

ÁREA TEMÁTICA: Área 3: Reciclagem

ESTRATÉGIA DE CONVERSÃO TERMOQUÍMICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Fabio Cordeiro de Lisboa, Carlos Alberto Gurgel Veras, Antonio Cesar P. Brasil Jr.

RESUMO

O artigo traz uma análise da coleta de resíduos sólidos no Distrito Federal, em particular o aquele destinado ao aterro sanitário da Estrutural, já desativado. Com o objetivo de promover a remediação ambiental da área, são analisados diferentes processos termoquímicos para aproveitando o lixo minerado na conversão energética. Após uma criteriosa amostragem, a caracterização do material coletado é feita em duas estratégias: uma com o lixo sem nenhum tratamento térmico, a fim de medir o potencial energético e outra com as frações obtidas após pirólise, com o objetivo de entender a degradação térmica do material minerado. Observou-se que foram enterradas 19.724.915 toneladas de resíduos, em sua maior parte sem seleção prévia. Mediu-se um poder calorífico inferior base úmida ($PCI_{(bu)}$) de 2,3 MJ/kg, para uma umidade de 22,7%. Com este valor é possível a conversão de até 11.341 GWh em calor ou 2.520 GWh em eletricidade. O processamento por pirólise do resíduo minerado apresenta-se como uma possibilidade, usando a queima dos gases gerados como parte do combustível necessário para elevação da temperatura a cerca de 300°C, retornando o material inerte e descontaminado para o meio ambiente, reduzindo o impacto ambiental.

Palavras-chave: Remediação ambiental; Aterro sanitário de Brasília; Processamento termoquímico.

STRATEGY FOR THERMOCHEMICAL CONVERSION OF URBAN SOLID WASTE

ABSTRACT

The article provides an analysis of the collection of solid waste in the Federal District, in particular that destined for the Estrutural landfill, which is already deactivated. In order to promote the environmental remediation of the area, different thermochemical processes are analyzed to take advantage of the mined waste in the energy conversion. After a careful sampling, the characterization of the collected material is made in two strategies: one with the garbage without any thermal treatment, in order to measure the energy potential and the other with the fractions obtained after pyrolysis, in order to understand the thermal degradation of the mined material. It was observed that 19,724,915 tons of waste were buried, most of them without previous selection. A humid base lower calorific value ($PCI_{(bu)}$) of 2.3 MJ / kg was measured, for a humidity of 22.7%. With this value, it is possible to convert up to 11,341 GWh into heat or 2,520 GWh into electricity. Pyrolysis processing of the mined waste is presented as a possibility, using the burning of the gases generated as part of the fuel necessary to raise the temperature to about 300 ° C, returning the inert and decontaminated material to the environment, reducing the impact environmental.

Keywords: Environmental remediation; Brasília landfill; Thermochemical processing.

1. INTRODUÇÃO

A destinação de resíduos sólidos em grandes cidades é apresentada como um importante problema social. Garantir a correta disposição de rejeitos é sobretudo um fator de saúde pública e sustentabilidade ambiental, uma vez que diversos produtos dispostos em aterros têm ciclos de vida na ordem de centenas de anos. Neste artigo será estudado formas de transformar o rejeito sólido já depositado no aterro da estrutural (Brasília, DF), em energia térmica a partir do processamento do resíduo sólido já degradado, minerado em profundidade de diferentes pontos do aterro.

Vários autores (BAJIĆ et al., 2015; KALYANI; PANDEY, 2014; RODDY; MANSON-WHITTON, 2012; STEHLÍK, 2009), analisaram cenários parecidos e sinalizaram a significância da gestão de resíduos urbanos e do seu aproveitamento para conversão em energia térmica. Existe um consenso na sustentabilidade ambiental, econômica e social do uso deste recurso (BARAN; MAMIS; ALAGOZ, 2016; ZHAO et al., 2016), que aponta baixa viabilidade econômica no processo de incineração de resíduos urbanos, devido aos altos custos de operação e manutenção. Várias soluções são analisadas para a conversão energética do resíduo sólido urbano, no entanto, será abordado somente aquelas que usam processos de combustão direta (incineração), de pirólise e da gaseificação para obtenção de combustíveis derivados do resíduo.

