


Gestão dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Manaus-AM. Caracterização térmica visando geração de energia

 <https://doi.org/10.56238/sevened2024.004-024>

Melquizedec Arcos Rodrigues

Doutorando em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Rua Mendeleiev, 200, Cidade Universitária Zeferino Vaz, Barão Geraldo, Campinas - SP, 13083-860.

E-mail: m230372@dac.unicamp.br

Fátima Aparecida de Moraes Lino 3

Pós - Doutora em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Rua Mendeleiev, 200, Cidade Universitária Zeferino Vaz, Barão Geraldo, Campinas - SP, 13083-860.

E-mail: kamal@fem.unicamp.br

Kamal Abdel Radi Ismail

Doutor em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Rua Mendeleiev, 200, Cidade Universitária Zeferino Vaz, Barão Geraldo, Campinas - SP, 13083-860.

E-mail: kamal@fem.unicamp.br

Inácia Oliveira de Azevedo

Mestranda em Educação. Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Av. General Rodrigo Octavio Jordão Ramos, 1200 - Coroado I, Manaus - AM, 69067-005.

E-mail: I_azevedo10@hotmail.com

RESUMO

Com uma população de dois milhões de habitantes, Manaus - AM passou por um significativo desenvolvimento industrial e conseqüente crescimento urbano, resultando em um aumento substancial na demanda por energia urbana e no controle dos resíduos gerados. Atualmente, todo o resíduo sólido urbano (RSU) é depositado em aterros sanitários, causando problemas de saúde para a população, contaminação do solo, rios e lençóis freáticos. Este trabalho propõe o uso da incineração para recuperar a energia dos resíduos sólidos urbanos e gerar eletricidade na região metropolitana de Manaus - AM. Foram realizados testes de caracterização energética em RSU coletados em vários bairros da cidade, incluindo: testes gravimétricos, análise termogravimétrica (TGA), análise proximal, análise elementar e maior poder calorífico (HHV). Por fim, foi determinado o menor valor de aquecimento (LHV). As altas porcentagens de materiais recicláveis, acima de 50%, combinadas com os valores de LHV, que variam de 15.000 a 19.000 kJ/kg em dias secos, equivalentes aos valores caloríficos de combustíveis listados na literatura, como lignito, madeira seca em forno e cascas de coco (17.000 kJ/kg) e carvão mineral (15.000 kJ/kg), mostraram-se promissoras para futuras tomadas de decisão no tratamento de RSU por incineração.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos, Incineração de resíduos, Recuperação de energia, Geração de energia sustentável, Potencial energético dos resíduos sólidos.

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais os lixões e aterros controlados ocupam grandes áreas nos grandes centros urbanos, contaminando os solos e lençóis freáticos, atraindo animais e insetos, aumentando os riscos à saúde da população e elevando a emissão de gases de efeito estufa. Uma considerável parcela desse RSU vai parar nos leitos de rios e igarapés, obstruem sistemas de águas pluviais e causam alagações. Esses benefícios sociais e ambientais por si só justificam a necessidade de solucionar esse problema. A Lei Federal nº 12.305/10 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), dava o prazo de 10 anos para que os problemas decorrentes dos RSU fossem extintos. Esgotado o prazo, aproximadamente 60% das cidades do país ainda não tinham alcançado esse objetivo.

Entre os anos de 2010 e 2022 a geração de RSU no Brasil registrou considerável aumento de 20,90% (passando de 67 milhões para 82 milhões de toneladas por ano), o triplo da taxa de crescimento da população que foi de 6,46% no mesmo período. Por sua vez, a geração per capita aumentou de 348 kg/ano para 381 kg/ano (ABRELPE, 2022). Por outro lado, haveria benefícios econômicos e sustentáveis se houvesse recuperação de energia através do tratamento térmico dos RSU, uma vez que existe a possibilidade viável e atrativa de integração com outros processos, tais como a reciclagem e a compostagem, assim como com a diminuição da disposição de rejeitos em aterros e lixões e suas consequências (ABREN, 2020).

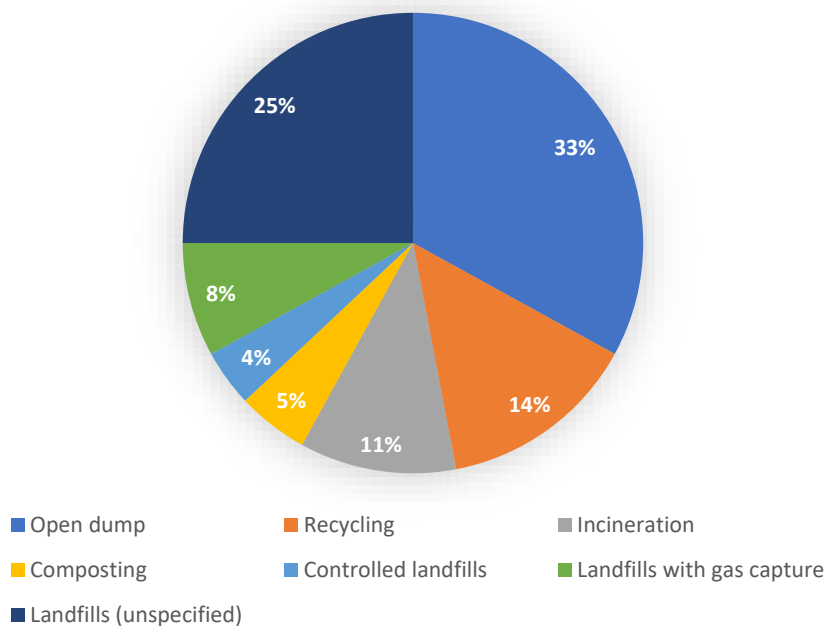
Na cidade de Manaus, capital do estado do Amazonas, maior estado do Brasil, com suas riquezas ecológicas e ambientais, não existe tratamento térmico de resíduos sólidos. 2.800 toneladas de RSU coletados todos os dias, são aterrados no local. A prefeitura não tem área nem interesse de construir outro aterro, devendo contratar esses serviços de empresas privadas. Ademais o IBGE classificou Manaus como a quarta pior cidade do Brasil com acúmulo de lixo nos logradouros. Aproximadamente 6,2 % do entorno dos domicílios há a presença de lixo acumulado. Apenas próximo aos igarapés são 108.000 moradores afetados com odor desagradável, doenças e muita sujeira. Um total de 345.000 famílias são afetadas pelas sujeiras nos igarapés de Manaus (SEMULSP MANAUS, 2021).

Atualmente a situação da gestão de RSU em Manaus - AM quase todo RSU é pago para ser aterrado (98%), ocupando uma área de 66 hectares que está em operação desde o ano de 1985 e tem vencimento para 2024. A tecnologia para manejo de resíduos sólidos foi empregada somente em 2006, ou seja, por mais de 20 anos funcionou como lixão a céu aberto, o que teve como consequência contaminação de alguns igarapés como o da ponte da Bolívia e Conceição, e a Cachoeira Alta do Tarumã. O aterro também gera de emissões de gases de efeito estufa e mal cheiro no local. O baixo índice de reciclagem (1,68%) impacta negativamente a expectativa de renda das cooperativas de coletores e demais atividades relacionadas (ABRELPE, 2022).

Abren (2019) revela que o setor de resíduos é responsável por 11% do total de gases de efeito

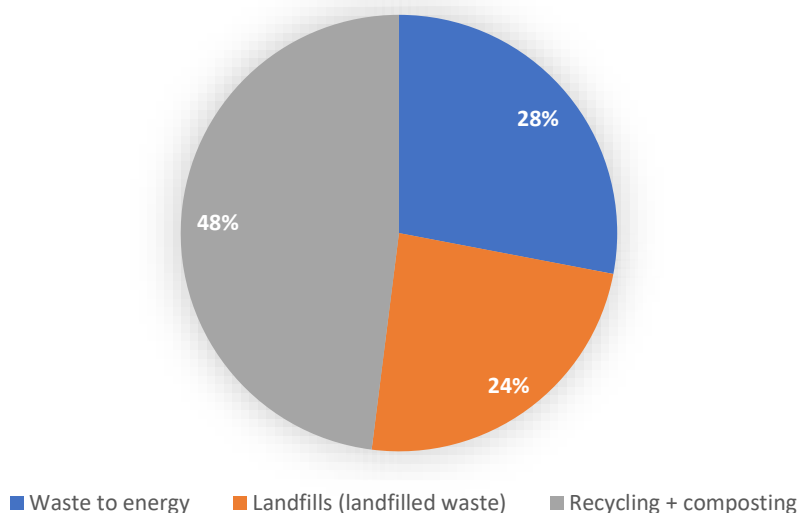
estufa emitidos na atmosfera. O metano (CH₄) emitido é 25 vezes mais nocivo que o gás carbônico (CO₂). E a construção de aterros é contínua, a cada dez anos aumenta-se um aterro sanitário no mundo. No mundo inteiro ainda se utilizam os aterros como destinação dos resíduos. O panorama mundial de destinação dos RSU pode ser demonstrado conforme a Figura 1. Percebe-se que somando todos os tipos de aterros existentes resulta num total de 70% e os processos de compostagem, reciclagem e incineração somam 30% (ABREN, 2019).

Figura 1. Destinação de RSU no mundo. Adaptada de ABREN, 2019.



A Figura 2 ilustra o panorama da União Europeia de destinação de RSU. Em vários países existem leis que proíbem a construção de aterros. Nos locais onde ainda existem a tendência é diminuir (ABREN, 2019).

Figura 2. Panorama da União Europeia de destinação de RSU – EU28. Fonte: Adaptada de CEWEP, 2018.



Pesquisas foram realizadas nos últimos anos, tais como Lino e Ismail (2017, 2018), Lino (2014), Rada (2014), Jones (2010), Maize (2016), Fonseca (2017), Kuhl (2015), Paulo, Dalbosco & Leites (2013), Andrade (2019) e muitos outros publicaram a técnica do tratamento de RSU para a produção de energia e como mecanismo de inclusão social. Menezes (2000), Morgado & Ferreira (2017) realizaram estudos com a incineração como tratamento térmico dos RSU. Brietzke (2016) estudou a viabilidade da compostagem no tratamento dos RSU. Poli (2014) e Queiroz (2014) registraram pesquisas sobre o PCI dos RSU.

2 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.

