

III-252 - DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS COM ENFOQUE NA GERAÇÃO DE ENERGIA NO MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE

Cláudio Jorge Cançado⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais. Doutor em Ecologia e Recursos Naturais pela Universidade Federal de São Carlos. Pesquisador da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC/MG.

Marta Ribeiro dos Santos

Engenheira Química pela Universidade Federal de Minas Gerais. Doutora em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela Universidade Federal de Minas Gerais. Pesquisadora da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC/MG.

Janaína Giovani Noronha de Oliveira

Graduada em Matemática. Mestre em Estatística pela Universidade Federal de Minas Gerais. Professora da Faculdade Pitágoras. CETEC.

Emerson Ribeiro Lessa

Engenheiro Civil e Sanitarista. Mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará – Área de Concentração: Saneamento Ambiental. Pesquisador pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais –

Fabiano Rezende Carrusca de Oliveira

Graduando em Engenharia Ambiental pela Universidade FUMEC. Bolsista de Iniciação Científica pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC.

Endereço⁽¹⁾: Rua José Sérgio de Paula, 172 apto 201 - Belo Horizonte - MG - CEP: 31910-270 - Brasil - Tel: (31) 3489-2257 - e-mail: claudio.cancado@cetec.br

RESUMO

A maioria das grandes e médias brasileiras tem apresentado problemas com a destinação final dos resíduos sólidos domiciliares. O município de Belo Horizonte, recentemente, encerrou as atividades de operação do seu aterro sanitário por motivo de saturação de área e enfrenta dificuldades para encontrar uma solução de destinação final de seus resíduos. Dentro deste escopo cenário, como observado em países europeus, o aproveitamento energético dos resíduos sólidos domiciliares, a partir de processos de gaseificação e queima, pode ser uma alternativa viável para solução de problemas, apresentando-se como uma possibilidade de solução para diminuição do impacto ambiental da destinação final de resíduos no solo, a necessidade de áreas para aterramento, a possibilidade de geração de energia elétrica, entre outros.

Sendo assim, o presente trabalho propõe uma metodologia para a determinação do poder calorífico superior e inferior dos resíduos sólidos domiciliares do município de Belo Horizonte, analisando-se as áreas de estudo em função de sua estratificação sócio-econômica. Além da utilização de modelos matemáticos em função de sua composição química (Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio, Oxigênio e Enxofre) para comparação dos resultados obtidos em laboratório.

Os resultados obtidos indicaram que o tratamento térmico de resíduos sólidos domiciliares e comerciais no município de Belo Horizonte se mostrou promissor para uma possível utilização para geração de energia devido aos elevados valores de poder calorífico obtidos tanto experimentalmente quanto em equações relatadas na literatura.

PALAVRAS-CHAVE: Potencial energético, resíduos sólidos domiciliares e comerciais, poder calorífico, gestão de resíduos sólidos urbanos, meio ambiente.

INTRODUÇÃO

Todos reconhecem que a escassez de energia elétrica e a falta de áreas adequadas para a disposição final dos resíduos constituem-se em dois graves problemas com que se defronta o Brasil na atualidade. A produção de

energia elétrica a partir de resíduos sólidos domiciliares se constitui uma solução factível, resolvendo esses dois problemas com uma única solução ação.

Além disso, sempre haverá necessidade de diversificarmos a matriz energética do país, independente do momento de crise, sendo observado em inúmeros trabalhos a necessidade de se melhorar o planejamento e a gestão sobre este tema, embora não haja um total consenso sobre esta questão, além do aumento do consumo, quando houver a retomada do crescimento econômico, após a passagem das turbulências observadas na economia mundial recentemente. Além disso, processos de tratamento de Resíduos Sólidos Domiciliares - RDO que envolvem a aplicação de Plasma, incineração e outros se tornam economicamente mais atraentes em virtude, principalmente, da geração de energia.

O local de disposição de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em Belo Horizonte está com a capacidade exaurida. Desta forma, o município de Belo Horizonte vem buscando novas áreas para disposição ou tecnologias alternativas para tratamento/disposição dos RSU. Além disso, o problema de disposição final do lixo tem se apresentado de difícil solução para uma boa parcela dos municípios, sendo observado um grande potencial destes resíduos para a geração energética. Desta forma, o conhecimento do poder calorífico do RSU é fundamental para a elaboração de projetos para tratamento e geração de energia.

Logo, procurou-se levantar as características e peculiaridades dos resíduos sólidos urbanos da região em estudo, em especial daqueles gerados nos domicílios e comércios, nas quais avaliou-se seu potencial para geração de energia.

O presente trabalho teve por objetivo a definição de uma metodologia de determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos domiciliares com vistas à geração de energia, usando como estudo de caso o município de Belo Horizonte. O potencial energético dos resíduos foi avaliado por medição direta (laboratorial) e por modelos matemáticos (indiretos).

O desenvolvimento desse trabalho contou com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). Os autores agradecem à Unidade Estadual de Minas Gerais do IBGE, ao Departamento de Cartografia da Universidade Federal de Minas Gerais, à PRODABEL e à empresa VirtualCad pelo apoio prestado para a execução do presente trabalho.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo teve como foco a caracterização quantitativa e qualitativa dos resíduos sólidos urbanos em relação a questão energética. A determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos se deu a partir de ensaios laboratoriais e modelos matemáticos relatados na literatura. Visando esta determinação, optou-se pela seguinte sequência metodológica:

1. Levantamento dos dados das regionais, dos dados censitários e escolha do tamanho das amostras para o município de Belo Horizonte: utilizou-se a técnica de amostragem por residência/comércio, dividindo-se o município em regionais, a partir de uma estratificação sócio-econômica feita com dados do IBGE onde se trabalhou com 5 classes (A, B, C, D e E) da classe mais baixa (E) a classe mais alta de renda (A), visando uma maior representatividade das amostras coletadas, conforme Cançado (2009).
2. Coleta das amostras e caracterização dos resíduos sólidos urbanos do município de Belo Horizonte: Após a elaboração do mapa de estratificação socioeconômica, fez-se a seleção aleatória de residência e/ou comércio em função da renda. Devido a questões operacionais, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos padrão de 100 litros, nos quais se colocaram vários sacos de lixo. O número de amostra foi determinado estatisticamente, de maneira aleatória, em função das necessidades operacionais do laboratório de química orgânica do Setor de Análises Químicas do CETEC, dentro dos critérios de estratificação sócio-econômica de cada regional. Nos dias de trabalho de campo, as amostras foram coletadas e identificadas com etiquetas contendo o endereço da residência, a classe de renda e o código identificador da amostra. Em seguida, as amostras foram transportadas e armazenadas em local adequado (pátio de compostagem do Setor de Recursos da Terra – SAT da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC). Posteriormente, cada amostra (saco de

lixo de 100 litros contendo resíduos das nove regionais) foi pesada e o valor registrado em planilha. Em seguida, o saco de lixo foi aberto e os componentes separados em contêineres, de acordo com sua identificação. Ao finalizar a separação, cada contêiner foi pesado para verificar o peso dos constituintes de cada amostra. Todos os 110 sacos contendo os resíduos foram analisados individualmente, de acordo com procedimento citado acima. Para pesagem dos resíduos, utilizou-se uma balança digital tipo plataforma modelo W300-H marca Welmy. Durante esse processo, foram separadas amostras de resto de alimentos, resto de poda, papel reciclável, papelão, plástico mole, plástico duro, pet, tetra pak, resto de banheiro, entulho e outros, os quais foram acondicionados separadamente em sacos de lixo de 100 litros. Em seguida, cada componente foi triturado utilizando um Triturador TRAPP TR 200 e, novamente, dispostos em sacos de lixo de 100 litros. Materiais como alumínio, metal, vidro, cerâmica, borracha, couro e trapo não foram triturados devido a sua elevada densidade, sendo assim descartados, pois o equipamento não suportaria triturar tais resíduos.