Atualmente, o conceito chamado de “*Waste to Energy*”, que basicamente significa transformar um rejeito em energia, tem contribuído para que os processos termoquímicos percam a fama de poluentes e passem a fazer parte de processos mais sustentáveis para o meio ambiente. “*Waste-to-energy*” (WtE) são processos de recuperação de energia na forma de eletricidade ou calor, a partir de resíduos. Os processos termoquímicos estão sendo amplamente utilizados no aproveitamento energético do tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), e tem o papel dar destino final adequado ao resíduo e gerar energia com isso. Além disso, a aplicação em RSU causa outros benefícios como: Redução do espaço necessário para o aterro; Redução de contaminantes orgânicos; Redução das emissões de gases de efeito estufa produzido pela decomposição do RSU e é uma alternativa para tratamento de resíduos que o processo bioquímico de digestão anaeróbia não consegue atender devido a sua composição química.

Os principais processos termoquímicos para tratar o RSU são: Gaseificação, pirólise e queima direta (combustão completa). Segundo Coelho et. al (2006), a gaseificação, combustão e pirólise podem ser diferenciadas por dois aspectos: quantidade de oxidante utilizada no processo e pelos produtos gerados.

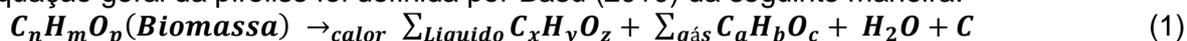
1.1 Processos termoquímicos

Na pirólise não ocorre a presença de oxidante, já a combustão e a gaseificação sim. Porém o primeiro com excesso e o segundo com medidas de oxidantes inferiores as estequiométricas teóricas para combustão em razão da quantidade de carbono presente nas reações. É um processo que opera a temperaturas mais baixas comparadas a gaseificação e a combustão. Usualmente a temperatura de projeto gira em torno de 400 a 900 °C e é um processo endotérmico (Bridgwater and Bridge, 1991). Os produtos da pirólise, podem ser divididos em três grupos: Gases: compostos por hidrogênio, metano e monóxido de carbono; Combustível líquido: composto por hidrocarbonetos, álcoois e ácidos orgânicos de elevada densidade e baixo teor de enxofre. Resíduo sólido: formado por carbono e a escória que são vidros, metais e outros materiais inertes ao processo.

Um dos pontos positivos de se usar a pirólise é que é um processo de baixíssimas emissões. Pois ocorre na ausência de O₂, que é um precursor da geração de dioxinas e furanos (Conesa, Fullana e Font, 2005; Conesa et al., 2009). Ou seja, os gases combustíveis gerados necessitam de menos tratamentos para se atingir os limites de emissões.

Considerando que o resíduo urbano era composto basicamente de três componentes: plásticos, resíduos orgânicos e madeira. E com o objetivo de avaliar o tamanho da partícula na performance da pirólise, Luo et al. (2010) investigaram amostras com tamanhos médios variando de 2 a 20mm. Os resultados mostraram que para todas as amostras o tamanho das partículas tem um efeito no rendimento e composição do produto de pirólise: tamanho de partícula menor resulta em maior rendimento de gás com menos alcatrão e carvão; a diminuição do tamanho das partículas pode aumentar o conteúdo de H₂ e CO do gás, bem como o conteúdo de cinzas e elementos de carbono no carvão. E a influência é muito mais significativa para amostras com maiores teores de carbono e cinzas fixas, como lixo de cozinha, e menos para amostras com maior conteúdo volátil, como o plástico.

A equação geral da pirólise foi definida por Basu (2010) da seguinte maneira:



Dependendo das condições de reação, ao receber calor, a matéria prima vai ser transformada em componentes líquidos, gasosos, vapor de água e carbono.

A queima direta, visa o aproveitamento de calor gerando subprodutos gasosos, essencialmente CO₂ e H₂O. Consiste na oxidação completa dos materiais contidos no combustível incinerado e é uma reação exotérmica. Esse processo já é utilizado no tratamento de resíduos municipais a algum tempo, com objetivo de reduzir volume do lixo e queimar gases nocivos. Segundo Morgado e Ferreira (2006), esse processo de tratamento diminui o volume dos resíduos em cerca de 90% e o peso a 15%. Mesmo com esse benéfico, é um processo que gera bastante emissão de poluentes para o meio ambiente.

Atualmente, o processo de queima é combinando com os conceitos de recuperação energética, controle de emissões e um descarte apropriado do resíduo final. Essas medidas fazem com que esse processo possa ser bem menos agressivo para o meio ambiente, reduzindo bastante suas emissões. Nessa aplicação da incineração, o combustível queimado é formado por uma mistura ampla dos tipos de resíduos encontrados no aterro. A queima emprega altas temperaturas, pelo menos 550°C (Quaak, Knoef e Stassen, 1999) o que garante o tratamento sanitário, destruição dos componentes orgânicos contaminantes e minimiza a presença de combustível perdido nas cinzas residuais.