Nos últimos anos tem-se utilizado amplamente o termo economia circular, alternativa à economia linear tradicional baseada na produção-utilização-disposição, cujo objetivo é diminuir o uso de novos recursos através da reutilização e valorização dos produtos e materiais em fim de vida, e evitar assim a geração de resíduos, poluição e emissão de gases de efeito estufa (ABREN, 2020).

Segundo Abren (2020) existem em todo o mundo mais de 2.430 plantas, mas o Brasil ainda não possui nenhuma URE, revelando que nosso País ainda se encontra muito aquém do desejável em matéria de gestão de RSU, destinando 96% para aterros e lixões, sendo que a grande maioria dos aterros não seria licenciado com os padrões internacionais. No entanto, diversas ações têm sido envidadas para que isso se torne realidade. O novo marco do saneamento traz a obrigatoriedade de licitação por meio de parcerias público-privadas (PPPs) e permite a cobrança de tarifa na conta de consumo, como a conta de água, por exemplo. O Ministério de Minas e Energia anunciou recentemente que irá realizar leilão regulado para contratação de energia elétrica proveniente de URE (ABREN, 2020).

Uma planta WTE nova produz, atualmente, uma média de 600 kWh de energia elétrica por tonelada de RSU, enquanto nos aterros com coletores de biogás produzem em média 65 kWh por tonelada, ou seja, uma usina WTE é quase dez vezes mais eficiente energeticamente, isso sem contar que a eletricidade gerada a partir de resíduos em ambiente de aterro é, nesse caso, extraída lentamente ao longo do tempo, enquanto na WTE a energia é gerada imediatamente (ABREN, 2019).

Assim, Waste-to-Energy (WTE) pode ser definida como a geração de energia elétrica a partir da biodigestão ou tratamento térmico de resíduos, sejam eles orgânicos ou inorgânicos, através do uso de diversas tecnologias existentes. A implementação dessas usinas WTE tem sido a solução encontrada em alguns países, para a destinação final dos RSU que não foram aproveitados no processo de reciclagem ou compostagem, ou seja, os RSU que seriam destinados aos aterros, sendo que estes, mesmo os sanitários, trazem riscos de contaminação irreversível ao meio ambiente. Países membros da União Europeia, os Estados Unidos, China, Índia, entre outros incluíram o WTE como priorização nos tratamentos desses resíduos que, além de obterem uma destinação sustentável, contribuem para a

geração de energia elétrica limpa, renovável e firme, atribuindo maior confiabilidade e estabilidade ao sistema elétrico. A quantidade de usinas WTE de tratamento térmico em operação na Europa chega a 522, não incluindo incineração de lixo perigoso (hospitalar, radioativo, etc.), a quantidade de lixo tratado termicamente em milhões de toneladas, o que representa o total de 522 usinas em operação e 263.314 ton/dia (toneladas por dia) processadas em 2016 (ABREN, 2019).

No Brasil não há nenhuma usina WTE em operação, apenas a usina de biodigestão da CS Bioenergia em Curitiba, algumas pequenas plantas de P&D, e algumas usinas de captação de gás de aterro. Todavia o país possui um potencial para gerar até 5,4% da demanda nacional por meio de usinas de tratamento térmico de RSU, com 106 unidades gerando 236.520 GWh/ano e uma potência instalada total de 3.176 MW. Há também o potencial de gerar 1,5% da demanda nacional por meio da biodigestão anaeróbica acelerada, com a capacidade instalada total de 868 MW, gerando 6.701 GWh/ano. No total, estima-se que os RSU podem gerar até 7% da demanda nacional. Estima-se que o país poderá receber o montante aproximado de 28 bilhões de reais em investimentos e, assim, resultar em geração de emprego e renda, sendo que, até 2031, sejam necessários R\$ 11,6 bilhões/ano em investimentos em infraestrutura para garantir a universalidade da gestão sustentável de resíduos sólidos no Brasil (ABREN, 2019).

3 TRATAMENTO TÉRMICO

O tratamento térmico é aquele em que os resíduos recebem determinada quantidade de calor por um determinado tempo, são chamados respectivamente de temperatura de reação e tempo de reação. O objetivo é a redução de volume com os processos físico-químicos. Atualmente em relação ao sistema de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos são aplicadas as diferentes técnicas: secagem, pirólise, gaseificação, tratamento com micro-ondas, plasma e incineração (LINO & ISMAIL. 2018). Em vários lugares do mundo são aplicadas combinação de duas ou mais técnicas, principalmente para obtenção de energia térmica e de energia elétrica.

A recuperação energética consiste nas tecnologias e processos industriais que permitem recuperar parte da energia contida nos RSU. Dentre os métodos existentes, os mais empregados utilizam a incineração por processo de combustão. A composição do RSU também influencia na eficiência do sistema de recuperação energética, a depender da localização e de como são gerados, especialmente sobre a composição, se possui mais ou menos resíduo orgânico, poder calorífico, umidade, etc.

3.1 INCINERAÇÃO

Uma usina de incineração de RSU opera com um princípio de funcionamento semelhante ao de uma usina térmica típica, com a principal diferença sendo a combustão de RSU, ou uma

combinação de RSU e outro combustível, servindo como fonte primária de calor para a caldeira. (ADNAN ET AL., 2021)

A incineração do lixo reduz o grande volume de lixo gerado e em consequência aumentando a vida útil do aterro. Essa técnica de tratamento dos resíduos ocorre com muita rapidez e possibilita a geração de energia (VG RESÍDUOS, 2020).

A incineração pode ser uma forma de tecnologia para solucionar essa problemática dos RSU, pois este tratamento reduz o volume dos resíduos em até 90% e o peso a uma faixa de 20 a 30%, destacando-se também os dois tipos de cinzas produzidas nesse processo, a saber: cinza sólida e cinza leve suspensa. A cinza leve em suspensão é tratada e removida dos gases de exaustão. A cinza sólida geralmente é inerte e normalmente reutilizada na fabricação de artefatos de concreto, material de construção, cerâmica, etc. (LINO & ISMAIL, 2018).

Primeiramente o RSU era queimado na câmara primária ($T = 500$ a 900 °C). Resíduos se transformam em gases e pequenas partículas. Com isso evita-se volatilização de metais. O segundo processo ocorre na câmara secundária: os gases e pequenas partículas formadas são queimados em temperaturas mais altas (750 a 1250 °C) até combustão completa. Geralmente o tempo é de 30 min na primeira fase e de três segundos na segunda. Após a incineração, a parte sólida é tirada da grelha. A quantidade deste material sólido após o processo de incineração varia de 12 a 30% em massa (de 4 a 10% em volume) do material original e tem o aspecto de cinza, sendo um material limpo, inerte e apto para aplicado à construção civil em fabricação de tijolos, calçadas, pavimentos, etc (MENEZES, GERLACH & MENEZES. 2000).

Morgado & Ferreira (2017) fizeram um levantamento sobre a possibilidade de existência de um incinerador com cogeração de energia existente na cidade de Goiânia. Lá a população era de 1.897.957 pessoas que geravam 1.583,50 t/dia de RSU dos quais 92,50% têm destinação final em aterro sanitário. Eles estimam que se fossem incinerados haveria redução de 90% em volume e em peso chegaria a 15%. Também seria possível gerar até 791,75 KWH, ou seja 289 MW ao ano.

Lino & Ismail (2018) registraram que os resíduos sólidos são um recurso de energia renovável, com capacidade de gerar energia na faixa dos 8 a 11 MJ / kg, enquanto o Combustível Derivado de Resíduos (CDR) composto de RSU seco tem um valor calorífico variando de 12 a 17 MJ / kg. Com isso eles concluíram que uma tonelada de RSU e um barril de petróleo ambos liberam quase a mesma quantidade de calor, cerca de 7 GJ.

Um dos países que fabrica e utiliza incineradores para tratamento de resíduos sólidos é o Japão. O país incinera cerca de 80% dos RSU em cerca de 1172 incineradores, onde 24,5% deles têm recuperação de energia, atingindo 1770 MW. Em média, a taxa de conversão de energia desses incineradores é de cerca de 200 kWh/t de RSU. Em Tóquio, a taxa de conversão de eletricidade é de cerca de 390 kWh / t de RSU, em Osaka, 320 kWh / t de RSU, enquanto Kobe tem uma taxa de

produção de cerca de 300 kWh / t de RSU. Neste a incineração abastece 16,2% da demanda de eletricidade e 25% da demanda de água quente. Cingapura tem quatro usinas de incineração para lidar com uma carga de 1700 t /dia. O RSU tratado é proveniente de residências e da indústria com menor valor calorífico (PCI) em torno de 6 MJ / kg. Cada caldeira gera 42 t / h de vapor e gera 30 MW (LINO & ISMAIL, 2018).

3.2 PIRÓLISE

Pirólise é uma forma de tratamento termoquímico de material orgânico desenvolvido totalmente sem a presença de oxigênio, com a possibilidade da oxidação de pequena fração de resíduo em função da presença de algum oxigênio contido no reator. Essa tecnologia é utilizada para destruir os componentes orgânicos voláteis, combustíveis e pesticidas no solo. Trata-se de tecnologia antiga, mas para tratamento térmico de biomassa e de RSU é uma técnica inovadora. Os produtos resultantes da pirólise podem estar nos estados líquido, sólido ou gasoso, dependendo da composição do resíduo e dos parâmetros como temperatura, pressão e tempo de queima. Durante o processamento, o material orgânico é transformado em gás de síntese ou singás (mistura de gases inflamáveis tais como CO, H₂, CH₄) e outros compostos orgânicos voláteis (COV) com poder calorífico variando entre 10 e 20 MJ/Nm³. Uma parte desses voláteis pode ser condensada, produzindo óleo, cera e alcatrão, coletados na fase do resfriamento do singás e usado como combustível líquido. O resíduo remanescente é um tipo de cinza e carvão. Cada tonelada de resíduo sólido contém 11 kg de sulfato de amônia, 12 litros de alcatrão, 9,5 litros de óleo, entre outros (LINO, 2014). Pode-se também fazer a destilação da fração gasosa para se obter diversos hidrocarbonetos (gasolina, querosene e diesel) ou queimados em caldeiras ou para gerar energia elétrica, ou, ainda, oxidados parcialmente para se obter gás de síntese como ocorre na gaseificação (ABREN, 2019).

