

# UMA AVALIAÇÃO DAS METODOLOGIAS PARA DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

**Dora de Castro Rubio Poli** – Universidade do Grande ABC - UniABC  
**Márcio Nestor Zancheta** – Universidade do Grande ABC - UniABC  
**Zoroastro de Miranda Boari** – Universidade do Grande ABC - UniABC  
**Nelson Leon Meldonian** – Universidade do Grande ABC - UniABC  
**Claudia Lucia de Moura** – Universidade do Grande ABC - UniABC  
**Paulo Adriano Jiurgiu** – Empresa Metropolitana de Águas e Energia

**RESUMO:** A sociedade moderna vem discutindo há muitos anos o problema do descarte industrial e do lixo domiciliar, cujo acondicionamento em aterros e lixões vem provocando danos à natureza. Para se resolver este problema, seria de bom alvitre que se pensasse em uma combinação de soluções, desde separação de material passível de reciclagem, dando emprego para catadores e também na indústria de reciclagem, até a incineração, a qual teria a função de diminuir o espaço destinado a aterros, para onde só iriam os subprodutos inertes da queima, além de cumprir com o objetivo primordial do país que é de produzir energia elétrica. Neste processo de incineração haveria a necessidade de projetar um sistema eficaz de proteção ambiental, condição essencial para o funcionamento dos incineradores. Este artigo tem por objetivo apresentar uma avaliação das metodologias empregadas para a determinação do poder calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos – RSU, que é considerado o combustível para as plantas de tratamento térmico de resíduos, ou incineradores com aproveitamento do calor da queima para a produção de vapor, para acionamento de turbina, que é acoplada mecanicamente a geradores de eletricidade. Este trabalho faz parte de um projeto maior onde se estabelece a viabilidade técnica, econômica e social da geração de energia elétrica por meio da queima de resíduos sólidos urbanos (RSU), com ênfase na proteção ambiental.

**ABSTRACT:** Modern society has been discussing for many years the problem of disposal of industrial and domestic waste, whose packaging in landfills and dumps has caused damage to nature. To solve this problem, it would be well advised that if he thought of a combination of solutions, since separation of recycling material capable of giving employment for scavenger and also in the recycling industry, by incineration, which would reduce the function of the space for landfills, where they would only inert byproducts of burning, in addition to meeting with the prime objective of the country is to produce electricity. In the incineration process would need to design an effective system of environmental protection, which is essential for the operation of incinerators. This article aims to present a review of the methodologies used for determining the calorific value of municipal solid waste - MSW, which is considered the fuel for the plants of thermal treatment of waste, incinerators or with recovery of heat from burning to produce steam to drive a turbine, which is mechanically coupled to electrical generators. This work is part of a larger project which establishes the technical, economic and social power generation by burning municipal solid waste (MSW), with emphasis on environmental protection.

**PALAVRAS-CHAVE:**  
geração de energia; incineração;  
resíduos.

**KEYWORDS:**  
power generation, incineration,  
waste.

*Artigo Original*  
Recebido em: 10/10/2012  
Avaliado em: 12/06/2013  
Publicado em: 17/06/2014

*Publicação*  
Anhanguera Educacional Ltda.

*Coordenação*  
Instituto de Pesquisas Aplicadas e  
Desenvolvimento Educacional - IPADE

*Correspondência*  
Sistema Anhanguera de  
Revistas Eletrônicas - SARE  
rc.ipade@anhanguera.com

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios para a sociedade brasileira é a destinação dos resíduos urbanos, que vem sendo em grande parte lançados sem controle em determinados locais, acumulados em lixões, aterros, incinerados, ou processados mediante compostagem e outros métodos.

Todos os aterros geram emissões gasosas e um líquido percolado denominado chorume, que podem contaminar a atmosfera, o solo e a água. No entanto, haveria a possibilidade de se aproveitar o gás, produzindo energia. O Brasil, até 2007, aproveitava apenas 2% desse gás gerado nos Aterros Sanitários, como fonte de energia (GLOBAL ENERGY MANAGEMENT, 2010).

A incineração é também uma forma de tratamento de resíduos sólidos, a qual é adotada em muitos países europeus, e também no Japão e nos Estados Unidos (MELDONIAN, 1998; SANTOS, 2011). Esta tecnologia aplicada no aproveitamento dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) se mostra como a principal escolha, sob o ponto de vista da eficiência, na conversão energética (HENRIQUES, 2004). Ressalta-se que o Japão é um exemplo de excelência na reciclagem. Metade do seu fluxo de resíduos é reciclado. Isto inclui 95% dos jornais, 50% de todos os outros papéis e 55% de todos os metais. A separação é feita em casa ou em centros especializados. Da parte não reciclável dos resíduos, dois terços são mandados para um dos 2.000 incineradores e um terço apenas vai para os aterros. As cinzas dos incineradores são enterradas, algumas vezes após terem sido incorporadas a concreto (HINRICHES; KLEINBACH, 2003).