Como vantagens estão o controle das descargas gasosas, gerando menos emissões, a redução do volume e massa do resíduo, mostra-se como um processo relativamente rápido, onde consegue-se eliminar componentes muito tóxicos. As cinzas e a escória não são classificados como resíduos perigosos e a área utilizada é muito menor que a do aterro. No entanto, como desvantagens, observa-se que alguns materiais não são incineráveis, como os muito úmidos, para resíduos inorgânicos o processo se torna complexo, quando os mesmos contem metais pesados. Possui alto custo de investimento e manutenção e é necessário combustível auxiliar para levar o incinerador à temperatura de operação.

Segundo Doumer et al., (2015), alguns tipos de sistemas de queima direta são: Sistemas de fornos rotativos, fornos de leito fluidizado, incineradores de injeção líquida, incineradores de câmaras múltiplas, incineração oceânica, oxidação supercrítica, incineração catalítica, sistemas de plasma entre outros. Quando o sistema estiver integrado com a produção de vapor para uso na produção de eletricidade ou para uso em processos industriais, outros tipos de fornalhas podem ser utilizados, como as de leito fixo (Sistema de combustão em grelha inclinada, pulverização de carvão, alimentação por parafuso, combustor ciclônico) ou de leito fluidizado (Quaak, Knoef e Stassen, 1999), p. 7-25.

Já a gaseificação, como o próprio nome sugere, visa à obtenção de compostos gasosos com relevante poder calorífico, basicamente constituídos por CO, H₂ e CH₄. Consiste em uma sequência de processos termoquímicos em que um material constituído por carbono é oxidado parcialmente. Isso ocorre pelo controle da temperatura e a concentração de oxigênio abaixo da concentração estequiométrica para combustão. Variáveis como taxa de aquecimento, tempo de exposição ao agente oxidantes, tipo de agente oxidante, velocidade das reações influenciam no tipo de produto gerado, o gás de síntese. Apesar de sua composição variar baseado nas características supracitadas, certos componentes obrigatoriamente serão encontrados no gás, tais como: CO, H₂, CO₂, H₂O, alguns hidrocarbonetos. Essa composição caracteriza o produto como um gás combustível devido ao seu poder calorífico. A gaseificação ocorre dentro de um reator configurado para favorecer a ocorrência das reações químicas do processo, e seus produtos e resíduos possam ser coletados.

No o tratamento do RSU não existe apenas um processo que possa ser escolhido e usado para todo resíduo do aterro. É necessário a junção de vários processos, para que cada um extraia uma fração de interesse do resíduo e consiga-se obter um processo global sustentável e rentável.

Considerando a grande quantidade de material depositada no aterro estudado, onde a área se encontra como um problema ambiental potencial, dada a proximidade aos mananciais de água do Distrito Federal. Estudar a destinação energética deste material e seus consequentes subprodutos, mostra-se de grande relevância, na medida em que encaminha propostas de remediação ambiental da área, associado a uma solução ambientalmente viável.

1.2 Caracterização de combustíveis sólidos

Atualmente, os combustíveis não são apenas os encontrados na natureza, eles podem ser fabricados e manipulados de acordo com a necessidade. A noção da composição química ideal de um combustível faz possível criá-lo através da síntese de elementos desejáveis extraídos dos mais diversos tipos de materiais, porém, nem sempre viável financeiramente ou energeticamente.

Um combustível sólido, em geral, é composto por: carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), enxofre (S), nitrogênio (N), água (H₂O) e cinzas. A porcentagem de cada elemento presente influencia nas características de uso do combustível, viabilizando-o ou não.

Quanto a composição elementar observa-se, quanto ao poder calorífico, que carbono e hidrogênio as suas concentrações são diretamente proporcionais ao poder calorífico do combustível. A quantidade de oxigênio, tem relação inversamente proporcional ao poder calorífico. A quantidade de enxofre, apesar de incrementar no poder calorífico do combustível, sua presença causa corrosão nos equipamentos utilizados e contribui para o fenômeno de “Chuva-Ácida”. Por isso, tem-se o interesse de filtrar o enxofre e trabalhar com níveis mínimos de concentração. O nitrogênio, a sua presença acarreta na formação de óxidos como N₂O e NO₂ que são nocivos à saúde do homem. Enquanto a água, encontrada na forma de umidade, diminui o poder calorífico e junto ao enxofre, forma ácido sulfúrico, o que agrava os problemas de corrosão.