O problema é que o singás gerado precisa ser purificado, por exemplo, por meio de um processo de lavagem, só então, sem contaminantes, esse gás pode ser utilizado, tanto para geração elétrica quanto para geração térmica, em grupos geradores a gás, ou ainda usá-lo em processos térmicos para gerar calor (vapor, água quente, ar quente. Para que ocorra o processo da pirólise é necessário energia de fonte externa, o que muitos consideram inviável e não tem sido aplicado em escala industrial para o processamento de RSU (ABREN, 2019). A operação dessa tecnologia ocorre em temperaturas que variam de 300°C a 1600°C. Sendo assim, observa-se que qualquer processo térmico a temperaturas superiores a 300°C e na ausência de oxigênio são considerados métodos de pirólise. A vantagem é que a pirólise se mostrou uma tecnologia viável energética, econômica, social e ambientalmente, sendo um

sistema de alta sustentabilidade, devido energia gerada de 500 kWh/t de RSU, e baixos níveis de emissões atmosféricas. (KÜHL, et al. 2015).

3.3 GASEIFICAÇÃO

Gaseificação é o processo de conversão do material orgânico em gás combustível na presença de ar em quantidade controlada e alta temperatura. Também resulta em gás singás e possui características combustíveis. É uma tecnologia de conversão térmica endotérmica para extração de energia de diferentes tipos de materiais orgânicos (LINO, 2014). O princípio deste processo de conversão energética é baseado na utilização de uma matéria prima, chamada de biomassa pré-tratada, isto é, com um teor de umidade baixo, convertendo-a em gás, por meio das reações de gaseificação, de forma conseguinte este gás é resfriado e purificado (KÜHL, et al. 2015).

De uma forma geral, nos dois processos, gaseificação como na pirólise, os RSU sofrem um pré-tratamento, de forma a criar uma massa mais homogênea e seca. Na sequência são submetidos a tratamento térmico em altas temperaturas e ambiente pobre de oxigênio, situação em que os gases gerados no processo de combustão também precisam de sistemas de controle ambiental para eliminação dos poluentes. Em termos energéticos, a gaseificação possui um menor aproveitamento energético líquido (ABREN, 2019).

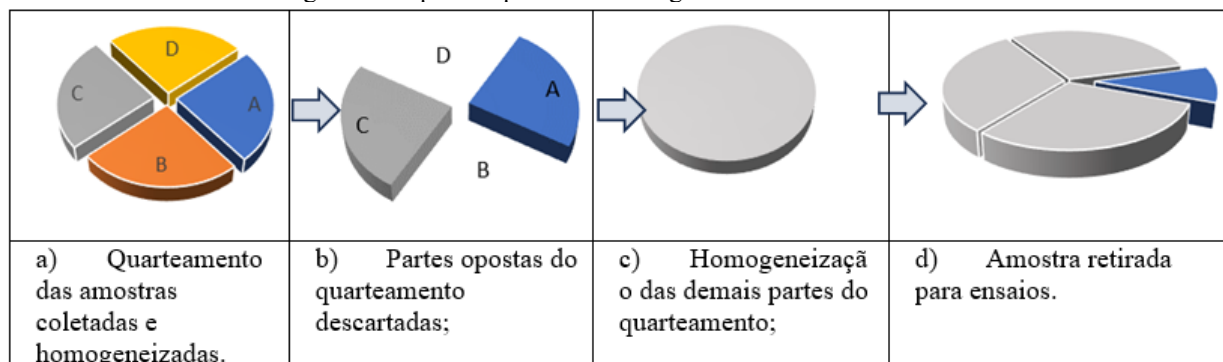
Vários processos de gaseificação para tratamento térmico de resíduo sólido estão sendo desenvolvidos como alternativa à incineração. O maior desafio dessa tecnologia consiste em obter eficiência aceitável devido ao alto consumo de energia no pré-processamento de resíduo, consumo de grandes quantidades de oxigênio puro e limpeza do singás. Esses são os fatores que afetam a eficiência da conversão de singás para energia elétrica. Vários processos de gaseificação de RSU têm sido propostos, mas muito pouco tem sido construído e testado (LINO, 2014).

4 METODOLOGIA

4.1 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RSU

Foram coletados RSU de 18 bairros da cidade para realização da gravimetria. As atividades desenvolvidas são realizadas em três etapas: quarteamento, identificação e pesagem das categorias de cada um tipo de resíduo. É regulamentada pela ABNT - NBR 10.007/2004. O quarteamento é explicado na figura 3.

Figura 3. Etapas do quarteramento segundo a NBR 10.007/2004.



De posse desses dados foram determinados os percentuais de cada tipo de material existente, conforme a Equação 1, através da divisão percentual da massa de cada material pela massa total da amostra, bem como o cálculo do peso específico aparente - divisão direta da massa total pelo volume total. Após a pesagem total da amostra, foi realizada a triagem dos resíduos sobre a lona plástica da seguinte maneira: Papel/papelão, madeira, metais, vidros, plástico duro (PEAD), plástico mole (PEBD), plástico tipo PET, plástico tipo PP, isopor, rejeitos e material orgânico. Novamente cada tipo de material foi devidamente pesado, separadamente, para obter-se a representatividade em peso de cada um. Foram, então, determinados os percentuais de cada tipo de material existente naquela amostra de 1000 litros, conforme a Equação 1.

Equação 1. Permite calcular o percentual de cada tipo de material após a triagem.

$$\text{Percentual de cada categoria (\%)} = 100 * \frac{\text{peso de cada fração (kg)}}{(\text{peso total da amostra (Kg)})} \quad (1)$$

Onde:

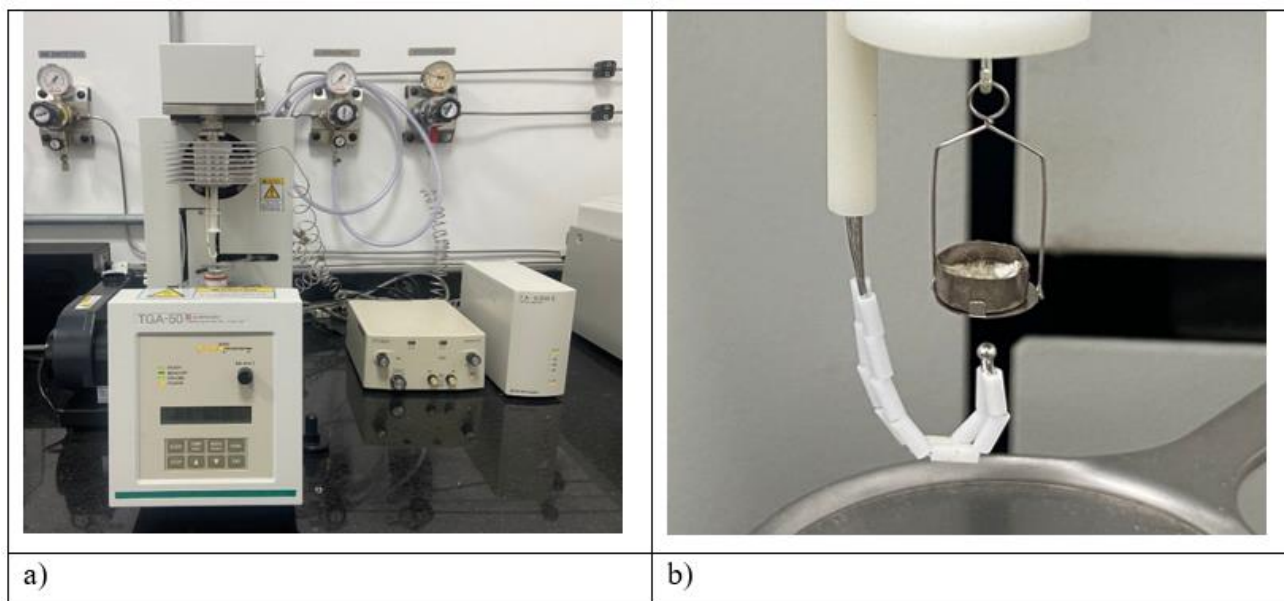
Percentual de cada categoria = percentual de cada classe/tipo de resíduo presente na amostra;

Peso de cada fração = peso de cada classe/tipo de resíduo após a triagem.

4.2 ANÁLISE TÉRMICA TGA / DTG

O comportamento térmico do RSU foi avaliado através de Análise de Termogravimetria (TGA) e Derivada de Termogravimetria (DTG). As análises foram realizadas no Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais, do Instituto Federal do Amazonas (LSCN /IFAM), com auxílio do equipamento de Analisador de termogravimetria da marca Shimadzu, modelo TGA-50, mostrado na Figura 4. Para a realização das análises foram depositadas 1,0 mg em cadinho de platina, sem tampa. Esse porta amostra foi inserido no equipamento que por sua vez operou a uma taxa de aquecimento de 10 °C por minuto, até atingir a temperatura de 1000 °C, com fluxo de gás nitrogênio de 50 mililitros por minuto.

Figura 4. Análise térmica: (a) Equipamento de termogravimetria; (b) amostra no porta amostra de platina.



4.3 ANÁLISE IMEDIATA: UMIDADE, CINZA, MATERIAL VOLÁTIL E CARBONO FIXO.

Os valores de umidade, material volátil e carbono fixo, determinado pelo aquecimento em mufla a $950 \pm 10^\circ\text{C}$ para as amostras coletadas no período de verão e no período de inverno amazônico e foram realizados ensaios em duplicatas. A umidade corresponde a quantidade de água presente na amostra, o material volátil é aquela substância que se evapora mais facilmente e as cinzas correspondem à fração inorgânica da amostra de RSU, agregando na sua constituição os elementos químicos que são inertes as reações de combustão, entre eles estão fósforo, potássio e o cálcio. A quantidade de carbono que não volatiliza recebe o nome de carbono fixo.

4.4 ANÁLISE ELEMENTAR: CARBONO, HIDROGÊNIO E NITROGÊNIO.

A Análise Elementar CHN trata-se de uma técnica para determinação das porcentagens de Carbono (C), Hidrogênio (H) e Nitrogênio (N) em uma amostra, sendo realizada geralmente para materiais orgânicos. Seu funcionamento é baseado no método de Pregl-Dumas, em que as amostras são sujeitas à combustão em uma atmosfera de oxigênio puro, e os gases resultantes dessa combustão são quantificados em um detector TCD (detector de condutividade térmica). Suas principais aplicações envolvem o estudo de amostras líquidas e sólidas, resultantes de sínteses orgânicas e formação de complexos, síntese de polímeros, amostras geológicas, ambientais e derivados de petróleo, entre outras. São indispensáveis no cálculo do poder calorífico inferior de uma amostra.