3. Preparação das amostras para as análises em laboratório: De cada componente triturado foi retirada uma alíquota representativa, aproximadamente 300 gramas, sendo a mesma acondicionada em uma pequena assadeira. Em seguida, as amostras foram deixadas em uma estufa de secagem a 105 °C por 24 horas com objetivo de se conhecer a umidade dos resíduos. Passado este período, as amostras foram descartadas. Paralelo a esse processo, o restante dos componentes triturados foram dispostos em assadeiras domésticas de alumínio com capacidade de 10kg e deixados em uma estufa de secagem a 60°C por 24 horas, visando apenas a retirada do excesso da umidade. Estas amostras foram levadas para o laboratório de Análises Químicas do CETEC e submetidas a outro processo de trituração, no qual foi utilizado um triturador modelo TE-680 Willye marca Tecnal. A partir da determinação do peso, foram realizados cálculos matemáticos na base seca (considerando o valor da umidade de cada elemento) resultando na percentagem que cada componente representava nas amostras iniciais e, a partir disso, foram constituídas as amostras finais, com 50g de resíduos, as quais foram montadas e acondicionadas em sacos hermeticamente fechados e devidamente identificados com capacidade de 5 litros. Desta maneira, retirou-se o percentual correspondente a cada um dos resíduos triturados para formação da amostra final de cada estrato das nove regionais do município de Belo Horizonte. Como os componentes foram triturados individualmente, fez-se necessário que se formasse uma amostra final com as mesmas características da amostra inicial, visando preservar a representatividade de cada amostra.
4. Determinação do Poder Calorífico Superior e Inferior (PCS e PCI): O método de determinação do poder calorífico baseou-se na combustão completa da amostra, em geral com oxigênio puro, a volume constante, e na transferência de calor para certa quantidade de água contida em uma bomba calorimétrica (Marca Parr Instrument Company – Modelo I241), segundo a Norma ASTM D 2015 com algumas modificações experimentais. O poder calorífico divide-se em poder calorífico superior e inferior. A diferenciação entre o poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) resulta da consideração do estado final da mistura de gases de combustão e do vapor d'água que se forma na queima de substâncias hidrogenadas. Se o estado de equilíbrio térmico dos produtos da combustão com a água do calorímetro ocorre sem a condensação do vapor d'água, o poder calorífico medido é o inferior; se o vapor se condensa e a mistura é resfriada à temperatura inicial (geralmente a do ambiente, tomada como 25°C), maior quantidade de calor é cedida ao calorímetro e o resultado obtido é o poder calorífico superior. Foram usadas amostras de 1g na bomba calorimétrica para a determinação do Poder Calorífico dos resíduos de Belo Horizonte.
5. Determinação de Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio e Enxofre: Visando complementar os resultados obtidos pela determinação do PCS, utilizaram-se modelos matemáticos relatados por Kathiravale *et al.*, (2003) que foram desenvolvidos baseados nos resultados laboratoriais de composição gravimétrica, análise elementar ou análise física. Dessa forma, fez-se a determinação dos conteúdos de hidrogênio, carbono, nitrogênio, enxofre e oxigênio do resíduo, utilizando-se um analisador de CHN (Marca Perkin Elmer – Modelo 2400 Série II). A análise consiste na combustão da amostra para transformar elementos da mesma em gases simples (CO₂, H₂O e N₂). A amostra é oxidada em um ambiente contendo oxigênio puro utilizando reagentes clássicos. Na zona de combustão, além dos gases CO₂, H₂O e N₂, existem compostos halogenados e compostos contendo enxofre que são removidos por reagentes específicos. Os gases homogeneizados são despressurizados através de uma coluna, sendo posteriormente separados e detectados em função da condutividade térmica, obtendo-se assim, os teores desejados. Foram usadas amostras de xxxg.

6. Aplicação dos modelos matemáticos: De posse dos resultados da determinação do CNHO/S dos resíduos sólidos urbanos coletados, fez-se a aplicação dos resultados obtidos em cada amostra nas equações aplicáveis aos resíduos sólidos urbanos (MSW) listadas por Kathiravale *et al.*, (2003) (Tabela 01), utilizando-se a média aritmética dos mesmos por regional e do município, visando encontrar um valor de PCS médio para os resíduos sólidos urbanos do município de Belo Horizonte.

Tabela 1: Modelos matemáticos selecionados para o cálculo do poder calorífico superior (PCS) pela composição elementar

Nome	Equação	Unid.	Aplicação
Dulong	$PCS = 81C + 342,5 (h - O/8) + 22,5S - 6(9H - W)$	kcal/kg	RSU / Carvão
Steuer	$PCS = 81(C - 3 X O/8) + 57 X 3 X O/8 + 25S - 6(9H + W)$	kcal/kg	RSU
Scheurer - Kestner	$PCS = 81(C - 3 X O/4) + 342,5H + 22,5S + 57 X 3 X O/84 - 6(9H + W)$	kcal/kg	RSU

Fonte: Adaptado de Kathiravale *et al.*(2003).

7. Análise dos Resultados: A partir dos resultados obtidos pelos dois métodos (determinação do PCS e PCI, e do CNHS), fez-se uma comparação dos resultados obtidos no intuito de avaliar a consistência dos mesmos e analisar qual melhor se aplica a realidade do município de Belo Horizonte, definindo-se, desta maneira, um valor de referência do potencial energético do resíduo sólido urbano da área de estudo.

A Figura 01 apresenta, de forma esquemática, o processo de determinação do poder calorífico da massa de resíduos sólidos urbanos do município de Belo Horizonte.

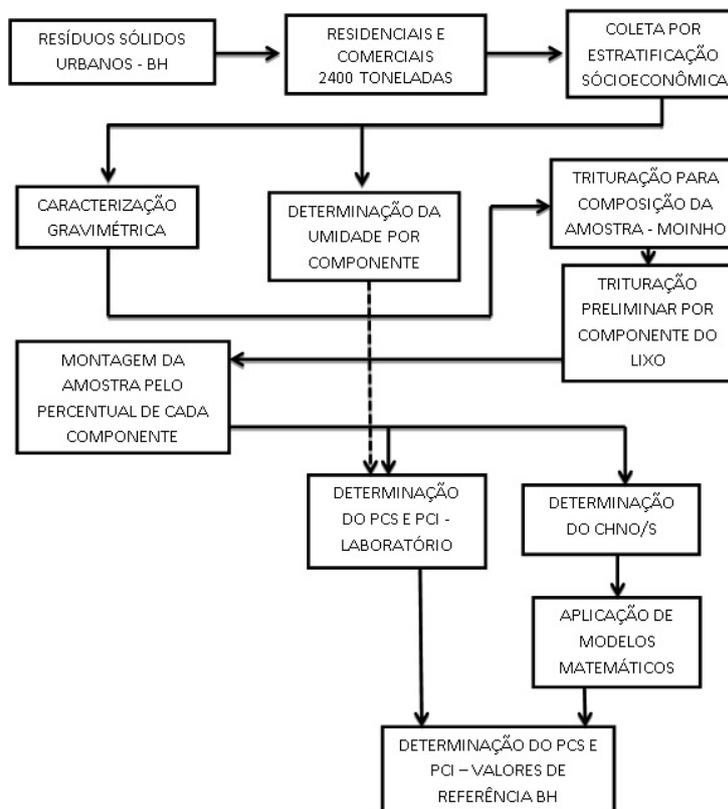


Figura 1: Fluxograma do Processo de Determinação do Potencial Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos.

CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES E COMERCIAIS DO MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE

Os valores de PCS e a caracterização gravimétrica são resultantes dos dados obtidos nas três campanhas de amostragem (204 amostras no total). A seguir serão descritos os resultados da caracterização e do poder calorífico superior (PCS) dos resíduos sólidos urbanos das nove regionais da cidade de Belo Horizonte.

Caracterização Gravimétrica dos Resíduos

A caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos é um importante instrumento de planejamento, pois oferece subsídio para toda a concepção do sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos, como por exemplo a escolha de alternativas de coleta, tratamento e destinação, como também dos equipamentos envolvidos nessas atividades. No processo de quantificação do poder calorífico dos resíduos, essa caracterização é extremamente necessária, pois a composição do resíduo é um fator que varia de acordo com as características de cada local. Desta maneira, o potencial energético de uma determinada cidade pode variar muito em relação à outra, devido a fatores socioeconômicos, climatológicos, locais, entre outros. Logo, fez-se a determinação da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos por regional do município de Belo Horizonte, conforme metodologia descrita anteriormente.

A Tabela 2 apresenta a composição gravimétrica média dos resíduos sólidos urbanos das nove regionais do município de Belo Horizonte feita pela Secretaria de Limpeza Urbana e as realizadas pelo presente trabalho nas três campanhas. (Tabela 3 e figuras 2 a 11).