Para a caracterização, buscam-se primariamente a medição da densidade, teor de umidade, porcentagens de C, O₂, H₂, N₂ e S. A concentração de materiais voláteis, minerais combustíveis e cinzas. A temperatura de fusão e granulometria, coesão e Dureza, fusibilidade das cinzas e poder calorífico. Para medição destas características submete-se as amostras à análise imediata, que consiste na medida da fração de material Volátil, carbono fixo, representada pela fração sólida restante após a separação do material volátil. É composta basicamente por carbono. Cinzas: Fração sólida restante após a queima completa do combustível, a umidade, basicamente o resultado da reação de queima do combustível e está relacionada ao poder calorífico inferior e o Enxofre total representado pelo resíduo de enxofre gerado que deve ser filtrado e destinado ao tratamento adequado.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é caracterizar energeticamente o aterro da estrutural em Brasília-DF e indicar os processos térmicos que atenderiam a conversão energética.

3. METODOLOGIA

As estratégias utilizadas para a determinação do potencial energético do aterro, consistem em coletar material em pontos distintos do terreno, de forma a ter uma representação de todo o terreno. Classificar as amostras de lixo minerado, de forma a confrontar a composição do material degradado com o rejeito novo. Em seguida fazer análises imediatas e elementares, bem como medição do poder calorífico, de ordem a servir de subsídio para a escolha dos processos térmicos mais aderentes ao tipo de material encontrado.

3.1 Amostragem e caracterização por separação gravimétrica

A caracterização energética do material minerado do aterro, foi promovida segundo um plano de amostragem do terreno (Figura 1), onde a localização e profundidade da coleta são considerados e analisados. O aterro foi amostrado em 7 pontos distintos, à 5 metros de profundidade, cada amostra foi identificada como: PT02, PT03, PT04, PT05, PT06A, PT06B e PT07, conforme mostrado na figura abaixo.

Figura 1 Representação do plano de amostragem



Fonte: O autor.

Figura 2 Amostras para secagem, peneiramento e separação gravimétrica



Fonte: O autor

O material coletado, após pesado, foi secado por 5 dias ao sol (figura 2) no pátio do laboratório de gaseificação da UnB campus Gama (FGA), em seguida pesado novamente para acompanhamento da perda de umidade. Na etapa seguinte, peneirado para separação da terra, pesado para registro da quantidade de materiais inertes contido e, finalmente, separado manualmente, com vistas a classificar em: Inertes, Papel e Madeira, Plásticos e Resíduos orgânicos.

O material após classificado, foi moído separadamente em moinho de facas em duas granulometrias diferentes: 60 mesh (0,250mm) para análise de poder calorífico superior (PCS) e para análises de composição elementar. E na granulometria de 40 mesh (0,420mm) para análise imediata. As amostras foram novamente recompostas segundo sua composição gravimétrica original e caracterizadas segundo os procedimentos descritos pelas normas: ISO 16559 – *Solid biofuels – terminology, definitions and descriptions*; EN 14778 – *Solid biofuels – sampling*; ISO 18134-3 – *Solid biofuels – determination of moisture content – part 3 moisture in general analysis sample*; EN 14780 – *Solid biofuels – sample preparation*; ISO 18122 - *Solid biofuels - determination of ash content* e ISO 18123 - *Solid biofuels - content of volatile matter*.

As medições do PCS se deram no laboratório de Propriedades Físicas e Análise de Carvão Vegetal da Engenharia Florestal da UnB. O poder calorífico superior foi determinado em bomba calorimétrica modelo C 2000 basic da IKA, tendo como base a norma NBR8633/84. Iniciando o ensaio as amostras peneiradas em 60 mesh foram colocadas para secagem em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até massa constante atingindo 0% de umidade, quando então foram utilizadas para a realização dos ensaios para determinação do PCS_{bs} em bomba calorimétrica.

Com amostras classificadas em 40 mesh, realizou-se a análise imediata no laboratório de materiais da UnB campus Gama – percentual de umidade, percentual de materiais voláteis e percentual de carbono residual. Para a determinação da umidade, percentual em massa de materiais voláteis e cinzas, foram utilizadas as normas ISO 18134-3; ISO 18123 e ISO 18122, respectivamente. Para determinação do carbono residual calculou-se a diferença.

