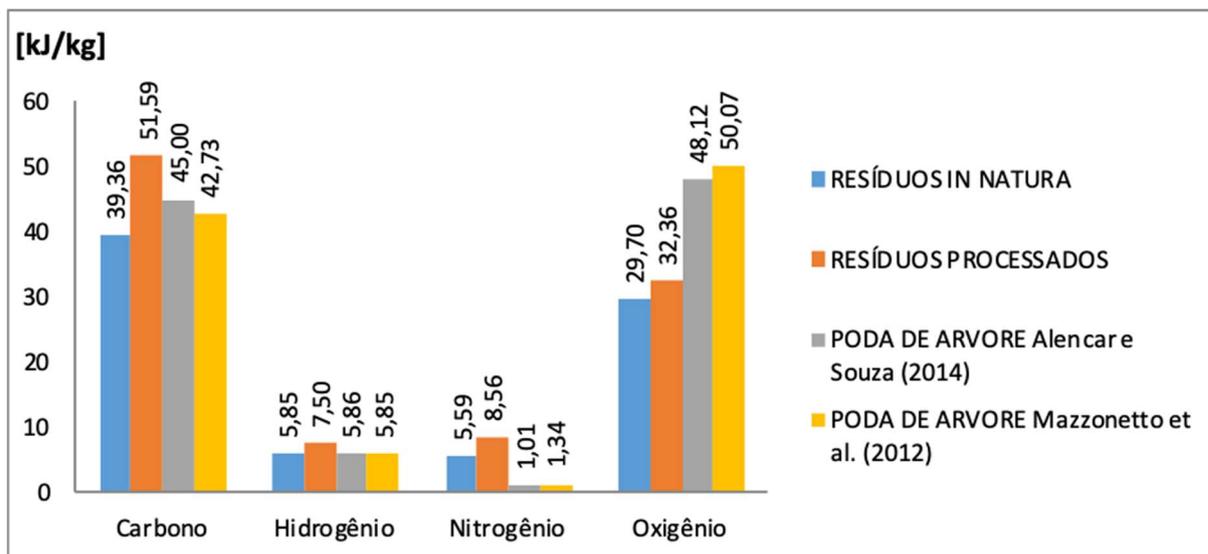
Tabela 4: Comparação dos valores obtidos pela Análise Elementar e estimativas do Poder Calorífico Superior (PCS – MJ.kg⁻¹) comparando-se com outros trabalhos

| Biomassas | Análise Elementar (B. S.) | | | | PCS [MJ.kg ⁻¹] |
|--|---------------------------|----------------|----------------|--------------|----------------------------|
| | Carbono [%] | Hidrogênio [%] | Nitrogênio [%] | Oxigênio [%] | |
| <i>Alimentos In Nataka</i> | 39,36 | 5,85 | 5,59 | 29,70 | 13,09 - 17,86 |
| Resíduos Alimentícios Processados | 51,59 | 7,50 | 8,56 | 32,36 | 19,31 – 23,64 |
| Capina Urbana e Rodoviária ¹ | 41,70 | 5,90 | 1,15 | 44,45 | 17,80 |
| Serragem Urbana (Garapeira e Peroba) ¹ | 42,87 | 5,67 | 0,38 | 44,13 | 19,07 |
| Resíduo de Poda Urbana ¹ | 42,73 | 5,86 | 1,34 | 43,61 | 18,47 |
| Resíduo de Madeira Urbana ² | 48,00 | 5,50 | 1,40 | 39,20 | 18,28 |
| Resíduo de churrascaria de Piracicaba ³ | 57,19 | 6,10 | 0,35 | 29,66 | 17,71 |
| RSU Piracicaba ⁴ | 46,57 | 6,32 | 2,05 | 35,00 | 18,64 |
| Ceagesp Piracicaba ⁵ | 40,85 | 5,79 | 3,63 | 49,23 | 13,37 |

Fonte: Autores e adaptado de 1- Mazzonetto et al. (2012); 2- Miller & Tillman (2008); 3- Mazzonetto, Oliveira e Lopes (2018); 4- Vessalli, Favarin Neto, Oliveira (2013); 5- Silva (2019).