Tabela 2: Composição Gravimétrica Média em Percentual dos RSU por Regional de Belo Horizonte – Fonte: SMLU (2004) apud Caçado *et al.* (2007).

REGIONAL	MATERIA ORGÂNICA	PLÁSTICO	PAPEL	METAL	VIDRO	OUTROS
BARREIRO	61,13	11,19	7,94	2,06	2,65	14,03
CENTRO	52,22	11,65	12,06	1,98	1,40	20,69
LESTE	60,28	11,24	11,18	2,35	2,93	12,02
NORDESTE	61,88	10,81	8,74	2,34	2,84	13,39
NOROESTE	61,52	10,96	9,20	2,67	1,83	13,82
NORTE	61,90	10,36	7,71	2,22	2,91	14,09
OESTE	60,34	10,08	9,35	2,19	3,10	13,94
PAMPULHA	64,48	10,05	10,59	2,39	2,74	9,75
SUL	62,70	11,03	12,97	1,86	5,34	6,10
VENDA NOVA	63,63	10,79	8,71	2,09	1,58	13,20
MÉDIA BH	61,59	9,54	10,88	2,29	2,85	12,85

Tabela 3: Composição gravimétrica média em percentual dos RSU por regional de Belo Horizonte obtida nas 3 campanhas

REGIONAL	MATERIA ORGÂNICA	PLÁSTICO	PAPEL	METAL	VIDRO	OUTROS
REGIONAL BARREIRO	61,31	13,49	10,83	2,87	2,82	8,69
REGIONAL CENTRO-SUL	58,41	11,41	15,74	2,36	4,18	7,90
REGIONAL LESTE	50,38	11,77	10,64	1,97	1,72	23,52
REGIONAL NORDESTE	62,82	13,12	12,94	1,81	1,97	7,34
REGIONAL NOROESTE	56,50	13,51	16,52	2,56	2,77	8,14
REGIONAL NORTE	54,71	13,32	12,69	1,92	2,72	14,64
REGIONAL OESTE	54,99	12,83	17,09	1,83	4,02	9,24
REGIONAL PAMPULHA	61,42	12,56	13,16	2,60	3,46	6,79
REGIONAL VENDA NOVA	62,28	12,97	12,30	1,78	3,04	7,64
MÉDIA BH	58,09	12,77	13,55	2,19	2,97	10,43

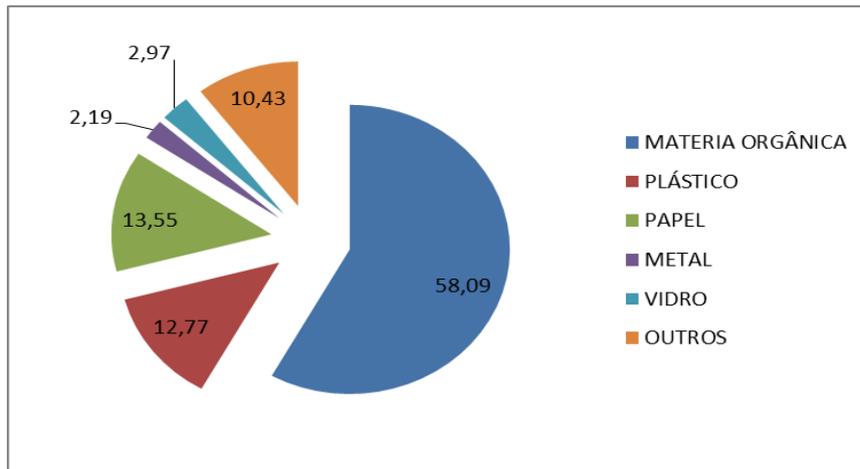


Figura 2: Composição gravimétrica média dos RSU de Belo Horizonte.

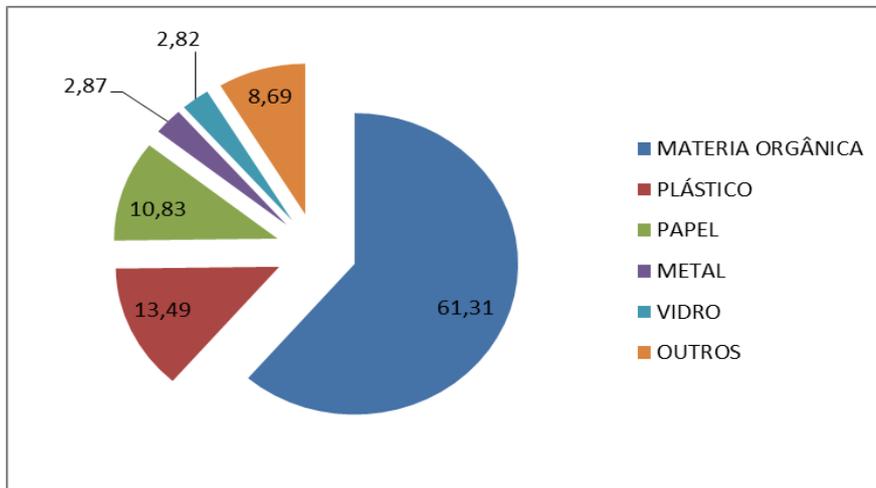


Figura 3: Composição gravimétrica média dos RSU da regional Barreiro.

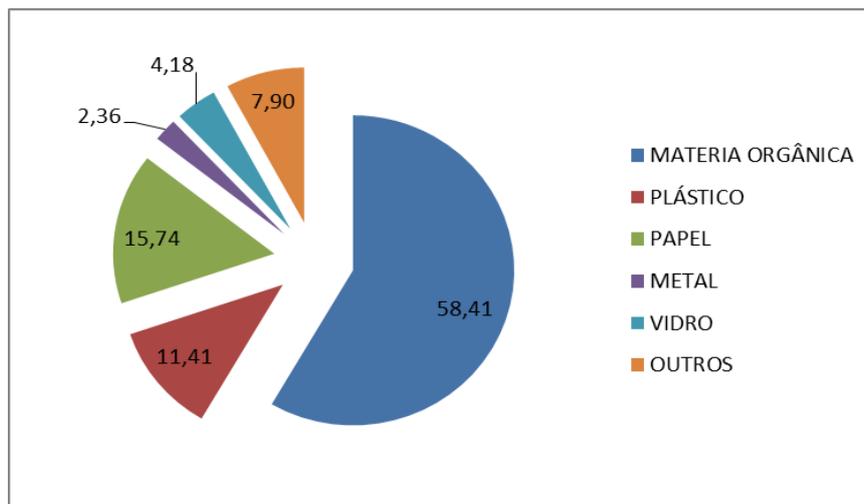


Figura 4: Composição gravimétrica média dos RSU da regional Centro-Sul.

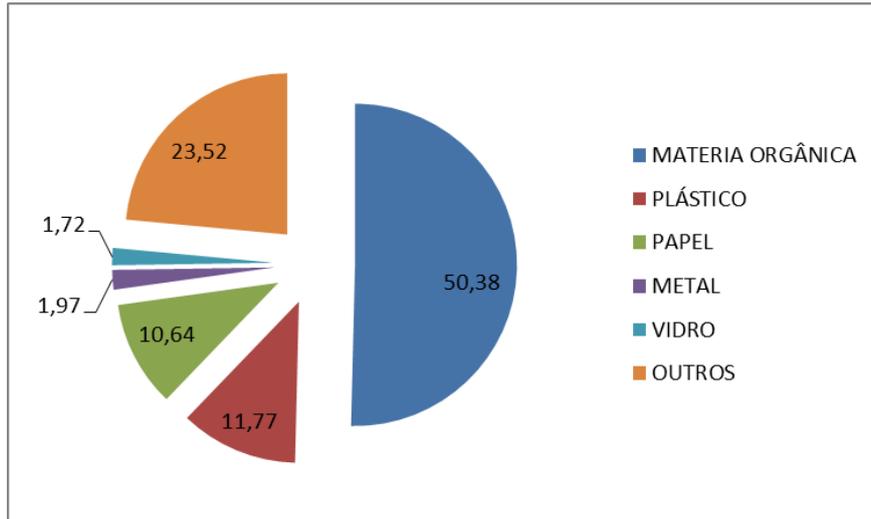


Figura 5: Composição gravimétrica média dos RSU da regional Leste.