Amostras classificadas na mesma granulometria de 40 mesh, foram encaminhadas para análises elementares das amostras para determinação dos elementos constitutivos - CHN (carbono, hidrogênio e nitrogênio). Realizados na central analítica do instituto de Química da UnB. Esses elementos foram determinados pelo equipamento Perkin Elmer Series 2400 II CHN Análise Elementar, em triplicata e as concentrações de cada elemento foram calculadas pela média simples dos dois valores mais representativos.

3.2 Caracterização de amostra submetida a carbonização

Para testar a pirólise do lixo minerado, e avaliar os dados deste processamento térmico, cerca de 5,7kg de resíduo sem tratamento prévio foi coletado em um determinado ponto representativo do aterro. Esta amostra foi submetida sem peneiramento ou separação ao processo de pirólise lenta (carbonização) com rampa de aquecimento de 8°C/min e patamar de 280°C por 4 horas. Ao final, todas as frações foram reservadas e medidas.

Com a fração sólida procedeu-se análise imediata segundo os procedimentos descritos nas normas técnicas do subitem anterior. Igualmente foi submetida à análise elementar utilizando mesmo procedimento e equipamentos das demais amostras. Para a medição do poder calorífico foi utilizada a mesma metodologia descrita anteriormente.

A fração líquida, foi submetida à separação em funil de decantação e medidos os volumes de água e material condensado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

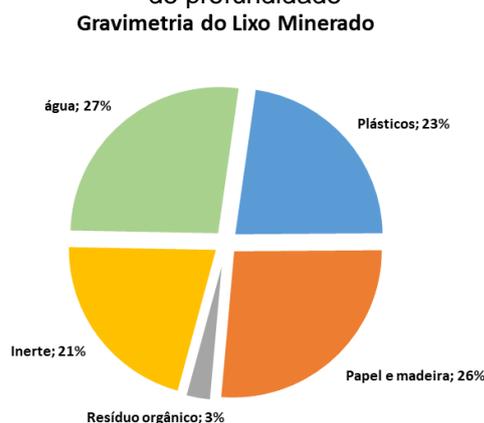
Para a especificação dos parâmetros de operação para gaseificação, pirólise ou incineração, a primeira providência é a caracterização do combustível. Nesta seção será caracterizada o RSU de forma a calcular o potencial energético do aterro. Para tanto foram feitas comparações entre os valores medidos para o lixo minerado atual, com obtidos dos relatórios SLU (2016) e AMORIM et al. (1979).

4.1 Gravimetria dos resíduos

A classificação gravimétrica utilizada pelo SLU (2016) considera os seguintes grupos de materiais: Plásticos, Papel, vidros, Metal, Matéria orgânica e Outros (Tetra pack, Isopor, tecido e roupas).

Como o presente artigo busca a caracterização energética do resíduo amostrado, o material foi agrupado em: água (umidade presente no resíduo), plásticos (PET; PEAD; PVC; PEBD/PELBD; PP; PS; ABS/SAN; EVA; PA e PC), por papéis e madeiras (papel colorido; branco; misto; jornal e papelão; madeiras de demolição e móveis), materiais inertes (terra, vidros, metais, minerais, tijolos e outros) e resíduos orgânicos (restos orgânicos e podas). Ao final da separação e classificação gravimétrica observou-se a distribuição apresentada na figura 3.

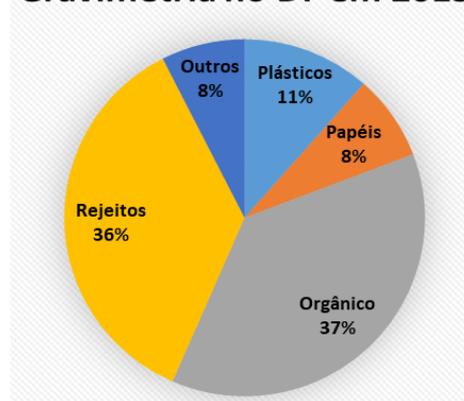
Figura 3 Gravimetria das amostras mineradas a 5m de profundidade



Fonte: O autor

Figura 4 Gravimetria do lixo em coleta convencional no DF em 2015.

Gravimetria no DF em 2015



Fonte SLU (2016)

No relatório SLU (2016), aponta a gravimetria do lixo, estratificado em coleta seletiva e coleta convencional, como o mostrado na figura 4. A comparação com o resíduo minerado (Figura 3), que aponta dados médios da gravimetria medida nesta investigação.