* O Oxigênio foi determinado pela diferença de C, H, N e cinzas.

Gráfico2: Comparação de resultados referentes a Análise Elementar



Fonte: Autores e adaptação de Alencar & Souza (2014); Mazzonetto et al. (2012).

Conforme dito por Cortez et al. (2008), a composição elementar é a característica técnica mais importante do combustível e constitui a base para análise dos processos de combustão. Os valores obtidos apresentaram apenas baixa variação na quantidade de hidrogênio, sendo que o resíduo *in natura* se igualou aquela encontrada por Mazzonetto et al. (2012). Em relação ao nitrogênio, ambos os resíduos estudados possuem valores significativamente superiores aos trabalhos de Alencar e Souza (2014) e de Mazzonetto et al. (2012). No caso do oxigênio, os valores obtidos para ambos os resíduos se encontraram inferiores; já na quantidade de carbono, o valor com maior discrepância foi para o resíduo processado, enquanto que para o resíduo *in natura* o valor é menor e próximo aos valores comparados.

Os valores encontrados de Poder Calorífico Superior para os resíduos *in natura* e processados são 13,86 e 22,51 MJ.kg⁻¹, respectivamente. Para os resíduos *in natura*, em ambas as equações os valores obtidos são inferiores aos dos demais trabalhos. Já os resíduos processados obtiveram resultados superiores, porém em ambos os casos as diferenças encontradas são relativamente pequenas. Esses resultados não são utilizados na prática, pois, segundo Cortez et al. (2009), em indústrias a temperatura dos gases de saída é maior que a temperatura de condensação.

O potencial de aproveitamento energético pode ser calculado através dos valores apresentados por Henriques (2004) e por Young (2011). A Tabela 6 apresenta as estimativas de geração de energia utilizando-se rotas térmicas, escolhidas pela eficiência energética, por ter processos mais rápidos em relação ao anaeróbio (horas ao invés de dias), oferecerem um tratamento

sanitários aos resíduos simultaneamente à produção de energia; e atendem a PNRS – reduzindo, tratando e dando outro uso.

Tabela 6: Energia potencial calculada em MWh

| Processo Térmico | Taxa [kWh/ton RSU] | RSU/dia [ton] | MW.h dia | R\$/dia | MW.h mês | R\$/mês |
|--|--------------------------|------------------|----------|----------|-------------|------------|
| Incineração | 493 | 25,858 | 13 | 4.665,26 | 382 | 139.957,68 |
| Pirólise | 518 | 25,858 | 13 | 4.901,83 | 402 | 147.054,92 |
| Pirólise / Gaseificação | 621 | 25,858 | 16 | 5.876,52 | 482 | 176.295,57 |
| Gaseificação Convencional | 621 | 25,858 | 16 | 5.876,52 | 482 | 176.295,57 |
| Gaseificação com arco de plasma | 740 | 25,858 | 19 | 7.002,62 | 574 | 210.078,46 |

Considerando-se R\$ 365,96/MW.h (segundo CCEE).

Observa-se que, caso o reaproveitamento dos resíduos sólidos urbanos fosse implantado, o aproveitamento energético ocasionaria, em média, uma economia de aproximadamente 170.000 reais por mês. Além disso, o melhor processo térmico a ser aplicado é da gaseificação, desconsiderando a gaseificação com arco de plasma, uma vez que os custos com implantação deste último são elevados.

CONCLUSÃO

Com as amostras analisadas foi possível determinar o potencial energético dos resíduos orgânicos do restaurante. Os resultados das amostras demonstraram potencial para geração de energia.

As rotas térmicas possibilitam a rápida geração de energia, atendem a PNRS e não geram rejeitos, pois as cinzas de alimentos (biomassas residuais) podem ser usadas como adubo.

O estudo mostra a possibilidade de geração de energia, uma opção para a destinação de resíduos orgânicos e a diminuição da necessidade de aterros sanitários para essas biomassas residuais.