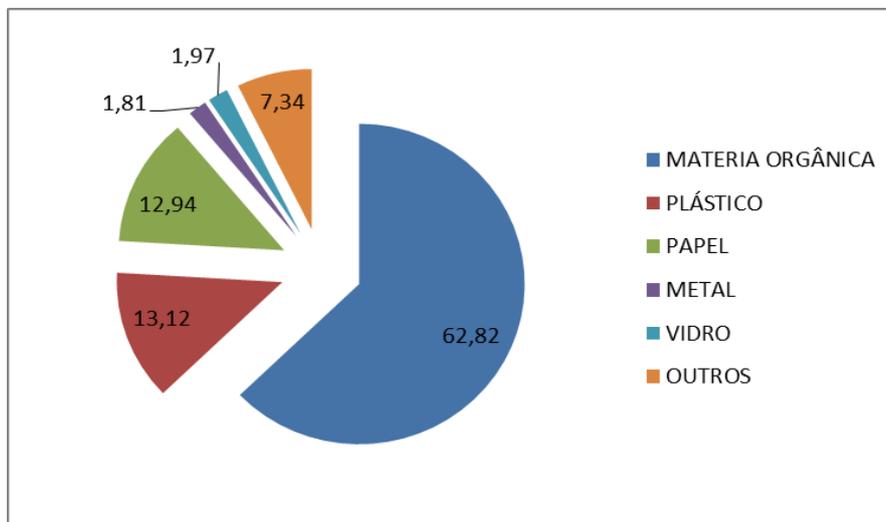


Figura 6: Composição gravimétrica média dos RSU da regional Nordeste.

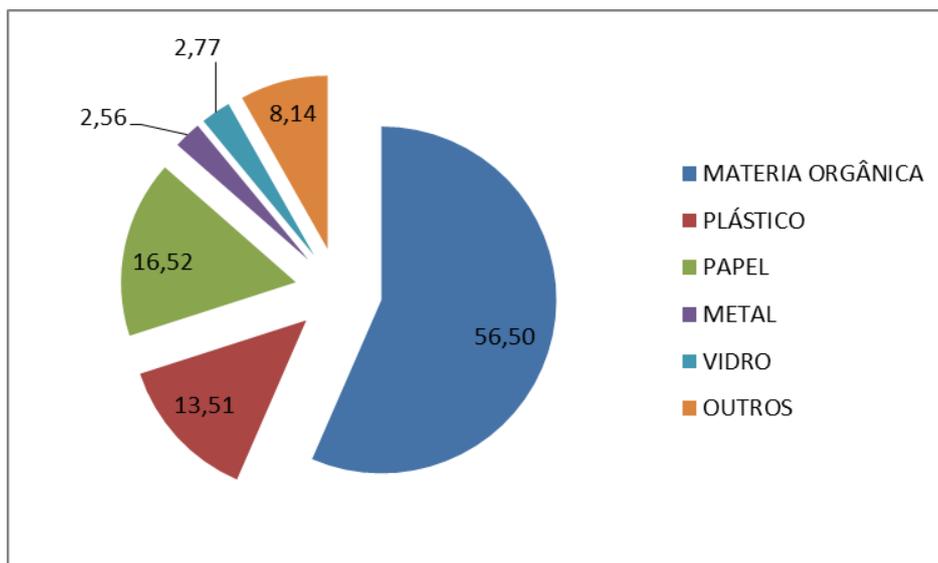


Figura 7: Composição gravimétrica média dos RSU da regional Noroeste.

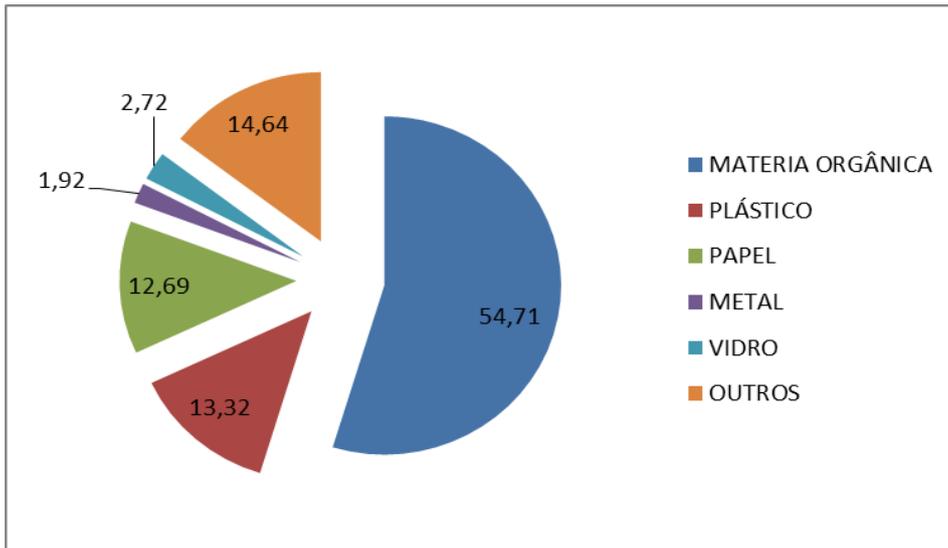


Figura 8: Composição gravimétrica média dos RSU da regional Norte.

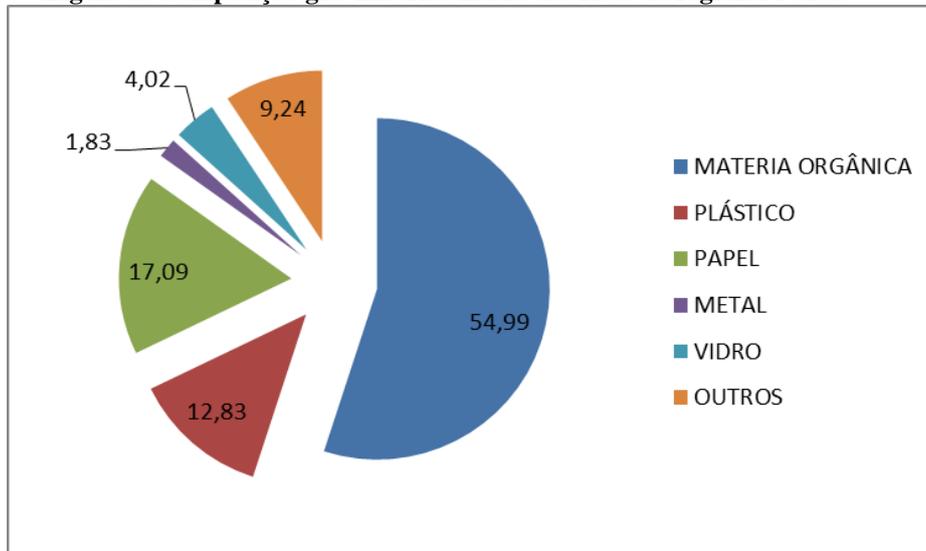


Figura 9: Composição gravimétrica média dos RSU da regional Oeste.

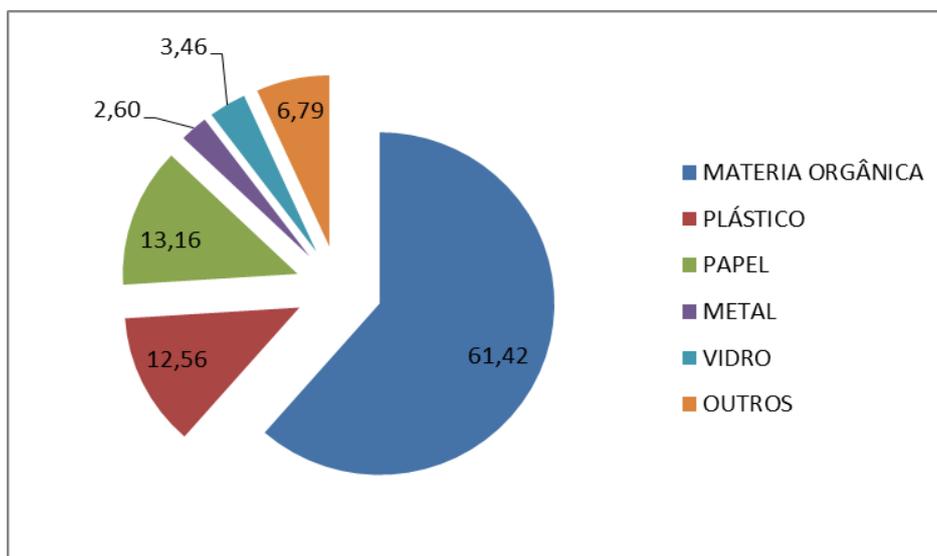


Figura 10: Composição gravimétrica média dos RSU da regional Pampulha.