Na metodologia empregada para o levantamento dos dados da figura 4 não apresenta a umidade do material coletado, portanto a quantidade de água é desconhecida. No entanto a grande quantidade de material orgânico sugere um melhor aproveitamento energético dos gases gerados

e pelo melhor aproveitamento térmico dos materiais combustíveis como plásticos, madeiras e papéis.

Pela comparação entre os gráficos das figuras 3 e 4 é possível observar a redução do percentual de matéria orgânica entre o lixo novo e o minerado – já degradado pelo tempo em que ficou enterrado. O processo de aterramento sofrido pelo material também o torna um material de aproveitamento energético mais difícil, uma vez que é necessário separar a parte inerte para então submeter o resíduo à processos de conversão energética. O gráfico da figura 3, para fins energéticos, poderia ser mostrado conforme a figura 5, onde seria necessário consumir energia para tratar 48% da massa de rejeitos com secagem, peneiramentos e separação de metais. A fração mássica aproveitável energeticamente seria de 52%.

4.2 Análise do RSU carbonizado

Análises feitas com material minerado extraído do aterro sem nenhum processo de separação e peneiramento prévio, mostrou baixíssimo potencial para aproveitamento energético. O resíduo submetido ao processo de pirólise a 300°C, em forno mufla especialmente preparado para carbonização e pirólise, no laboratório de carbonização da engenharia florestal (FAL - UnB). Como resultado obtiveram-se as frações descritas na tabela 1 a seguir.

Tabela 1 Rendimento após carbonização

Sólido	42,5%
Líquido	8%
Água	33%
Gases	17%
Voláteis	11,59%
Cinzas (Bu)	87,53%
Carbono Fixo	0,88%
Poder Calorífico Superior	ZERO

As análises do material carbonizado sólido evidenciam um alto teor de materiais inertes e conseqüentemente nenhum poder calorífico (tabela 1). A fração gasosa é a única que apresenta algum potencial de conversão energética, apesar do baixo poder calorífico do gás produzido. Para um processo de descontaminação e recuperação ambiental do terreno, o processo de pirólise de RSU sem processamento prévio é uma opção a ser considerada pela redução do consumo de combustíveis no processamento no resíduo minerado.

A análise elementar realizada com o material carbonizado mostra que a amostra contém 7,38% de carbono, 0,68% de hidrogênio e 0,34% de nitrogênio (fórmula química equivalente $CH_{1,1}N_{0,04}$). Como esperado, a amostra continha grande quantidade de terra, o que gerou um poder calorífico abaixo do fundo de escala do equipamento de medição.

4.3 Análise de RSU peneirado e seco

Para eliminar os efeitos do aterramento, as amostras do plano de amostragem da figura 1 foi previamente classificada, conforme mostrado na figura 3. Estas amostras não foram submetidas a nenhum tratamento térmico prévio, para evitar perda de materiais voláteis combustíveis. Como resultado obtiveram-se os valores da tabela 2.

GRAVIMETRIA (MATERIAIS ENERGÉTICOS)				NÃO ENERGÉTICOS		PCI(bs) (MJ/KG)
AMOSTRA	PLASTICO	PAPEL + MADEIRA	RESÍDUO ORGÂNICO	INERTE	ÁGUA	

PT02CDR	15%	45%	0%	21%	19%	4,79
PT03	34%	8%	0%	27%	32%	6,19
PT04	45%	0%	5%	19%	31%	3,44
PT05	7%	47%	0%	26%	19%	5,03
PT06A	20%	25%	6%	13%	36%	4,79
PT06B	24%	0%	9%	32%	35%	4,29
PT07	14%	60%	0%	9%	17%	5,06
MÉDIA	23%	26%	3%	21%	27%	4,80

Fonte: o autor

Com poder calorífico médio de 4,8 MJ/kg e com os dados da análise imediata (tabela 3) é possível caracterizar o resíduo minerado do aterro da estrutural. O poder calorífico baixo, se justifica na transformação de material orgânico, rico em carbono, em gases como o CH₄, CO₂ e em outros gases típicos dos processos de degradação bioquímica. A tabela 4 detalha melhor as características do material, pela apresentação da análise imediata e seus constituintes básicos descritos na seção 2.4.