4.5 PODER CALORÍFICO - PC

O estudo do poder calorífico dos RSU permite a análise da viabilidade da utilização desse material como fonte de energia, que servirá de argumento forte para uma possível tomada de decisão

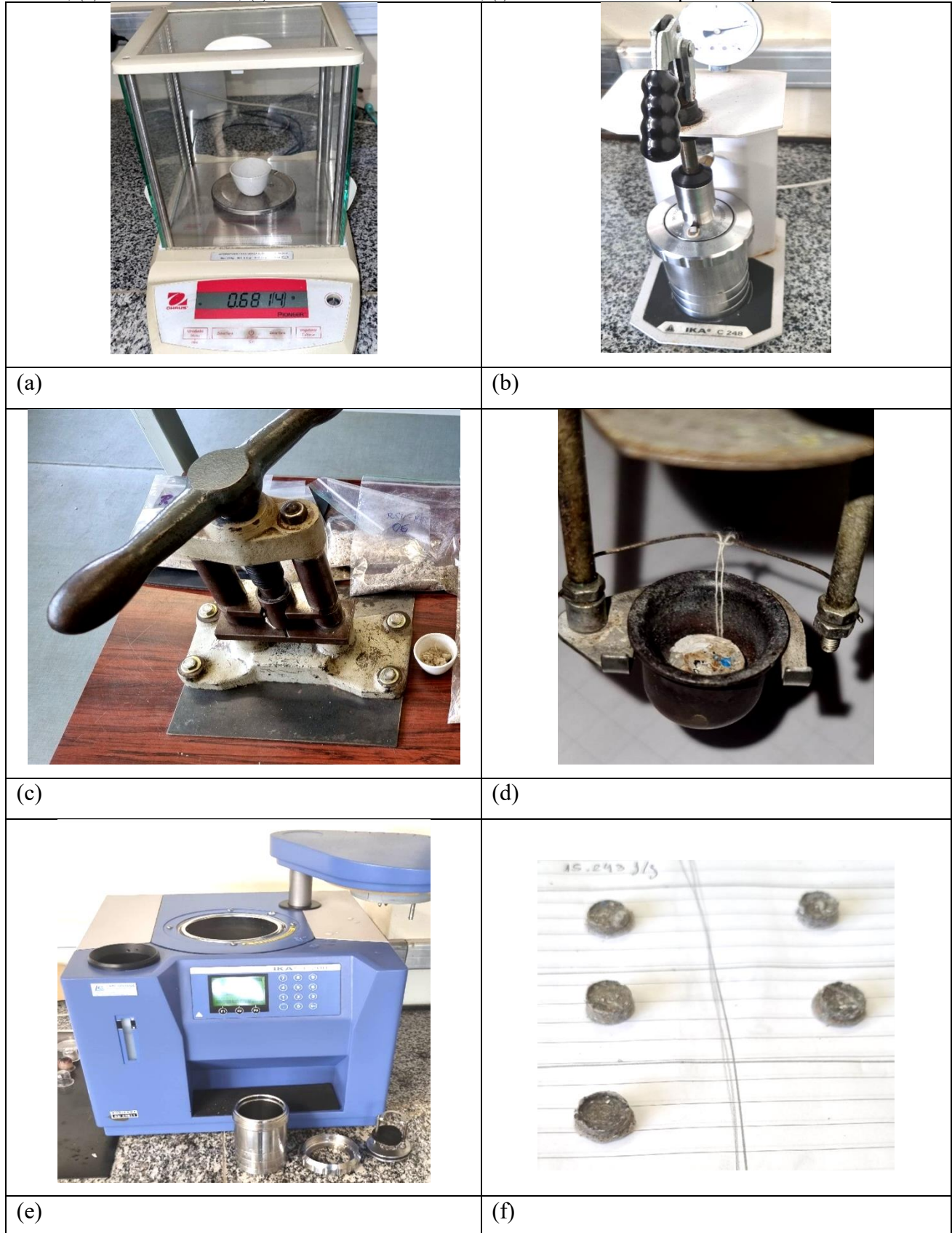
das autoridades para desenvolvimento de projetos e execução de uma ou mais plantas de transformação de RSU em energia, o que resultará na diminuição de aterros e lixões, e acarretará nos variados benefícios gerados por uma matriz energética (QUEIROZ, 2014).

4.5.1 Poder Calorífico Superior - PCS

O equipamento que mede o poder calorífico superior de uma amostra é a bomba calorimétrica. Ela é capaz de medir a quantidade de calor liberada ou absorvida em uma reação química ou física. Ela é composta basicamente por uma câmara de combustão, isolada por água fria, local em que ocorre a reação do oxigênio em alta pressão com a amostra a ser analisada. A combustão começa com o aquecimento da amostra por meio de uma corrente elétrica que queima o fio de ignição em contato com o condutor de corrente elétrica e a amostra no cadinho metálico.

A amostra do resíduo prensada na forma de comprimido ou pastilha é colocada em um cadinho metálico montado dentro de um vaso de pressão, com volume de 350 ml, dotada de um dispositivo de ignição através de corrente elétrica. A massa da amostra é aproximadamente 1,0 g. Após a colocação da amostra, a bomba é hermeticamente fechada e pressurizada com Oxigênio puro a cerca de 30 bar, conforme detalhado na Figura 5.

Figura 5. Determinação do PCS: (a) Balança analítica; (b) recipiente de decomposição ou vaso de pressão; (c) prensa da amostra; (d) cadinho metálico; (e) Calorímetro de combustão; (f) amostra na forma de pastilhas prensadas.



Logo em seguida o vaso de pressão é cuidadosamente colocado no interior do equipamento, que é preenchido por água e que possui em agitador para que ocorra a homogeneização da temperatura

do conjunto e um termômetro que mede a variação de temperatura durante todo o processo. No início procura-se equilibrar a temperatura do conjunto entre 20°C e 23°C. Configura-se o calorímetro digitando a massa da amostra. A seguir um pulso elétrico é emitido ao fio de ignição que provoca a combustão da amostra, elevando a temperatura do sistema. O termômetro de alta precisão do equipamento mede a variação de temperatura, cuja precisão é de +/- 0,0001 K (Kelvin) e são registradas minuto a minuto. No final de 15 minutos ou 16 minutos é registrado também o ganho de poder calorífico superior da amostra, em j/g. Isso só é conseguido devido às calibrações prévias realizadas automaticamente pelo equipamento e das diversas correções devido às massas de água, do calorímetro, energia de ignição, etc, assim com o ganho de energia em todo o processo em relação à massa da amostra medida e digitada na fase inicial, em balança analítica com precisão de 0,0001 g, tem como resultado o Poder Calorífico Superior.

Após secagem em mufla a 105 °C determinou-se a umidade de cada amostra e foi possível determinar o valor dos PCS seco conforme a Eq. 2:

Equação 2. Permite calcular o poder calorífico superior de cada amostra no estado seco.

$$PCS_{seco} = \frac{PCS_w}{1-w} \quad (3)$$

Onde:

PCS_{seco} : Poder calorífico da amostra totalmente seca (Joules/Kg);

PCS_w : Poder calorífico superior dos RSU, na condição de umidade “w” (Joules/Kg);

w : Teor de umidade por ocasião do ensaio em laboratório (% em massa).

Segundo Poli, et al (2014) a maioria dos combustíveis apresenta hidrogênio em sua composição, o qual, durante a combustão, reage com o oxigênio, gerando uma quantidade adicional de água. Se esse hidrogênio gera água, então deve ser considerado em uma relação mais precisa entre PCI e PCS. Considerando que todo o Hidrogênio se converta em água e que cada grama de Hidrogênio no combustível gera estequiometricamente 9,0 g de água, a relação é a descrita na Eq. 3:

Equação 3. Permite calcular o poder calorífico inferior de cada amostra de RSU.

$$PCI_w = (1 - w) * PCS_{seco} - [(1 - w) * 9 * H + w] * 2449,38 \quad (4)$$

Onde:

PCI_w : Poder calorífico inferior dos RSU, por ocasião da umidade w (joules/Kg);

PCS_{seco} : Poder calorífico da amostra totalmente seca (Joules/Kg);

w : Teor de umidade por ocasião do ensaio em laboratório (% em massa).

H : Teor de hidrogênio, em base seca (% em massa, expressa entre 0 e 1);

2449,38: Entalpia de vaporização da água a 22°C (joules/Kg).

5 RESULTADOS

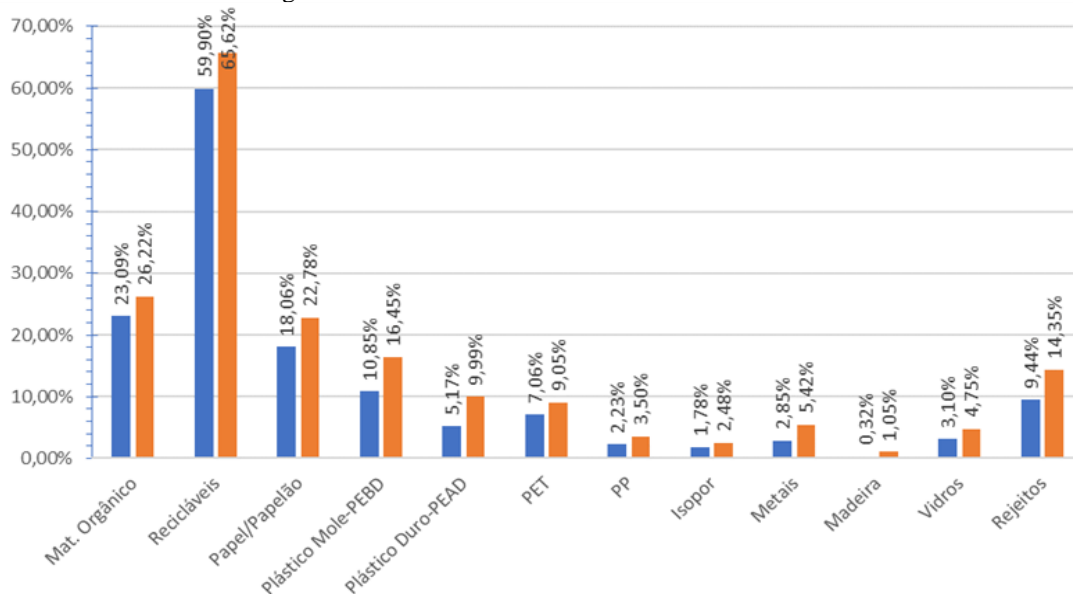
5.1 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RSU

Foram realizadas amostragens detalhadas do perfil gravimétrico dos resíduos sólidos urbanos de cada um dos bairros trabalhados. Foram calculados média e o desvio padrão amostral. Os resultados indicaram uma variação parcial em determinados materiais se comparados a média nacional. O perfil dos resíduos se difere por apresentar maior quantidade de materiais recicláveis tais como papel, papelão e plásticos, em relação à média nacional, enquanto os resíduos orgânicos mostram-se em percentual superior. Isso se deve pela separação realizada nesse trabalho entre rejeito e material orgânico cuja destinação pode ser facilmente a biodigestão ou compostagem, conforme resumo descrito na Tabela 1 e resumidos na Figura 6.