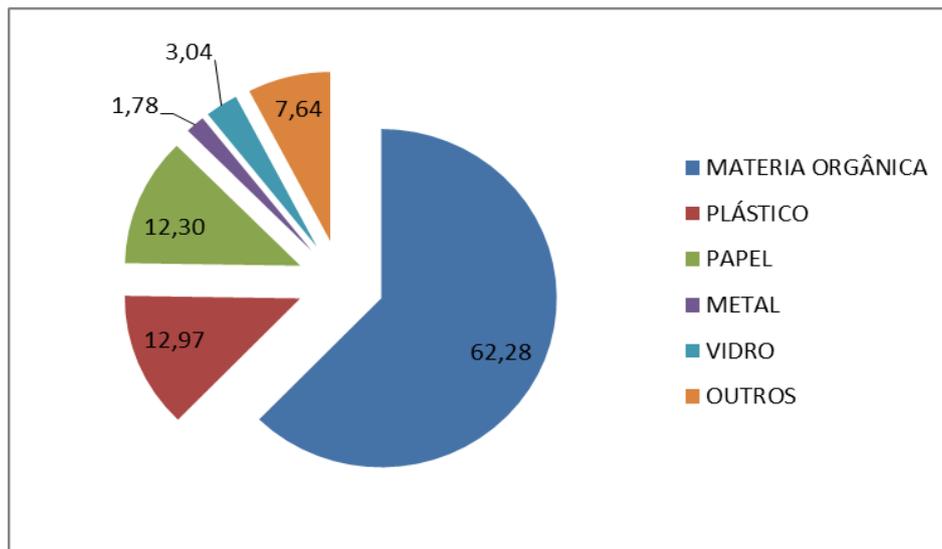


Figura 11: Composição gravimétrica média dos RSU da regional Venda Nova.

Analisando-se os resultados obtidos, não se observou diferença significativa entre os valores obtidos pela SLU (2004) e o obtido nesse trabalho. Cabe ressaltar que foi grande a variabilidade presente na composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos domiciliares e comerciais entre as regionais do município de Belo Horizonte. De maneira geral, constatou-se que os resíduos sólidos urbanos do município de Belo Horizonte são formados, principalmente, de matéria orgânica, papel e plástico corroborando os dados encontrados na literatura (Kathiravale *et al.*, 2003). A presença da matéria orgânica como componente principal corrobora com o observado nos trabalhos de campo realizados.

Determinação do Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder calorífico Inferior (PCI)

Durante a realização do trabalho, observou-se que a determinação do PCS das amostras de resíduos sólidos urbanos de Belo Horizonte (RSU-BH) in natura não era viável operacionalmente, devido ao elevado valor de umidade encontrado nas amostras (aproximadamente 50 a 60%), o qual dificultava todo o processo de preparação da amostra, principalmente o de trituração e moagem. Assim, devido a procedimentos operacionais laboratoriais, foi necessário retirar parcialmente a umidade das amostras até que as mesmas pudessem ser preparadas e apresentassem condições para serem analisadas em bomba calorimétrica para a determinação do PCS. A umidade média das amostras ficou em, *aproximadamente*, 7%. O comportamento médio do PCS do RSU-BH das nove regionais pode ser visualizado nas tabelas 4 a 6, e nas Figuras de 12 a 17.

Tabela 4: Poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) médio dos RSU por regional, por tipo de resíduo e média geral no Município de Belo Horizonte nas 3 campanhas – Regionais Barreiro, Centro-sul e Leste

TIPO DE RESÍDUO	REGIONAL BARREIRO		REGIONAL CENTRO-SUL		REGIONAL LESTE	
	PCS (kcal / kg)	PCI (kcal / kg)	PCS (kcal / kg)	PCI (kcal / kg)	PCS (kcal / kg)	PCI (kcal / kg)
RESIDENCIAL	4725,89	4342,62	5033,31	4708,88	5058,64	4735,66
COMERCIAL	4598,38	4296,23	5385,68	5021,61	5009,72	4498,23
MÉDIA GERAL	4662,14	4319,43	5209,50	4865,24	5034,18	4616,94
Média BH Residencial	4788,35	4469,35	4788,35	4469,35	4788,35	4469,35
Média BH Comercial	4979,06	4639,28	4979,06	4639,28	4979,06	4639,28
Média BH GERAL	4883,70	4554,31	4883,70	4554,31	4883,70	4554,31

Tabela 5: Poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) médio dos RSU por regional e por tipo de resíduo no Município de Belo Horizonte nas 3 campanhas – Regionais Nordeste, Noroeste e Norte

TIPO DE RESÍDUO	REGIONAL NORDESTE		REGIONAL NOROESTE		REGIONAL NORTE	
	PCS (kcal / kg)	PCI (kcal / kg)	PCS (kcal / kg)	PCI (kcal / kg)	PCS (kcal / kg)	PCI (kcal / kg)
RESIDENCIAL	4936,72	4642,51	4887,44	4609,49	4298,10	3996,07
COMERCIAL	4952,59	4645,69	6167,29	5856,08	4107,77	3793,78
MÉDIA GERAL	4944,65	4644,10	5527,36	5232,79	4202,93	3894,93
Média BH Residencial	4788,35	4469,35	4788,35	4469,35	4788,35	4469,35
Média BH Comercial	4979,06	4639,28	4979,06	4639,28	4979,06	4639,28
Média BH GERAL	4883,70	4554,31	4883,70	4554,31	4883,70	4554,31

Tabela 6: Poder Calorífico Superior (PCS) e Inferior (PCI) Médio dos RSU por Regional e por Tipo de Resíduo no Município de Belo Horizonte nas 3 campanhas – Regionais Oeste, Venda Nova e Pampulha

TIPO DE RESÍDUO	REGIONAL OESTE		REGIONAL VENDA NOVA		REGIONAL PAMPULHA	
	PCS (kcal / kg)	PCI (kcal / kg)	PCS (kcal / kg)	PCI (kcal / kg)	PCS (kcal / kg)	PCI (kcal / kg)
RESIDENCIAL	4817,93	4491,39	4751,93	4428,13	4585,18	4269,4
COMERCIAL	4391,3	4145,88	4846,6	4523,75	5352,2	4972,27
MÉDIA GERAL	4604,61	4318,63	4799,26	4475,94	4968,69	4620,83
Média BH Residencial	4788,35	4469,35	4788,35	4469,35	4788,35	4469,35
Média BH Comercial	4979,06	4639,28	4979,06	4639,28	4979,06	4639,28
Média BH GERAL	4883,7	4554,31	4883,7	4554,31	4883,7	4554,31

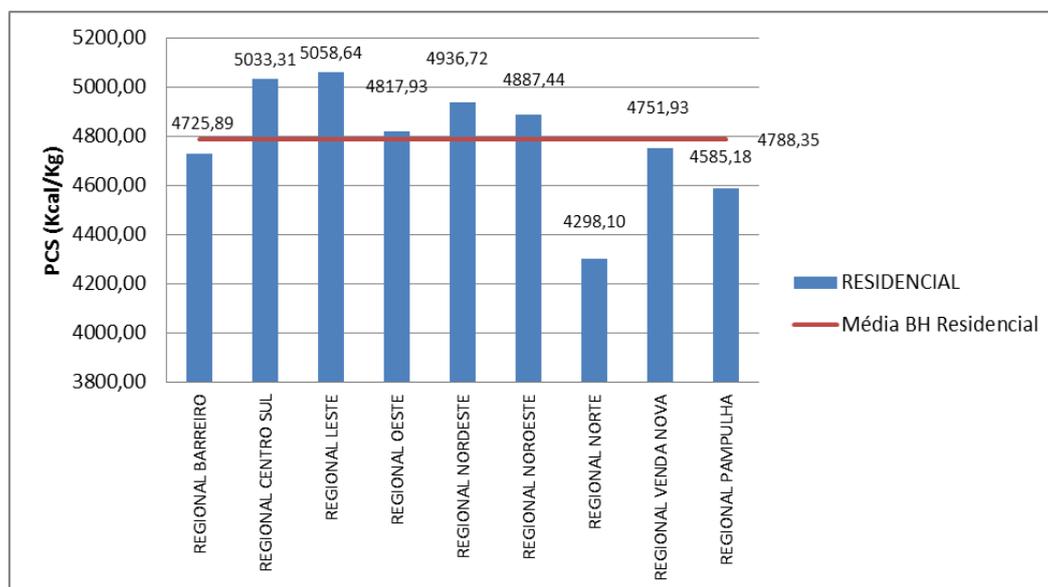


Figura 12: poder calorífico superior dos RSU residencial por regional e geral do Município de Belo Horizonte.