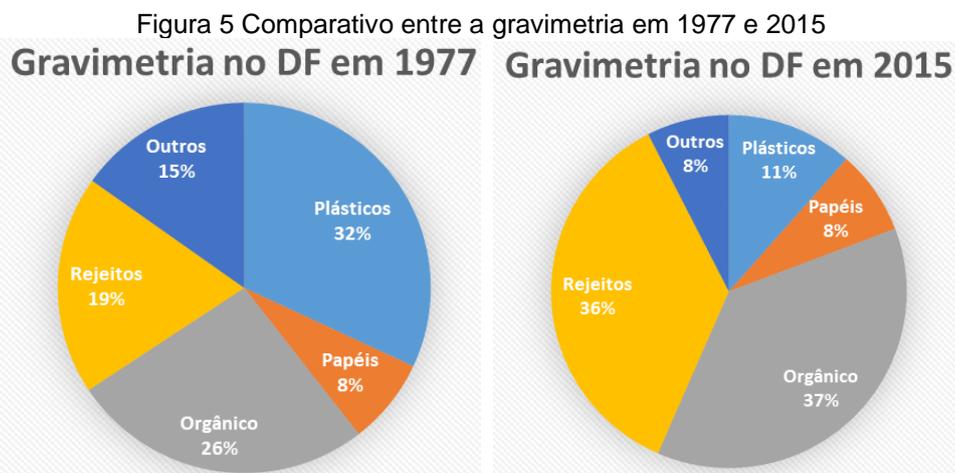
Tabela 2 Análise imediata

ANÁLISE IMEDIATA				
AMOSTRAS	UMIDADE (%)	CINZAS (%)	VOLÁTEIS (%)	CARBONO FIXO (%)
PT02CDR	15	5,23	76,10	3,67
PT03	34	6,36	58,41	1,23
PT04	45	13,84	39,23	1,93
PT05	7	4,51	83,19	5,30
PT06A	20	8,39	70,35	1,26
PT06B	24	13,44	59,26	3,30
PT07	14	4,93	76,03	5,05
MÉDIA	22,7	8,1	66,1	3,1

Fonte: o autor

Assim, observa-se que o resíduo minerado é um material muito heterogêneo, com grande variação dos resultados entre as amostras. Os valores médios, apresenta 22,7% de umidade, 8,1% de cinzas, 66,1% de voláteis, 3,1% de carbono fixo e poder calorífico superior base seca (PCS_(bs)) de 4,8 MJ/kg. Considerando a umidade contida no material o poder calorífico inferior base úmida PCI_(bu) do resíduo minerado, é de 2,3 MJ/kg.

Dados históricos da coleta de lixo no DF, apresentados pelo SLU (1977) já apontavam um de PCS_(bs) 14,13 MJ/kg com peso específico de 140,66 kg/m³ e umidade de 47,87%. Como a gravimetria do lixo de 1977 não é muito diferente da atual (Figura 6) os mesmos parâmetros físicos podem ser considerados para cálculo. Considerando a umidade contida no material o PCI_(bu) do resíduo novo, é de 5,6 MJ/kg.



Fonte: Adaptado de (AMORIM et al., 1979; SLU, 2016)

A degradação do lixo ocasionou uma queda do poder calorífico inferior de 59%, caindo de 5,6 MJ/kg no lixo novo, para 2,3 MJ/kg no degradado. Isso reforça a importância da coleta seletiva e da destinação correta dos resíduos nas usinas de lixo.

4.4 Cálculo do potencial energético do aterro

O histórico de rejeitos despejados no aterro da estrutural nos últimos 52 anos, mostra que as maiores quantidades de rejeito foram despejadas nos anos de 2004 (864.527 t), 2006 (891.764 t) e 2015 (887.220 t). No total foram enterradas 19.724.915 toneladas de resíduos, em sua maior parte sem seleção prévia.

Pelo observado, com o total de resíduos atualmente enterrados no aterro da estrutural, pode-se converter até 11.341 GWh em energia térmica ou 2.520 GWh de eletricidade, valor próximo ao total consumido pelas residências do DF em 2017 (EPE, 2018; p.100).

5. CONCLUSÃO

Com vistas ao aproveitamento energético dos resíduos depositados no aterro da estrutural, buscou-se no presente estudo formas medir o seu potencial de conversão. Dados levantados para o aterro ao longo dos últimos 52 anos foram estudados e amostras de resíduo minerado em profundidade recolhidos e analisados. Como resultado mediu-se um poder calorífico inferior base úmida (PCI_{bu}) de 2,3 MJ/kg, para uma umidade de 22,7%. Com este valor é possível a conversão de até 11.341 GWh em calor ou 2.520 GWh em eletricidade.