Tabela 1. Frações percentuais por área administrativa e média ponderada de cada material componentes dos RSU.

COMPONENTES	FRAÇÃO PERCENTUAL						MÉDIA	MÉDIA PONDERADA
	NORTE	SUL	LESTE	OESTE	CENTRO-SUL	CENTRO-OESTE		
Mat. Orgânico	23,25%	24,5%	24,3%	28,1%	25,3%	24,3%	24,96%	24,66%
Recicláveis totais	64,24%	58,47%	65,81%	58,61%	62,55%	64,15%	62,31%	62,76%
Papel/Papelão	20,92%	20,7%	18,6%	18,3%	23,4%	24,5%	21,04%	20,42%
Plástico Mole:PEBD	10,61%	14,3%	18,5%	13,5%	11,0%	11,1%	13,16%	13,65%
Plástico Duro:PEAD	10,60%	3,7%	5,3%	7,9%	9,3%	9,2%	7,69%	7,58%
PET	9,70%	6,9%	7,7%	6,8%	8,3%	7,8%	7,86%	8,05%
PP	2,00%	2,7%	3,3%	3,1%	3,3%	4,0%	3,06%	2,87%
Isopor	2,44%	2,1%	2,4%	1,5%	1,7%	2,0%	2,02%	2,13%
Metais	4,36%	3,1%	6,1%	3,1%	3,1%	2,5%	3,69%	4,14%
Madeira	1,20%	0,0%	0,6%	0,5%	0,8%	0,8%	0,64%	0,69%
Vidros	3,60%	5,0%	4,0%	4,4%	2,6%	3,1%	3,79%	3,92%
Rejeitos	11,31%	17,1%	9,3%	12,8%	11,4%	10,8%	12,10%	11,90%
TOTAL	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Fator ponderação	0,2799	0,1600	0,2502	0,1417	0,0853	0,0829	-	-

Figura 6. Gravimetria final da cidade de Manaus -AM.



Na pesquisa ficou evidenciado que a maior representatividade dos resíduos recicláveis (59% a 65%) e a pequena redução proporcional dos orgânicos (23% a 26%) e de rejeitos (10% a 14%), enquanto a média nacional esses valores são de 28%, 50% e de 22% respectivamente, possivelmente são consequências do uso excessivo de embalagens, devido à quantidade de pessoas que passam a residir nas proximidades do Polo Industrial de Manaus e da área comercial e de serviços existentes na área urbana da cidade. Na análise de campo foram constatados que, ao menos 50% desse material plástico são oriundos de embalagens recicláveis (ou com facilidade de encontrar valor comercial no mercado), evidenciando a possibilidade de coleta seletiva se uma usina de triagem for instalada antes dos resíduos serem aterrados. Tais características possivelmente devem ser em consequência do aumento crescente do uso de embalagens, evidenciando a necessidade de políticas públicas locais de responsabilidade pós-consumo, análise de ciclo de vida do produto e comercialização prioritária de produtos com embalagens sustentáveis.

Uma das consequências da presença em percentual alto de embalagens e materiais recicláveis é o valor médio de peso específico aparente, 73,68 Kg/m³, aproximadamente um terço da média nacional, confirmando a grande quantidade de materiais leves e contendo ar em seu interior, como embalagens e possibilitando um grau de compactação elevado ao se dimensionar a rota e a quantidade de caminhões coletores compactadores de resíduos.

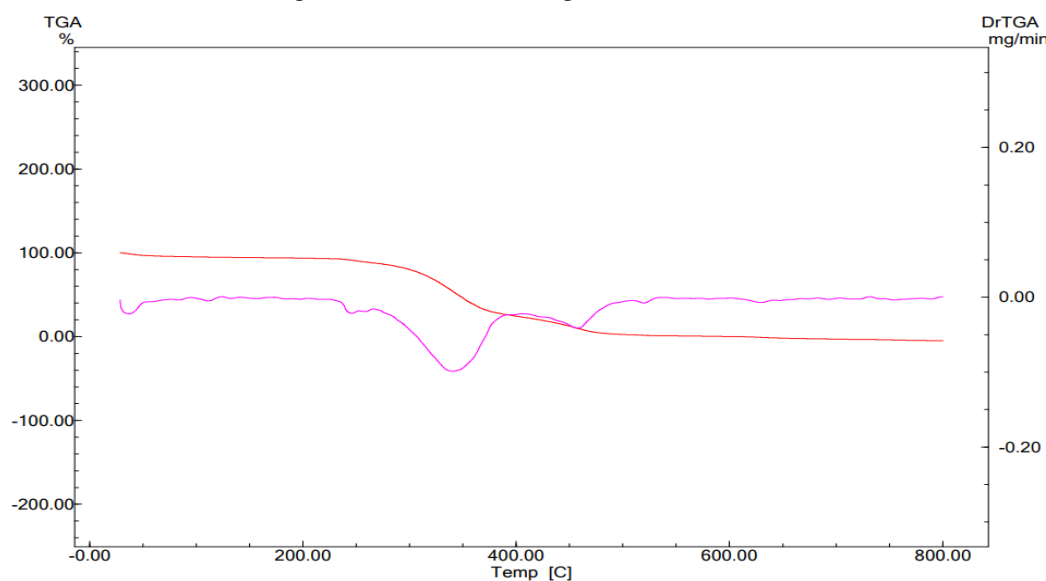
Os estudos realizados nesses bairros foram fundamentais para a coleta de dados iniciais e atualizados, que possibilitaram a caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos da cidade de Manaus, estado do Amazonas, e irão possibilitar outros estudos. Por enquanto constatou-se uma grande quantidade de material com capacidade de serem reciclados (62% + 2%), apesar das campanhas publicitárias do poder público, com peso específico aparente baixo, confirmando pouca matéria

orgânica e muito material leve e passível de reciclagem, levando ao pensamento de instalação de uma usina de triagem como alternativa para a diminuição dos resíduos destinados ao aterro da cidade, aumentando a vida útil desse e o reaproveitamento dos materiais recicláveis, trazendo benefícios econômicos, sociais e ambientais à cidade e seus habitantes.

5.2 ANÁLISE TÉRMICA TGA / DTG

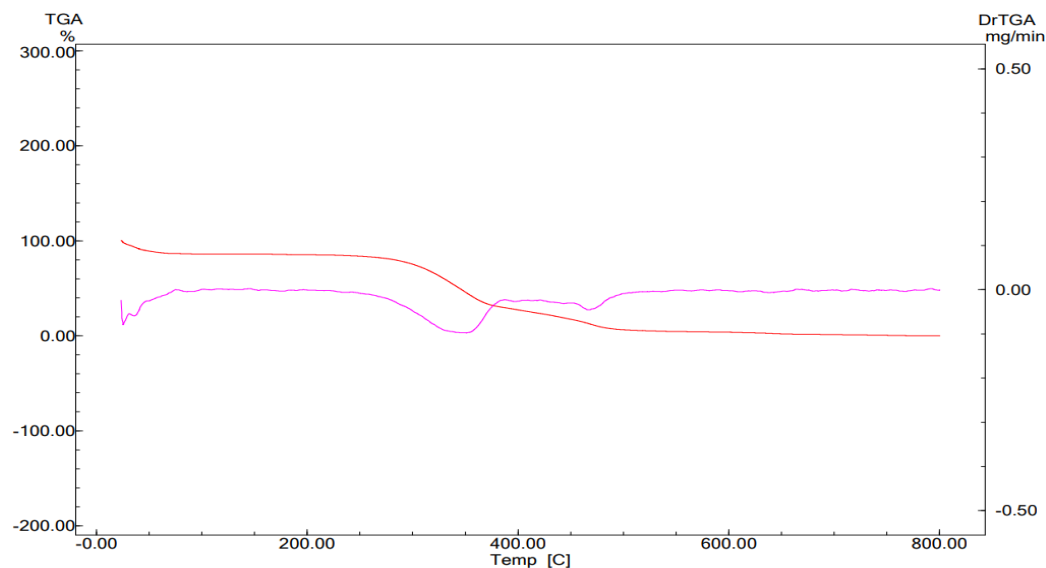
Para verificar o comportamento térmico da amostra do RSU, foram realizadas as análises de Termogravimetria (TGA) e Derivada de Termogravimetria (DTG). Três dessas curvas da TGA são apresentadas nas Figuras 7, 8 e 9.

Figura 7. Análise de Termogravimetria do RSU.



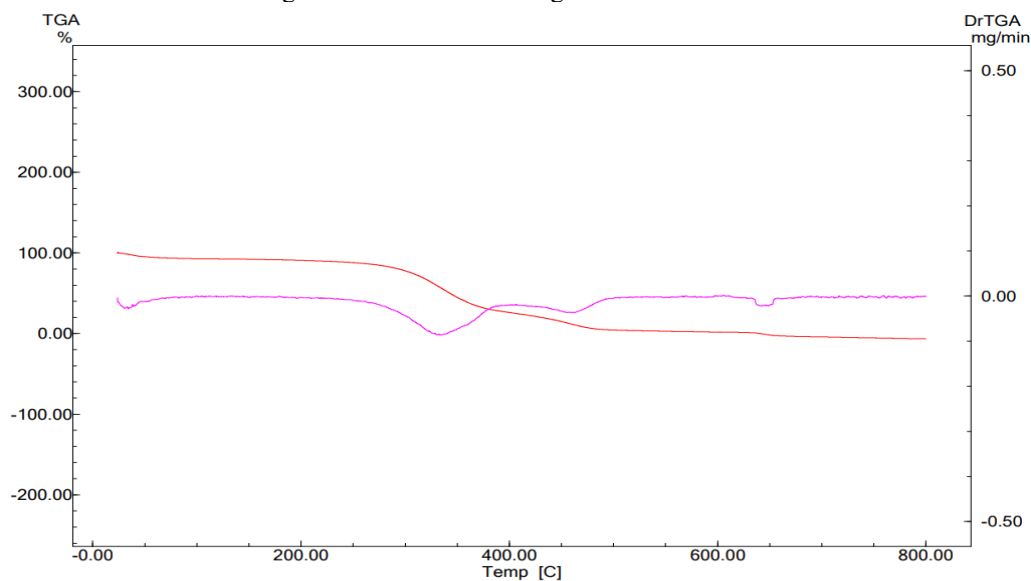
Fonte: Autor.