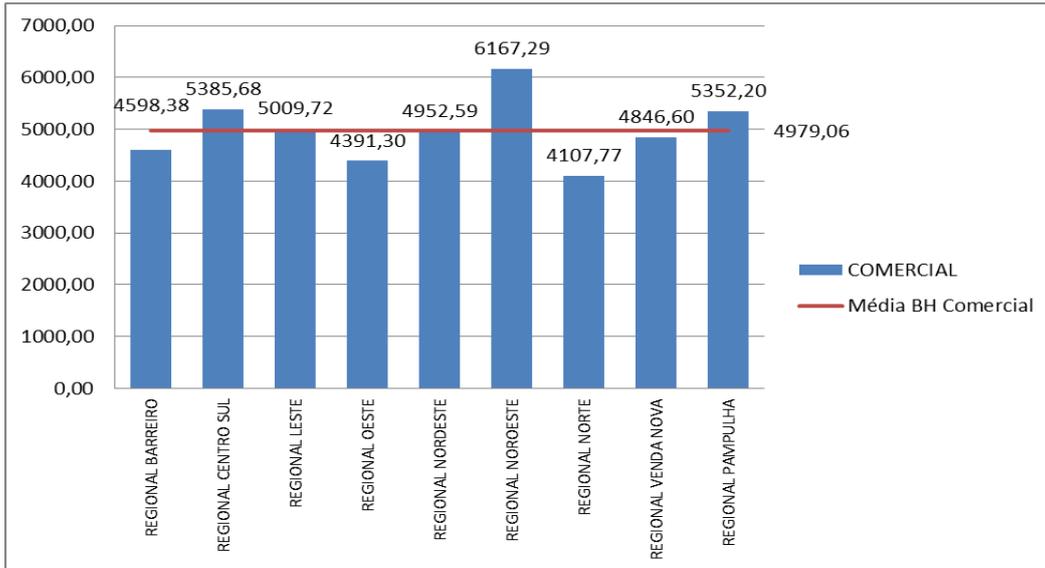


Figura 13: poder calorífico superior dos RSU comercial por regional e geral do Município de Belo Horizonte.

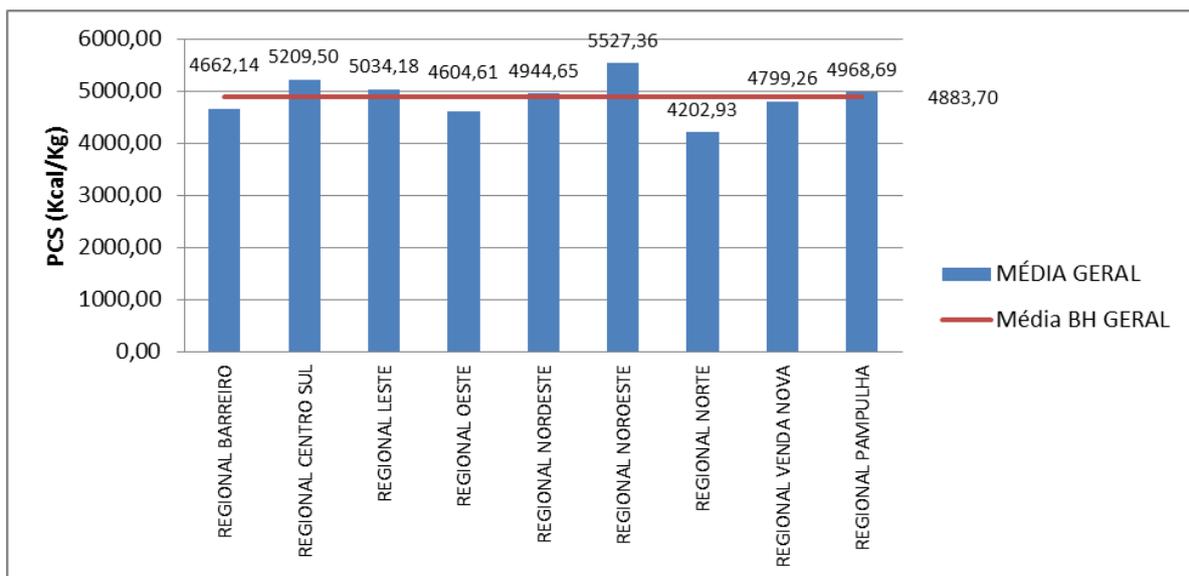


Figura 14: poder calorífico superior (PCS) dos RSU média geral por regional e geral do Município de Belo Horizonte.

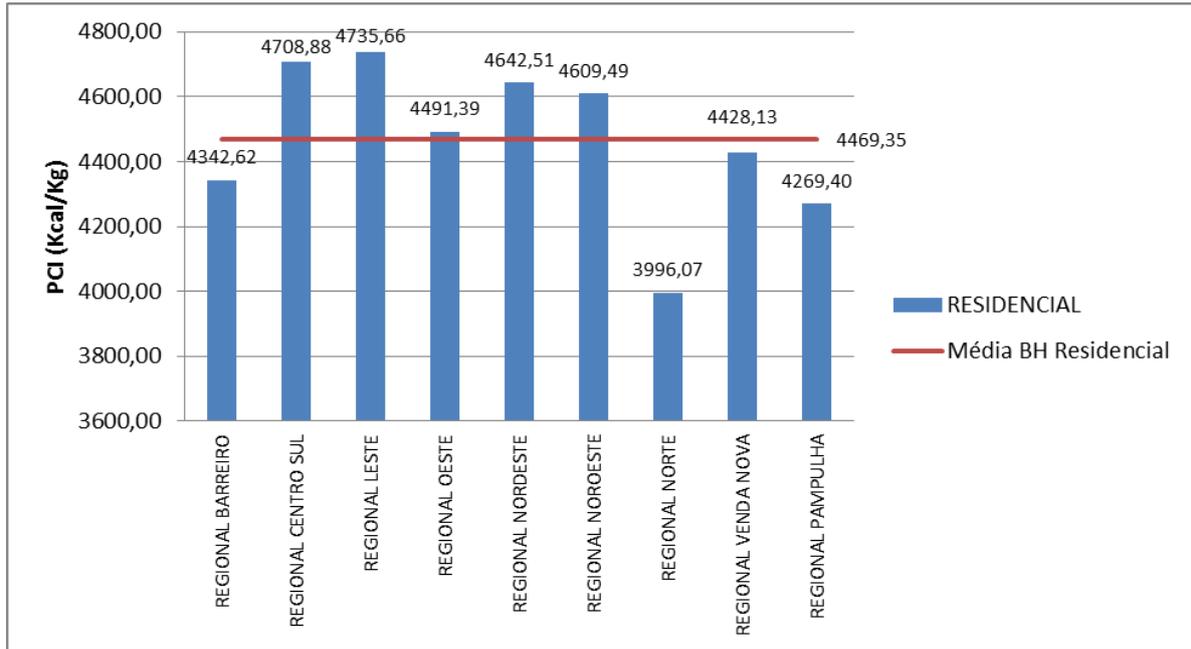


Figura 15: Poder calorífico inferior (PCI) dos RSU residencial por regional e geral do Município de Belo Horizonte.