Para alcançar estes resultados seriam necessários investimentos em novas tecnologias de separação dos resíduos energeticamente aproveitáveis dos materiais inertes presentes na mistura – que nas amostras mediram 21% do total. Outro desafio é secagem dos resíduos uma vez que teores de altos de umidade foram encontrados junto às amostras, variando de 17% a 36%_(mm).

Destaca-se a grande diferença de poder calorífico encontrado em resíduos novos – 5,6 MJ/kg contra 2,3 MJ/kg do minerado. Isso sugere que uma mistura de resíduo novo com o minerado pode ser economicamente viável para uso em coprocessamento de cimento, por exemplo. Neste caso a promoção da remediação ambiental do terreno ocorrerá pela retirada gradual de resíduos do sítio da estrutural e aproveitamento na produção industrial. Outra proposta de trabalho futuro é a pirólise do material coletado sem tratamento prévio a temperaturas superiores a 300°C, utilizando os gases combustíveis provenientes do processo como uma fonte adicional de combustível para o processo. Ao final ter-se-ia somente um mineral sólido com características semelhantes à da terra comum, livre de contaminantes. Promovendo assim a remediação ambiental daquele sítio.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao laboratório de energia e ambiente (LEA), que por meio do projeto **Hibridização de fontes de geração de energia elétrica como alternativa tecnológica de remediação ambiental de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos – estudo de caso: aterro controlado do jockey clube (Lixão da Estrutural – Brasília-DF) – Projeto RAEESA**, executado por meio de um Convênio entre a Fundação Universidade de Brasília - FUB e o Companhia Energética de Brasília-CEB.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, V. P. DE et al. As Características Físicas e Químicas do Lixo do Distrito Federal. **X Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, p. 30, 1979.
- BAJIĆ, B. Ž. et al. Waste-to-energy status in Serbia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 1437–1444, 2015.
- BARAN, B.; MAMIS, M. S.; ALAGOZ, B. B. Utilization of energy from waste potential in Turkey as distributed secondary renewable energy source. **Renewable energy**, v. 90, p. 493–500, 2016.
- BASU, P. Chapter 5 - Gasification Theory and Modeling of Gasifiers. In: BASU, P. (Ed.). **Biomass Gasification and Pyrolysis**. Boston: Academic Press, 2010. p. 117–165.
- COELHO, S. T.; VELAZQUEZ, S. M. S. G.; MARTINS, O. S. Sewage biogas conversion into electricity. **Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural**, 2006.
- CONESA, J. A. et al. Comparison between emissions from the pyrolysis and combustion of different wastes. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 84, n. 1, p. 95–102, 2009.
- CONESA, J. A.; FULLANA, A.; FONT, R. Dioxin production during the thermal treatment of meat and bone meal residues. **Chemosphere**, v. 59, n. 1, p. 85–90, 2005.
- DOUMER, M. E. et al. Slow pyrolysis of different Brazilian waste biomasses as sources of soil conditioners and energy, and for environmental protection. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 113, p. 434–443, 2015.
- EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018 - Ano base 2017. p. 249, 2018.
- KALYANI, K. A.; PANDEY, K. K. Waste to energy status in India: A short review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 31, p. 113–120, 2014.
- LUO, S. et al. Effect of particle size on pyrolysis of single-component municipal solid waste in fixed bed reactor. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 1, p. 93–97, 2010.
- MORGADO, T. C.; FERREIRA, O. M. Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos, Aproveitamento na Cogeração de Energia. Estudo para a Região Metropolitana de Goiânia. **Revista da Engenharia Ambiental da Universidade Católica de Goiás, Goiânia, GO**, v. 2, n. 1–18, 2006.
- QUAAK, P.; KNOEF, H.; STASSEN, H. **Energy from biomass: a review of combustion and gasification technologies**. [s.l.] The World Bank, 1999.
- RODDY, D. J.; MANSON-WHITTON, C. 5.10 - Biomass Gasification and Pyrolysis. In: SAYIGH, A. (Ed.). **Comprehensive Renewable Energy**. Oxford: Elsevier, 2012. p. 133–153.
- SLU, S. DE L. U. **Relatório da Análise Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos do Distrito Federal - 2015**. Brasília DF: [s.n.]. Disponível em: <papers3://publication/uuid/7FB0F3BF-9789-497E-A6EA-7EA91E9EE525>.
- STEHLÍK, P. Contribution to advances in waste-to-energy technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 10, p. 919–931, 2009.
- ZHAO, X. et al. Economic analysis of waste-to-energy industry in China. **Waste management**, v. 48, p. 604–618, 2016.