Foi possível perceber que os valores encontrados nesse estudo estão de acordo com a literatura, com pouca variação em relação as amostras dos resíduos processados; porém, para as

amostras *in natura* houve maior variação principalmente nos valores de umidade e carbono fixo, tornando-o mais difícil de se trabalhar. Por demonstrarem melhores resultados e mais próximos ao comparado pela literatura, os resíduos processados proporcionam, portanto, melhor opção para geração de energia.

O aproveitamento energético dos resíduos, como apresentado, demonstra contribuição significativa para suprir a demanda de energia elétrica do município de Tietê, ocasionando uma economia, em média, de cento e setenta mil reais por mês (R\$ 170.000,00/mês), de modo que este valor podendo variar de acordo com o tipo de processo térmico a ser utilizado. Além disso, os valores de resíduos gerados não sofrem com sazonalidade, é um volume em média constante ao longo do ano, considerando-se a união de todos os locais da geração dos resíduos.

REFERÊNCIAS

- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E711-87: *Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter*. West Conshohocken, 2004. 8 p.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E871-82: *Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels*. West Conshohocken, 2019. 2 p.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E872-82: *Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels*. West Conshohocken, 2019. 3 p.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E1755-01: *Standard Test Method for Ash in Biomass*. West Conshohocken, 2020. 3 p.
- ALENCAR, L. S.; SOUZA, N. R. D. de. ***Análise de potencial energético das podas de árvores de Piracicaba***. 50 f. TCC (Graduação) - Faculdade de Tecnologia de Piracicaba Dep. “Roque Trevisan” – Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza”, Tecnologia em Biocombustíveis, Piracicaba -SP, 2014.
- ALHEIRA, F. V. Avaliação do desperdício de alimentos em restaurantes comerciais do município do Rio de Janeiro: UNEP - Planeta Orgânico. In: *GREEN RIO*, 2014. Rio de Janeiro: Senac, 2014.
- BRASIL. *Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências*. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 13 ago. 2014.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. (Org.). **Biomassa para energia**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008. 736 p.

FIGUEIREDO, F. A. B. **Pirólise e gaseificação de casca de castanha de caju**: avaliação da produção de gás, líquidos e sólidos. 114 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

GUEDES, C. L. B.; Adão, D. C.; Quessada, T. P.; Borsato, D.; Galão, O. F. Avaliação de biocombustível derivado do bio-óleo obtido por pirólise rápida de biomassa lignocelulósica como aditivo para gasolina. *Química Nova*, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 781-786. 2010. Disponível em: http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/Vol33No4_781_02-AR09092.pdf. Acesso em: 28 fev. 2017.

HENRIQUES, R. M. *Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos*: uma abordagem tecnológica. 2004. 204 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Planejamento Energético, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

LOPES, A. A. *Estudo da gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos na Bacia Tietê-Jacaré (UGRHI-13)*. 2007. 370 f. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

MAZZONETTO, A. W.; OLIVEIRA, J. C. S. de; LOPES, J. P. V. Potencial energético do resíduo alimentício de um restaurante – estudo de caso. *Bioenergia em Revista: diálogos*, v. 8, n. 1, p. 48-68. 2018. Disponível em: <http://fatecpiracicaba.edu.br/revista/index.php/bioenergiaemrevista/article/view/273>. Acesso em 31.03.2020.

MAZZONETTO, A. W.; VISSOTTO, J. P.; NEVES, R. C.; SÁNCHEZ, E. M. S.; SÁNCHEZ, C. G. Caracterização de resíduos de poda, capina e serragem urbana para geração de energia. In: *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 7., 2012*. São Luís, Maranhão: ABCM, 2012.

MILLER, B. G.; TILLMAN, D. A. *Combustion engineering issues for solid fuels*. San Diego, California: Elsevier, 2008. 502 p.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Planos de gestão de resíduos sólidos**: manual de orientação. Brasília, DF: ICLEI, 2012. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/182/_arquivos/manual_de_residuos_solidos3003_182.pdf. Acesso em: 25 ago. 2014.

FAO - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA. ***Desperdício de alimentos tem consequências no clima, na água, na terra e na biodiversidade.*** 2013. Disponível em: <https://www.fao.org.br/daccatb.asp>. Acesso em: 26 jan. 2015.