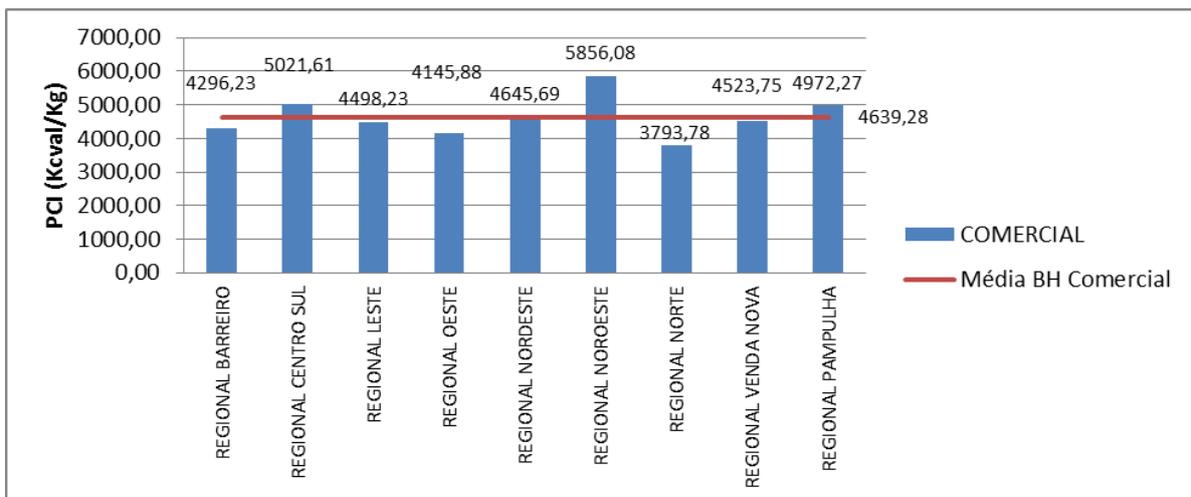


Figura 16: Poder calorífico inferior (PCI) dos RSU comercial por regional e geral do Município de Belo Horizonte.

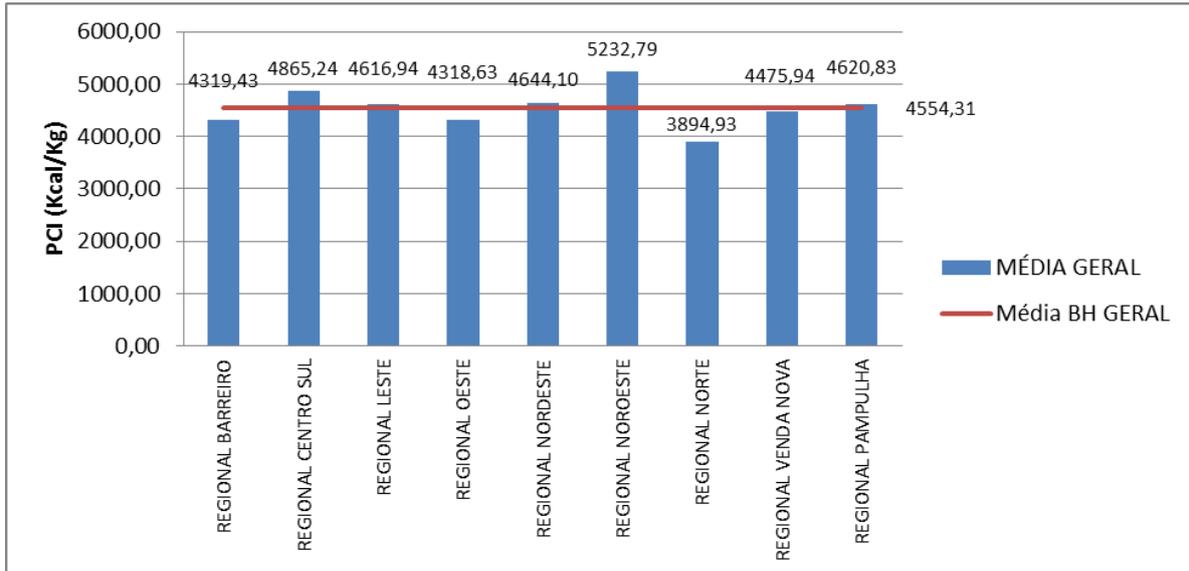


Figura 17: Poder calorífico inferior (PCI) dos RSU média geral por regional e geral do Município de Belo Horizonte.

Analisando-se as figuras de 12 a 17, observou-se, em relação ao PCS residencial, que as regionais Centro-sul (5033,31 kcal/kg) e Leste (5058,64 kcal/kg) apresentam os maiores valores, representando respectivamente 5,6 e 5,1% acima da média estabelecida para o município de Belo Horizonte (4788,35 kcal/kg). Já os menores valores observados foram nas regionais Norte (4298,10 kcal/kg) e Pampulha (4585,18 kcal/kg), representando respectivamente 10,2 e 4,2% abaixo da média estabelecida para Belo Horizonte. No caso do PCI, repetem-se as mesmas regionais para os valores máximos e mínimos, observando-se para as maiores diferenças nas regionais Centro-sul (4708,88 kcal/kg) e Leste (4735,66 kcal/kg) de 5,4 e 6,0% acima da média para Belo Horizonte (4469,35 kcal/kg). Já para as regionais com PCI mais baixo, regionais Norte (3996,07 kcal/kg) e Pampulha (4269,40 kcal/kg), observam-se diferenças de 10,6 e 4,5% abaixo da média estabelecida para Belo Horizonte.

Já para os valores de PCS comercial, observou-se, das figuras, que as regionais Noroeste (6167,29 kcal/kg) e Centro-sul (5385,68 kcal/kg) apresentaram os maiores valores, representando respectivamente 23,8 e 8,2% acima da média estabelecida para o município de Belo Horizonte (4979,06 kcal/kg). Já os menores valores observados foram nas regionais Norte (4107,77 kcal/kg) e Oeste (4391,30 kcal/kg), representando respectivamente 17,5 e 11,8% abaixo da média estabelecida para Belo Horizonte. No caso do PCI, repete-se a mesma tendência com as regionais Noroeste (5856,08 kcal/kg) e Centro-sul (5021,61 kcal/kg) apresentando valores de 26,2 e 8,2% acima da média para Belo Horizonte (4639,28 kcal/kg). Já para as regionais com valores de PCI mais baixos, regionais Norte (3793,78 kcal/kg) e Oeste (4145,88 kcal/kg), foram observadas diferenças de 18,22 e 10,6% abaixo da média estabelecida para Belo Horizonte.

Analisando-se a média geral do PCS (Figuras 14 e 17), observou-se que as regionais Noroeste (5527,36 kcal/kg) e Centro-sul (5209,50 kcal/kg) apresentaram os maiores valores, representando respectivamente 13,2 e 6,7% acima da média estabelecida para o município de Belo Horizonte (4883,70 kcal/kg). Já os menores valores observados foram nas regionais Norte (4202,93 kcal/kg) e Barreiro (4662,14 kcal/kg), representando respectivamente 13,9 e 4,5% abaixo da média estabelecida para Belo Horizonte. No caso do PCI, repetiram-se as mesmas regionais para os valores máximos e mínimos, observando-se as maiores diferenças nas regionais Noroeste (5232,79 kcal/kg) e Centro-sul (4865,24 kcal/kg) de 14,9 e 6,8% acima da média para Belo Horizonte (4554,31 kcal/kg). Já para as regionais com PCI mais baixo, regionais Norte (3894,93 kcal/kg) e Oeste (4319,43 kcal/kg), observam-se diferenças de 14,5 e 5,2% abaixo da média estabelecida para Belo Horizonte.

Comparação dos Valores de PCS Médio das Regionais e do Município de Belo Horizonte com os Modelos Matemáticos baseados na Análise Elementar

A Figura 18 apresenta os valores médios de PCS obtidos experimentalmente (média das regionais e média do município de Belo Horizonte e os valores preditos pelas equações de Dulong, Steuer e Scheurer-Kestner, conforme Kathiravale *et al.*, (2003).