Um dado importante, no trato desta questão, diz respeito ao potencial de geração de energia elétrica por meio da incineração dos RSU no Brasil. Em estudo recente estimou-se tal potencial em 16 GW, valor este bastante representativo considerando-se todas as formas de geração de eletricidade no país. (PAVAN, 2010). A incineração dos RSU reduz sobremaneira os impactos (peso, volume, toxicidade do lixo), porém seus custos de implantação e operação somente a viabilizam para regiões densamente povoadas e com carência de áreas, além de elevado nível econômico. Apresentam ainda emissões com quantidades de substâncias tóxicas formadas durante a combustão que devem ser monitoradas. A economicidade desse processo ainda é questionável no Brasil, pois se admitindo que RSU tenha custo médio estimado equivalente ao dos aterros, de aproximadamente R\$ 60,00 por tonelada de lixo, a energia elétrica teria um custo final de 320,00 R\$/MW – Reais por MWh, para tornar o investimento viável, com amortização em aproximadamente 20 anos segundo KÜTTNER (2010) e MALLONE (2010).

A situação somente é economicamente mais equilibrada quando se utiliza os resíduos para gerar energia elétrica e vender vapor. Nesse caso o investimento em equipamentos é menor, com a implantação do sistema de recebimento e transporte interno do lixo (combustível), sistemas de queima e conversão do calor em vapor na caldeira e tratamento dos

efluentes, com um resultado de rendimento global muito maior. Ainda neste caso é possível a venda de vapor a um custo menor que se produzido por gás natural. A comercialização de vapor em países quentes geralmente somente ocorre para o setor industrial, sendo que em países frios é comum à venda para as residências, o que amplia em muito o mercado consumidor (REIS, 2003).

Uma forma pouco conhecida no Brasil e na América do Sul é a utilização de técnicas de Tratamento Térmico de Resíduos, que é o aproveitamento do valor energético contido no lixo para geração de energia elétrica além do vapor. Tal processo contribui para a preservação do meio ambiente, traz diversos benefícios à sociedade e ainda permite reciclar energia ou utilizar de uma energia que seria acondicionada em aterros sanitários, que pode ser considerada atualmente um desperdício.

Já existem mais de 700 unidades de tratamento em operação no mundo, estando a maioria na Europa, porém na Ásia e nos Estados Unidos tal tecnologia já se encontra aplicada e em operação em menor escala. Na América do Sul não existe nenhuma unidade em operação comercial (USINA VERDE, 2010).

Existe no Rio de Janeiro, na Ilha do Fundão, a Usinaverde, que é um protótipo de unidade de tratamento térmico de Resíduos (MEIO NEWS, 2010).

Apesar das controvérsias sobre a viabilidade econômica da incineração dos RSU, o Plano Nacional de Energia 2030 – PNE 2030 “considera a possibilidade de instalação de até 1.300 MW nos próximos 20 anos em termelétricas utilizando RSU, em uma indicação de que são esperados avanços importantes no aproveitamento energético do lixo urbano”, segundo Nota Técnica da Empresa de Pesquisa Energética – EPE do Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2008).

É importante ressaltar que qualquer projeto nesta área deverá considerar uma combinação de atitudes que vão desde a incineração de material não passível de reciclagem até um programa de reciclagem, que leve em conta a ação e treinamento de catadores, passando por discussões sobre a formação de aterros.

Este artigo tem por objetivo apresentar uma avaliação das metodologias empregadas para a determinação do poder calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos – RSU, que é considerado o combustível para as plantas de tratamento térmico de resíduos, ou incineradores com aproveitamento do calor da queima para a produção de vapor, para acionamento de turbina que é acoplada mecanicamente a geradores de eletricidade.

---

## 2. CONCEITUAÇÃO TEÓRICA DO PODER CALORÍFICO

Nos projetos de aproveitamento energético é importante conhecer a quantidade líquida de energia que pode ser obtida através da queima de um determinado combustível.

Para tanto, é utilizado o conceito de poder calorífico, definido como a energia (bruta, líquida ou sob outra condição pré-definida) disponível em uma unidade de massa de um combustível. Conforme discussão a seguir, serão definidos Poder calorífico Superior e Inferior. Tanto o Poder Calorífico Superior quanto o Inferior são sempre expressos em termos de unidades de Energia [cal, kcal, J, kJ, kWh, BTU, etc.] divididas por unidades de Massa [kg, lb, etc.]. Na literatura, são comumente designados por (*upper / lower*) ou (*gross / net*) *heat value* ou *heat content* (USA) ou *calorific value* (Europa e Ásia).