ROSSILO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. (Org.). ***Uso da biomassa para produção da energia na Indústria brasileira.*** Campinas, SP: Unicamp, 2005. Tradução de: José Dilcio Rocha e Maria Paula G. D. Rocha.

SANTOS, G. G. D. dos. ***Análise e perspectivas de alternativas de destinação dos resíduos sólidos urbanos: o caso da incineração e da disposição em aterros.*** 193 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Planejamento Energético, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SÁNCHEZ, C. G. (Org.). ***Tecnologia da Gaseificação de Biomassa.*** Campinas, SP: Átomo, 2010. 430 p.

SILVA, Kaio Pereira de Freitas. ***Potencial energético dos resíduos do CEAGESP de Piracicaba/SP comparação de biogás e processos térmicos.*** TCC (Graduação – Tecnologia) – Faculdade de Tecnologia de Piracicaba Dep. “Roque Trevisan” – Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza”, Tecnologia em Biocombustíveis, Piracicaba - SP, 2019.

YOUNG, G. C. ***Municipal solid waste to energy conversion processes: economic, technical, and renewable comparison.*** Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2010. 396 p.

1 MAZZONETTO, Alexandre Witier possui Graduação em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual de Campinas - FEAGRI/UNICAMP. Mestrado em Engenharia Agrônômica - Máquinas Agrícolas/Biomassa - Colheita Integral de Cana Crua, pela Universidade de São Paulo - ESALQ/USP. Doutorando pela Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - Departamento de Energia - FEM/UNICAMP (Caracterização e potencial energético de biomassas residuais da região de Piracicaba – SP. Na Graduação envolveu-se em Pesquisa/Desenvolvimento de processos térmicos, desenvolvendo um secador rotativo de sementes e outro de leito fluidizado. Desde o Mestrado vem trabalhando com fontes renováveis de energia e biomassas residuais (tratamento e geração de energia); levando-o a cursar Química na Universidade Mackenzie (Bacharel, Licenciatura e Industrial). Processos térmicos para obtenção de biocombustíveis, gaseificação, pirólise e combustão/incineração, e combustíveis sustentáveis, gás de síntese (Syngas), produção e uso do biogás - biodigestão anaeróbia de diversas biomassas residuais. Professor na FATEC Piracicaba (Biocombustíveis e Gestão Empresarial).

2 CARNIEL, Renata Brandolise Foltran é graduada em Tecnologia em Biocombustíveis pela FATEC Piracicaba Dep. “Roque Trevisan”. Técnica em Química pela ETEC Piracicaba. Tecnóloga em Biocombustíveis pela FATEC Piracicaba. Pós-Graduada em Gestão Ambiental pelo Centro Universitário de Maringá - UNICESUMAR. Desde o técnico atuando em pesquisas com reaproveitamento de resíduos e buscando as melhores fontes de destinação para os mesmos. Auxiliar de escritório, exercendo funções administrativas e financeira. Durante a graduação estagiando no laboratório de Biotecnologia.

3 CATALA, Luiza Brabo é graduada em Tecnologia em Biocombustíveis pela FATEC Piracicaba Dep. “Roque Trevisan”. Atualmente é doutoranda em Gestão e Sustentabilidade na University of Waikato, Nova Zelândia. Sua pesquisa de doutorado é sobre intervenções e políticas públicas para erradicar a pobreza energética no país, possuindo experiência prévia em pesquisa na área de produção de biocombustíveis e bioprodutos a partir de resíduos agroindustriais. Possui mestrado em Sustentabilidade Global (com concentração em Energia Sustentável) e especialização em Mudança Climática e Sustentabilidade, ambos pela University of South Florida, Estados Unidos. É graduada em Tecnologia em Biocombustíveis pela Fatec – Faculdade de Tecnologia de Piracicaba Dep. “Roque Trevisan”.

4 PEDRO, Alexandre da Costa possui graduação em Engenharia Química pela Fundação Armando Álvares Penteado - FAAP (2015). Tem experiência na área de Engenharia Química, com ênfase em Energia e Biocombustíveis. Recentemente premiado como melhor aluno do curso de Engenharia Química da FAAP em 2015 (CREA-SP).