Figura 8. Análise de Termogravimetria do RSU.



Fonte: Autor.

Figura 9. Análise de Termogravimetria do RSU.



Fonte: Autor.

Verifica-se que as amostras de RSU submetidas aos ensaios se mantem constante até aproximadamente 250 °C, onde iniciou seu processo de deterioração que foi até aproximadamente 500 °C e a partir desse ponto ocorre a degradação das cadeias poliméricas ou processo de ruptura de ligações primárias devido a energia térmica, onde praticamente todo o material já foi consumido.

5.3 ANÁLISE IMEDIATA: UMIDADE, CINZA, MATERIAL VOLÁTIL E CARBONO FIXO.

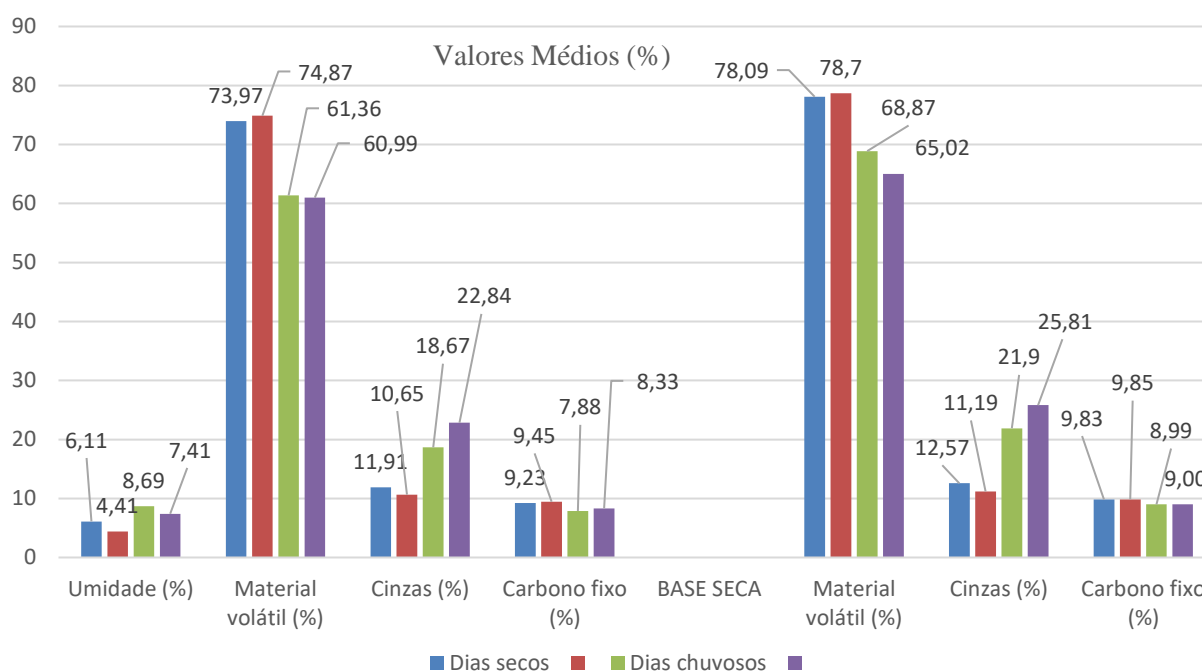
Os valores de umidade, material volátil e carbono fixo podem ser visualizados na Tabela 2 para as amostras coletadas no período de verão e na Tabela 3 para as amostras coletadas no período de inverno amazônico e foram realizados ensaios em duplicatas. A Figura 10 expõe os valores médios dessas propriedades.

Tabela 2. Análise imediata dos RSU das regiões administrativas em dias secos

Experimento 1							
Dias Secos	ZONA	NORTE	SUL	LESTE	OESTE	CENTRO SUL	CENTRO OESTE
BASE ÚMIDA							
Umidade (%)	w	6,03	6,18	6,23	4,39	5,92	8,12
Material volátil (%)	v	76,31	72,65	71,73	75,29	77,76	55,90
Cinzas (%)	c	8,36	11,07	12,78	12,75	7,12	29,31
Carbono fixo (%)	FC	9,30	10,09	9,26	7,57	9,20	6,67
Total		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
BASE SECA							
Material volátil (%)	vs	81,21	77,44	76,50	78,75	82,65	60,84
	cs	9,90	10,75	9,87	7,92	9,78	7,26
Carbono fixo (%)	FCs	8,89	11,80	13,63	13,33	7,57	31,90
Total		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Experimento 2							
Dias secos	ZONA	NORTE	SUL	LESTE	OESTE	CENTRO SUL	CENTRO OESTE
BASE ÚMIDA							
Umidade (%)	w	4,17	3,78	5,55	3,98	4,66	6,61
Material volátil (%)	v	75,49	62,82	74,26	76,46	78,64	58,45
Cinzas (%)	c	10,91	23,72	10,39	10,10	8,05	27,64
Carbono fixo (%)	FC	9,44	9,68	9,80	9,46	8,65	7,30
Total		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
BASE SECA							
Material volátil (%)	vs	78,77	65,29	78,63	79,63	82,48	62,59
Carbono fixo (%)	FC	9,85	10,06	10,37	9,86	9,08	7,81
Cinzas (%)	cs	11,38	24,65	11,00	10,52	8,44	29,60
Total		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Experimento 1							
Dias Chuvosos	ZONA	NORTE	SUL	LESTE	OESTE	CENTRO SUL	CENTRO OESTE
BASE ÚMIDA							
Umidade (%)	w	6,54	10,97	18,13	8,84	7,72	8,54
Material volátil (%)	v	60,13	62,50	55,29	65,58	69,99	60,21
Cinzas (%)	c	25,02	18,44	18,90	17,01	15,19	24,07
Carbono fixo (%)	FC	8,30	8,09	7,68	8,58	7,10	7,18
Total		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
BASE SECA							
Material volátil (%)	vs	64,34	70,20	67,54	71,93	75,85	65,83
Carbono fixo (%)	FC	8,88	9,09	9,38	9,41	7,69	7,85
Cinzas (%)	cs	26,78	20,71	23,08	18,66	16,46	26,32
Total		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Experimento 2							
Dias chuvosos	ZONA	NORTE	SUL	LESTE	OESTE	CENTRO SUL	CENTRO OESTE
BASE ÚMIDA							
Umidade (%)	w	4,93%	7,56%	15,47%	7,39%	5,48%	7,43%
Voláteis (%)	v	61,26%	57,96%	53,70%	67,90%	70,61%	60,73%

Cinzas (%)	c	25,13%	27,56%	22,23%	16,45%	17,85%	23,45%
Carbono Fixo (%)	FC	8,68%	6,92%	8,61%	8,26%	6,06%	8,40%
Total		100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
BASE SECA							
Voláteis (%)	vs	64,43%	62,70%	63,52%	73,32%	74,70%	65,60%
Cinzas (%)	cs	26,43%	29,81%	26,29%	17,77%	18,89%	25,33%
Carbono Fixo (%)	FCs	9,13%	7,49%	10,19%	8,92%	6,41%	9,07%
Total		100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Figura 10. Média dos valores obtidos na análise imediata nos dias secos e dias chuvosos



Os menores teores de umidade e cinzas das amostras de RSU se concentram naquelas coletadas nos dias secos enquanto os teores de materiais voláteis estão naquelas amostras coletadas em dias secos um indicativo que os RSU nos dias secos apresentam características vantajosas para a produção de energia térmica em relação àquelas dos dias chuvosos. As amostras apresentam teores de carbono fixo similares, tendo uma tendência a serem um pouco maiores nos dias secos. Entretanto, a relação carbono fixo/materiais voláteis foi maior para os materiais coletados nos dias chuvosos, possivelmente devido aos teores de materiais voláteis serem menores nos dias chuvosos.

De acordo com Pereira (2014) quanto menor o teor de umidade, menor será a quantidade de energia gasta no processo de carbonização do material e maior o poder calorífico do material. Algumas biomassas como casca de arroz, bagaço de cana e farelo de soja apresentam 64,10%, 80,42% e 80,00% de materiais voláteis, respectivamente, que se comparadas com as amostras de RSU analisadas tornam possível sua classificação como alternativas para utilização energética baseadas nas médias

encontradas, principalmente nos dias secos que apresentam menor quantidade de substâncias a serem liberadas como gases durante o processo de carbonização, e portanto, apresenta teor de cinzas menor que os RSU dos dias chuvosos. Os materiais voláteis e carbono fixo tiveram seus valores bastante aproximados, com sua relação FC/Voláteis serem bem próximas, indicando uma boa capacidade de ambos os tipos de materiais serem destinados a processos de combustão. Sendo assim, os materiais coletados em dias secos apresentam maior proporção de minerais na sua composição com maior facilidade de incendiar e queimar, mas que para o material coletado em dias chuvosos, num possível trabalho de triagem em esteiras e com consequente diminuição da umidade também se torna de boa combustão e assim como o primeiro uma possível fonte de aproveitamento energético.

5.4 ANÁLISE ELEMENTAR: CARBONO, HIDROGÊNIO E NITROGÊNIO.

As análises elementares das amostras foram realizadas em duplicatas na Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de São Paulo (IQ-USP), utilizando o equipamento Analisador elementar - Perkin Elmer 2400 series II. A Tabela 4 mostra os resultados obtidos. Esses valores serão utilizados junto com os obtidos pelo ensaio de poder calorífico superior na metodologia para determinar o valor do poder calorífico inferior de cada uma das amostras.

Tabela 4. Análise elementar CHN das amostras de RSU de Manaus. Valores médios

MÉDIA	SECAS	ZONA	H (%)	C (%)	N (%)
	1	OESTE	6,405	43,31	0,35
	3	SUL	6,035	41,79	0,235
	6	NORTE	4,475	35,04	1,34
	CHUVOSAS				
	1	NORTE	6,135	38,78	1,685
	2	LESTE	5,745	38,33	1,825
	3	C-OESTE	5,645	39,62	1,245

5.5 PODER CALORÍFICO – PC

A Tabela 5 mostra alguns valores de PCI, em joules e em calorias por quilograma de material.