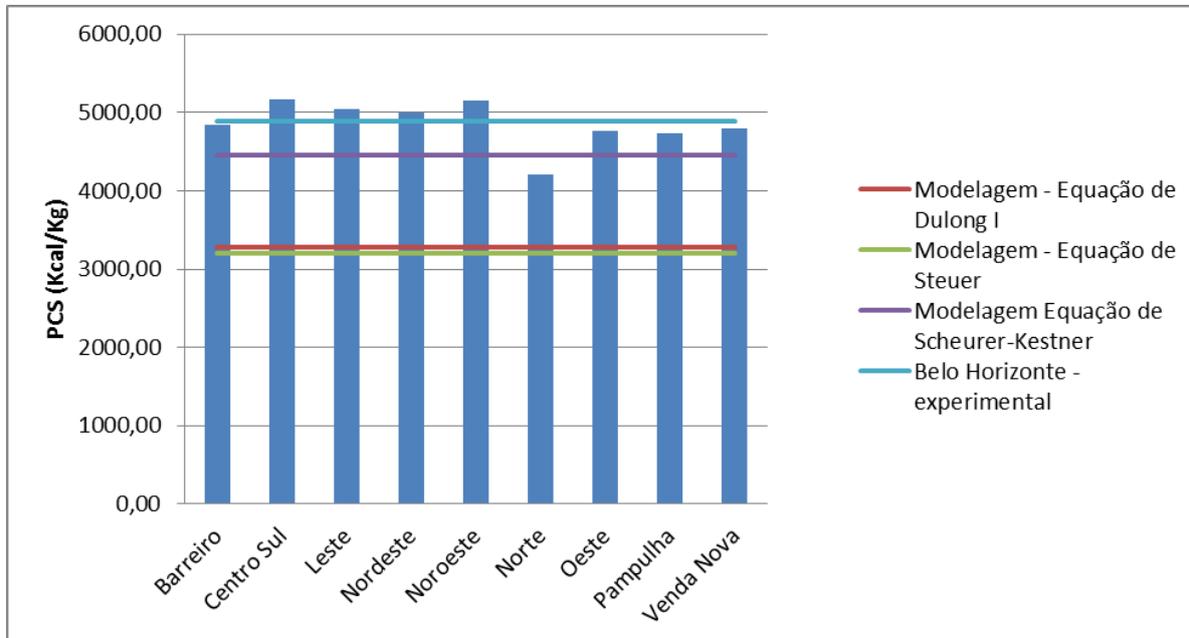


Figura 18: Poder calorífico superior (PCS) obtidos experimentalmente para o município de Belo Horizonte e sua regionais e calculados a partir dos modelos relacionados na literatura.

Analisando-se a figura 18, observou-se que a equação que melhor se ajustou ao valor de PCS médio de Belo Horizonte foi a de Scheurer-Kestner. De acordo com esta equação, o elemento carbono e o elemento hidrogênio foram aqueles que mais contribuíram para o valor estimado, pois apresentam os maiores coeficientes na equação. Desta maneira, ao se analisar a composição média dos resíduos sólidos urbanos comerciais e domiciliares do município de Belo Horizonte, nota-se que os maiores componentes presentes em sua composição física foram a matéria orgânica, seguida por papel e plástico. Além de corroborar a literatura, esse resultado significa que a presença desses materiais contribui positivamente para o aumento do valor de PCS.

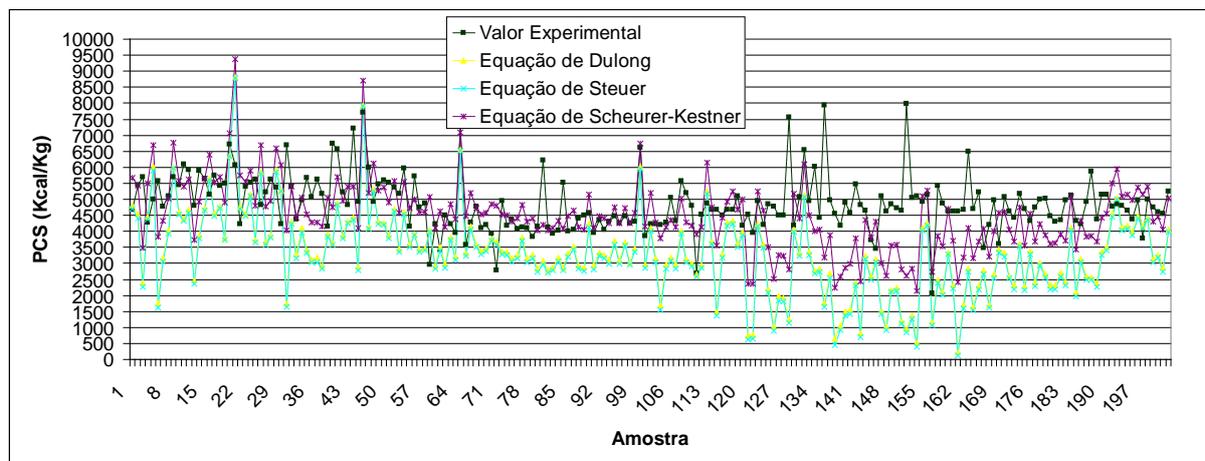


Figura 19: Poder calorífico superior (PCS) obtidos experimentalmente e calculados a partir dos modelos relacionados na literatura para município de Belo Horizonte.

A Figura 19 mostra os valores de PCS determinados experimentalmente e a partir dos modelos desenvolvidos usando dados de análise elementar. Novamente, observou-se a mesma tendência apresentada pelos dados da Figura 18, isto é, os valores de PCS obtidos com a equação Scheurer-Kestner foram os que mais se aproximaram dos valores obtidos experimentalmente no município de Belo Horizonte. Esse fato está relacionado ao coeficiente para o elemento oxigênio presente na equação de Scheurer-Kestner, que apresenta valor alto e negativo, o que contribuiria para a diminuição do valor do PCS. Entretanto, a contribuição conjunta do carbono e do hidrogênio foi mais potente para causar a elevação do PCS.



Figura 20: Média e desvio padrão dos valores do poder calorífico superior (PCS) estimados pelos modelos baseados na composição elementar e obtidos experimentalmente para o município de Belo Horizonte.

O gráfico da Figura 20 apresenta a média e o desvio padrão dos valores médios de PCS estimados pelos modelos baseados na composição elementar e obtidos experimentalmente para o município de Belo Horizonte. Novamente, observa-se que a média e o desvio padrão apresentados pelos dados estimados a partir da equação de Scheurer-Kestner foram os que mais se aproximaram dos valores obtidos experimentalmente no trabalho, corroborando com as análises anteriores. Cabe ressaltar, que a dispersão dos dados é grande devido ao fato de se usar amostras muito pequenas de RSU para a determinação dos valores de PCS, o que compromete a representatividade do mesmo.

CONCLUSÕES

A partir dos dados obtidos pelo presente trabalho, conclui-se que a metodologia proposta para o levantamento do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos de Belo Horizonte se mostrou adequada para este fim, apesar de ainda ser trabalhosa e dispendiosa.

A aplicação dos modelos matemáticos disponíveis na literatura para a determinação do PCS deve ser feita de maneira criteriosa em função das realidades observadas em cada município, visto que a composição desses resíduos está diretamente relacionada ao seu desenvolvimento socioeconômico.

Os valores obtidos de PCS dependem da composição dos componentes presentes nos resíduos sólidos urbanos. No caso do município de Belo Horizonte, a composição geral média do RSU, em sua grande maioria, é formada, principalmente, de matéria orgânica, papel e plástico (aproximadamente 85%). O valor médio de PCS obtido para o município de Belo Horizonte foi de 4900 kcal/kg. Como esses materiais são formados basicamente de carbono e hidrogênio, cujas entalpias de combustão são elevadas, conclui-se que são esses elementos foram os que mais contribuíram para a elevação do valor de PCS obtido para o RSU de Belo Horizonte.

O alto valor do PCS obtido indica que o aproveitamento energético do RSU de Belo Horizonte pode ser viável economicamente, recomendando-se estudos técnicos e econômicos mais aprofundados para comprovar tal viabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASTM D 2015. Gross Calorific value of solid fuel by the adiabatic bomb calorimeter. ASTM. Philadelphia, Pa. USA.
2. Caçado, C. J., Lessa, E. R., Parreira, F.V. Avaliação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos com características domiciliar e comercial da cidade de Belo Horizonte. In: Anais do 24 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte: ABES, 2007.
3. Caçado, C. J., Lessa, E. R., Lopes, V. M. B. Proposta metodológica para determinação do poder calorífico de resíduos sólidos urbanos com enfoque na geração de energia. In: Anais do 25 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Recife: ABES, 2009.
4. Fobil et al (2005). Evaluation of municipal solid wastes (MSW) for utilisation in energy production in developing countries. In: Int. J. Environmental Technology and Management, Vol. 5, No. 1, 2005. p. 66 - 76.
5. Kathiravale et al. (2003). Modeling the heating value of Municipal Solid Waste. In: Fuel. 82 (2003). p. 1119 - 1125.