Tabela 5. Poder calorífico de alguns combustíveis. Fonte: ANDRADE. 2019.

COMBUSTÍVEL	PCS (KJ/Kg)	PCI (Kcal/Kg)
Parafina	39.000	9.321
Óleo combustível	35.000	8.365
Carvão vegetal	31.000	7.409
Carvão de resíduos agrícolas	26.000	6.214
Cascas de coco	17.000	4.063
Lenha seca em estufa	17.000	4.063
Linhita	17.000	4.063
Carvão mineral	15.000	3.585
Biomassa 50% umidade	8.326	1.990
Biomassa 10% umidade	17.029	4.070

5.5.1 Poder Calorífico Superior - PCS

As análises de poder calorífico foram realizadas no Laboratório de Térmica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), com auxílio do equipamento Bomba Calorimétrica IKA C-200, que realiza análises de valores caloríficos brutos de amostras líquidas e sólidas. Para a realização das análises de cada amostra deve ser pesada entre 0,5 a 0,7g em um cadinho de porcelana, sem tampa. A balança analítica utilizada foi PIONEER OHAUS.

As análises de poder calorífico superior realizadas no Laboratório de Térmica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), com auxílio do equipamento Bomba Calorimétrica IKA C-200, tiveram como resultados os valores descritos na Tabela 6 para dias chuvosos e na Tabela 7 para as amostras coletadas nas zonas administrativas de Manaus nos dias secos.

Tabela 6. Determinação dos PCS dos RSU das regiões administrativas em dias chuvosos.

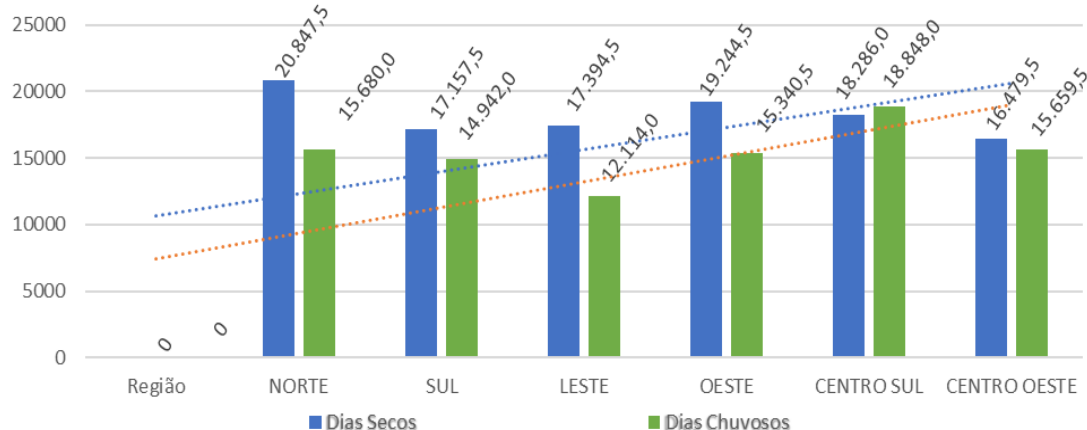
Amostra	PCS-1	PCS-2	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
RSU-M07	15.243,0	15.438,0	15.340,5	2001,95	13.339	17.342
RSU-M08	15.147,0	14.737,0	14.942,0		12.940	16.944
RSU-M09	15.690,0	15.670,0	15.680,0		13.678	17.682
RSU-M10	11.994,0	12.234,0	12.114,0		10.112	14.116
RSU-M11	17.885,0	19.811,0	18.848,0		16.846	20.850
RSU-M12	15.543,0	15.776,0	15.659,5		13.658	17.661

Tabela 7. Determinação dos PCS dos RSU das regiões administrativas em dias secos

Amostra	PCS-1	PCS-2	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
RSU-M01	20.086,0	21.609,0	20.847,5	1547,66	19.300	22.395
RSU-M02	16.925,0	17.390,0	17.157,5		15.610	18.705
RSU-M03	16.955,0	17.834,0	17.394,5		15.847	18.942
RSU-M04	18.672,0	19.817,0	19.244,5		17.697	20.792
RSU-M05	17.685,0	18.887,0	18.286,0		16.738	19.834
RSU-M06	16.236,0	16.723,0	16.479,5		14.932	18.027

Na Figura 11 pode ser visualizado os valores médios dos PCS das amostras de RSU das seis zonas nos dias de verão e de inverno da cidade. Possivelmente devido a umidade aumentada naturalmente devido a exposição dos resíduos às chuvas ocorridas nos dias chuvosos os valores naturalmente serão menores que nos dias secos, com exceção da zona centro-sul onde provavelmente no dia da coleta não houve chuvas, tornando o valor médio parecido com o valor médio resultante dos dias secos.

Figura 11. PCS médios dos RSU de Manaus-AM em dias secos e dias chuvosos



5.5.2 Poder Calorífico Superior Seco - PCSseco

No item anterior a amostra encontrava-se em equilíbrio térmico com o ambiente e exposto à umidade do local e não foram considerados a quantidade de água adicional formada pelo hidrogênio do combustível, bem como a água existente na umidade relativa do ar de combustão. Nesse caso foi necessário a obtenção dos valores do PCS seco, em joules/Kg, utilizando a equação 2 e sendo obtidos os valores da Tabela 8:

Tabela 8. PCS seco das amostras de RSU de Manaus em dias secos e chuvosos

REGIÃO ADMINISTR.	Secos		Chuvosos		secos	chuv	Secos		Chuvosos	
Região	PCS-1	PCS-2	PCS-1	PCS-2	w	w	PCS _{seco} 1	PCS _{seco} 2	PCS _{seco} 1	PCS _{seco} 2
NORTE	20.086,0	21.609,0	15.690,0	15.670,0	6,02	6,54	21.372,63	22.993,19	16.787,93	16.766,53
SUL	16.925,0	17.390,0	15.147,0	14.737,0	6,18	10,97	18.039,86	18.535,49	17.013,37	16.552,85
LESTE	16.955,0	17.834,0	11.994,0	12.234,0	6,23	18,13	18.081,48	19.018,88	14.650,05	14.943,20
OESTE	18.672,0	19.817,0	15.243,0	15.438,0	4,38	8,84	19.527,30	20.724,74	16.721,15	16.935,06
CENTRO SUL	17.685,0	18.887,0	17.885,0	19.811,0	5,92	7,72	18.797,83	20.075,47	19.381,23	21.468,36
CENTRO OESTE	16.236,0	16.723,0	15.543,0	15.776,0	8,12	8,54	17.670,88	18.200,91	16.994,31	17.249,07

5.5.3 Poder Calorífico Inferior - PCI

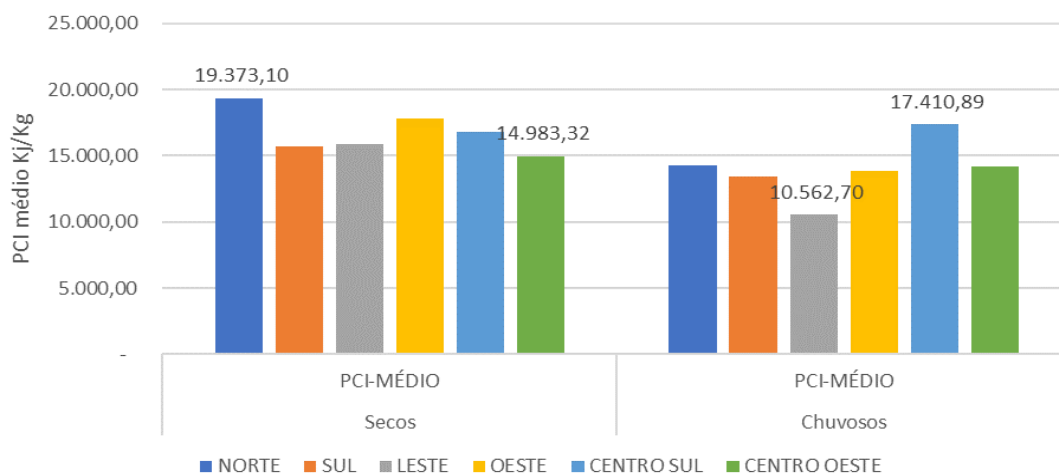
Após o cálculo dos PCS secos foi possível determinar os valores para PCI, utilizando-se a Equação 3 e considerando teor de hidrogênio extraídos das análises elementares CHN realizadas nas amostras de resíduos sólidos urbanos. Os valores calculados para PCI, em joules/Kg, estão descritos na Tabela 9. Os valores de PCI médios e desvio padrão também são apresentados.

Tabela 9. PCI das amostras de RSU de Manaus em dias secos e chuvosos.

Região	Dias Secos			Dias Chuvosos			DP		Ponderação %	PCI ponderado – por região	
	H (%)	PCI-1	PCI-2	H (%)	PCI-1	PCI-2	Secos	Chuvosos		Dias secos	Dias chuvosos
N	6,405	18.611,60	20.134,60	6,135	14.265,83	14.245,83	761,5	10	0,2799	5.422,53	3.990,21
S	6,035	15.448,94	15.913,94	6,135	13.674,24	13.264,24	232,5	205	0,16	2.509,03	2.155,08
L	6,405	15.478,42	16.357,42	5,745	10.442,70	10.682,70	439,5	120	0,2502	3.982,66	2.642,79
O	6,405	17.214,62	18.359,62	6,135	13.793,60	13.988,60	572,5	97,5	0,1417	2.520,43	1.968,37
C-S	6,405	16.211,64	17.413,64	6,135	16.447,89	18.373,89	601	963	0,0953	1.602,24	1.659,26
C-O	6,405	14.739,82	15.226,82	5,645	14.096,89	14.329,89	243,5	116,5	0,0829	1.242,12	1.178,29
									Média	17.279,02	13.593,99

O poder calorífico dos RSU é imediatamente influenciado pelo aumento do teor de umidade do material, sendo que qualquer variação dessa propriedade em qualquer amostra modifica no resultado. Isso se dar porque quanto maior é o teor de umidade maior deverá ser o gasto energético para evaporar a água presente na amostra e quanto mais água menor são os demais componentes, reduzindo o poder calorífico do material presente como combustível. A Figura 12 explica o acima descrito.

Figura 12. PCI médio dos RSU das zonas administrativas de Manaus-AM.



6 CONCLUSÃO E FUTUROS TRABALHOS

A caracterização dos resíduos de uma cidade é de suma importância para a tomada de decisão governamental do tipo de tratamento a ser realizado naquele local. Saber que existe no país a Lei 12.305 (PNRS) que exige uma forma de tratamento dos resíduos antes da destinação final e conhecer os tratamentos térmicos, cujas técnicas encontram-se mais seguras e inovadoras, aumentam o leque de opções disponíveis no mercado. Os valores obtidos nos ensaios, tais como de peso específico aparente, 73,68 Kg/m³, indica a presença em percentual alto de embalagens e materiais recicláveis, aproximadamente um terço da média nacional, confirmando a grande quantidade de materiais leves e contendo ar em seu interior, possibilitando um grau de compactação elevado ao se dimensionar a rota e a quantidade de caminhões coletores compactadores de resíduos. Os estudos de gravimetria irão possibilitar outros estudos. Por enquanto constatou-se uma grande quantidade de material com capacidade de serem reciclados (62% + 2%), apesar das campanhas publicitárias do poder público, indicando pouca matéria orgânica e muito material passível de reciclagem, levando ao pensamento de instalação de uma usina de triagem como alternativa para a diminuição dos resíduos destinados ao aterro da cidade, aumentando a vida útil do mesmo e o reaproveitamento dos materiais recicláveis, trazendo benefícios econômicos, sociais e ambientais à cidade e seus habitantes. Os percentuais elevados de materiais recicláveis, combinado com valores de poder calorífico inferior (PCI), apresentando valores entre 15.000 e 19.000 KJ/Kg nos dias secos, poder calorífico equivalentes aos combustíveis catalogados na bibliografia como Linhita, Lenha seca em estufa e Cascas de coco (17.000 KJ/Kg), Carvão mineral, (15.000 KJ/Kg), mostraram-se promissores em uma futura tomada de decisão para tratamento dos RSU por incineração. Atualmente na cidade de Manaus são geradas aproximadamente 83 mil toneladas de RSU por mês. Esses resíduos são em sua maioria (98%) aterrados, ocupando uma grande área e causando impactos ambientais. As pesquisas mostram a viabilidade de aumento da reciclagem, compostagem de uma parte desses e o restante passar por



tratamento térmico por incineração e conseqüentemente já a geração de energia elétrica.

6.1 FUTUROS TRABALHOS

A proposta de plano de manejo para a cidade de Manaus-AM tem o objetivo de tratamento adequado e disposição final de RSU para reduzir dependência de aterro e geração de eletricidade. Uma análise econômica deverá ser apresentada futuramente levando em consideração alguns cenários de percentuais de reciclagem, a quantidade e custo de combustível gasto na incineração, a energia consumida no processo, bem como as emissões de gases e impactos financeiros que poderão ser causados. Por fim o cálculo da massa real a ser depositada em aterro, que inclui a cinza sólida da incineração e a possível utilização dessa na composição de matéria cimentícia a ser usada na construção civil.

REFERÊNCIAS

Abegas: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado. WEG aposta na gaseificação do lixo para geração. Disponível em <<https://www.abegas.org.br/arquivos/74019>>. Acesso em 08 nov. 2020.

ABNT. NBR 10007/2004 - Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, RJ. 2004.

Abrelpe: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama Dos Resíduos Sólidos No Brasil 2018/2019. Brasília. DF. 2020.

Abrelpe: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama Dos Resíduos Sólidos No Brasil 2020/2021. Brasília. DF. 2022.

Abren: Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos. Regulação Nacional e Internacional de Waste-to-Energy. WASTE EXPO BRASIL, 12-14 novembro de 2019. São Paulo – SP.

Adnan, A., Mahmud, S., Uddin, M. R., Modi, A., Ehsan, M. M., & Salehin, S. Energy, Exergy, Exergoeconomic, and environmental (4E) analyses of thermal power plants for municipal solid waste to energy application in Bangladesh. Waste Management, 134, 136–148. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2021.08.006>. 2021.

ASTM - American Society for Testing and Materials. Standart E1755 - 01, 2007. Standard Test Method for Ash in Biomass.

ASTM - American Society for Testing and Materials. Standart E1756 - 08, 2015. Standard Test Method For Determination of Total Solids In Biomass.

Brasil; LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2010.

Brietzke. D. T. Avaliação do Processo de Compostagem Considerando a Relação Carbono/Nitrogênio. Lajeado – RS. 2016.

Canal Energia. Associações lançam Frente Brasil de Recuperação Energética de Resíduos. Disponível em < <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53136809/associacoes-lancam-frente-brasil-de-recuperacao-energetica-de-residuos>>. Acesso em 23 out. 2020.

Canal Energia. WEG apresenta solução para geração de energia a partir do lixo. 2019. Disponível em < <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53112117/weg-apresenta-solucao-para-geracao-de-energia-a-partir-do-lixo>>. Acesso em 03 nov. 2020.

David. A., Thangavel. Y. D., Sankriti. R. Recover, Recycle And Reuse: An Efficient Way To Reduce The Waste. 2019. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD), Vol. 9, Issue 3, Jun 2019, 31-42.

Ecycle. O que é compostagem e como fazer. Disponível em <<https://www.ecycle.com.br/2368-compostagem.html>>. Acesso em 22 jun. 2020.

Eos Organização E Sistemas. Como funciona o tratamento de resíduos sólidos no Brasil. 2019. Disponível em <<https://www.eosconsultores.com.br/tratamento-de-residuos-solidos-no-brasil/>>.

Acesso em 02 jun. 2020.

Fonseca, L. Estudo Comparativo entre Tecnologia de Queima Direta e de Gaseificação de Resíduos Sólidos Urbanos Brasileiros na Geração de Vapor para Eletricidade em Caldeiras Aquatubulares. Monografia de Especialização. Especialização em Energias Renováveis. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba – PR. 2017.

Ipea: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos. Artigo Publicado em 09/07/2020. Disponível em <<https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>>. Acesso em 09 nov. 2023.

Jones, J. C. Thermal processing of waste. 1st ed 2010. Disponível em <<chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://nsdl.niscpr.res.in/bitstream/123456789/1016/1/thermal-processing-of-waste.pdf>>. Acesso em 22 jul. 2022.

Kühl, R. M. et al. Tecnologias Para Tratamento Térmico De Resíduos Sólidos: Uma Abordagem Energética. 10º CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA. SÃO PAULO – SP. 2015.

Lino, F. A. M. Proposta de Aproveitamento do Potencial Energético do Resíduo Sólido Urbano e do Esgoto Doméstico com Minimização dos Impactos Ambientais. Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, SP., 2014.

Lino F. A. M., Ismail K. A. R. Recycling and thermal of MSW in a developing country. J Eng IOSRJEN 2017;7 (7):30–8. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/318987902_Recycling_and_Thermal_Treatment_of_MSW_in_a_Developing_Country>. Acesso em 22 jul. 2022.

Lino. F. A. M. E Ismail. K.A.R. Evaluation of the treatment of municipal solid waste as renewable energy resource in Campinas, Brazil. Campinas, SP. – 2018.

Lino. F. A. M., Ismail. K.A.R. E J. A. C. Ayarزاب. Municipal solid waste treatment in Brazil: A comprehensive review. Energy Nexus-11- 2023 -100232 Disponível em <<https://acrobat.adobe.com/link/review?uri=urn%3Aaaid%3Aascds%3AUS%3Adc671871-69cb-3b3a-9137-3d300e95db01>>. Acesso em 24 ago. 2023.

Menezes, R.A, Gerlach, J. L. & Menezes, M. A. 2000. Estágio Atual da Incineração no Brasil. Disponível em <<http://www.resol.com.br/textos/Estado%20Atual%20da%20Incineracao%20no%20Brasil.htm>>. Acesso em: 02 jun. 2020.

Morgado, T. C. & Ferreira, O. M. Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos, Aproveitamento na Co-geração de Energia. Estudo para a Região Metropolitana de Goiânia. Universidade Católica de Goiás – Departamento de Engenharia Ambiental. GO., 2017.

Paulo, B. T., Dalbosco, G. V. E Leites, T. N. Geração de energia através de resíduos sólidos urbanos. Projeto nível II. Universidade Federal de Santa Catarina. SC., 2013.

Pereira. T. V; Seye. O. Caracterização física térmica de biomassa local. ENEPEX / 5º EPEX – UEMS E 8º ENEPE – UFGD (Encontro de Ensino, Pesquisa e Extensão). Universidade Federal da Grande Dourados – MS. 2014.

Poli. D. De C. R. et al. Uma Avaliação das Metodologias para Determinação do Poder Calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos. Artigo publicado na revista Sodebras soluções para o desenvolvimento do



país. Volume 9 - Nº 99 - Março/ 2014. SP. 2014.

Queiroz. A. J. P. Análise da Degradação e do Poder Calorífico de Resíduos Sólidos Urbanos. Dissertação de mestrado. Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. PB. 2014.

Rada. E. C. Municipal solid waste selective collection and tourism E. C. Rada¹, C. Zatelli² & P. Mattolin². University of Trento, Italy ²Agency for the Effluent Treatments, Italy. 2014. Disponível em <<chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/W/M14/WM14016FU1.pdf>>. Acesso em 22 jul. 2022.

Saneamento Básico. 2019. Artigo: Lixões e aterros sanitários: um desafio permanente na vida dos brasileiros, de 25/10/2019. Disponível em <<https://www.saneamentobasico.com.br/lixoes-aterros-sanitarios-desafio/>>. Acesso em 25 nov. 2020.

Saneamento Básico. 2020. Artigo: Lixões a céu aberto são tão graves quanto uma pandemia, de 19/05/2020. Disponível em <<https://www.saneamentobasico.com.br/lixoes-ceu-aberto-pandemia/>>. Acesso em: 25 nov. 2020.

Semulsp Manaus. RELATÓRIO ANUAL 2021. Disponível em <<chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://semulsp.manaus.am.gov.br/wp-content/uploads/2022/03/RELATORIO-ANUAL-2021.pdf>>. Acesso em: 12 de mar. 2022.

Weg S.A. Weg oferece ao mercado solução para geração de energia elétrica com utilização de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). 2019. Disponível em <<https://www.weg.net/institutional/BR/pt/news/produtos-e-solucoes/weg-oferece-ao-mercado-solucao-para-geracao-de-energia-eletrica-com-utilizacao-de-residuos-solidos-urbanos-rsu>>. Acesso em 08 nov. 2020.