## 2.1. Poder calorífico do combustível

É definido como a quantidade de calor que é transferida de um calorímetro, onde se realiza a combustão completa da unidade de massa ou volume de um combustível, e sendo o combustível e o ar introduzido no calorímetro em combustão padrão (1 atm, 25 °C), e os produtos de combustão levados à mesma condição padrão (IPT, 2001).

Apesar do Poder Calorífico Superior (PCS) e Inferior (PCI) aparentarem ser parâmetros tecnicamente consagrados e reconhecidos, é importante destacar que todas as metodologias disponíveis são voltadas a materiais homogêneos, não existindo ainda metodologia padronizada e aceita para RSU. Adicionalmente, vários trabalhos e referências cometem inúmeros equívocos conceituais e/ou práticos, decorrentes de má aplicação das definições, utilização de equações incorretas, desconhecimento das condições a que se referem os parâmetros, simplificações indevidas, extrapolação de regras práticas válidas apenas para determinados combustíveis, emprego de teores de Hidrogênio em bases (seca ou úmida) incompatíveis com as equações utilizadas. Estes equívocos tendem a acarretar maiores desvios para combustíveis com elevados teores de umidade, caso específico dos RSU.

Uma vez que o ensaio de PCS em bomba calorimétrica pode ser realizado em amostras totalmente secas ou em qualquer condição de umidade que permita a ignição da amostra (obtendo-se respectivamente PCS seco ou Poder Calorífico Superior dos RSU, na condição de umidade “w” - PCS<sub>w</sub>), podem ocorrer mais desvios decorrentes da utilização equivocada das Equações para cálculo (vide itens de definição de parâmetros e relações entre PCI, PCS, umidade e teor de H). É ainda bastante comum a apresentação, pela literatura, de valores de PCS e/ou PCI, sem referência à condição (seca, in-natura ou parcialmente úmida), o que pode também levar à obtenção de valores indevidos. Além das omissões anteriores, ocorrem ainda na literatura, referências a poder calorífico, *heat value* ou *heat content* (USA) e *calorific value* (Europa e Ásia), sem especificar a condição de superior ou inferior, (*upper / lower*) ou (*gross / net*).

Deve-se ainda salientar também que o PCI, tal como definido e calculado, ainda não representa o parâmetro final para determinação da energia líquida a ser obtida de um determinado combustível (principalmente com elevados teores de cinzas e umidade),

cabendo ainda aos projetistas do ciclo termodinâmico e ao fabricante da caldeira avaliar adequadamente os efeitos da eficiência da combustão, excesso de ar, temperatura de descarga das cinzas, temperatura de saída de gases, teor de umidade (levando em conta que toda a água será expelida pela chaminé, a cerca de 180 °C, o que representa uma apreciável perda de energia).

Considerando-se que o ensaio de PCS parte de uma amostra de cerca de 3 g de material e levando ainda em conta as particularidades dos RSU, muitos questionamentos são levantados quanto à viabilidade e representatividade dos ensaios, sendo que diversos pesquisadores procuram desenvolver metodologias alternativas que confirmem uma maior confiabilidade dos resultados, que são discutidas em item específico do presente trabalho e aparecem resumidas na tabela 1.

TABELA 1: Resumo de metodologia de ensaio de PCS

Método	Referências	Prós	Contras
Queima em caldeira instrumentada	TIRU, 2012 (preferível)	Resultados diretamente voltados para aproveitamento energético  Reproduz condições específicas de campo	Requer existência de caldeira  Requer deslocamento de grande quantidade de RSU – cerca de 100 t  Instrumentação complexa  Influência das características da caldeira
Ensaio único em calorímetro convencional	UCF, 2012 (desde que amostra seja representativa)	Utiliza metodologia específica para determinação de PCI e PCS	Dúvidas quanto à representatividade da amostra de 3 g. Perda de voláteis durante secagem
Ensaio único em calorímetro especial para 2,5 kg	UCF, 2012	Amostra mais representativa que a do calorímetro convencional	Necessita calorímetro especial  Dúvidas quanto à precisão do calorímetro  Perda de voláteis durante secagem
Ensaio por parcelas	ORER, 2004, UCF, 2012, SAGE, 2007,  TIRU, 2012 (alternativa)	Amostras muito mais representativas que as utilizadas nos calorímetros	Requer atribuição de valores de umidade intrínseca e PCSseco para cada parcela da gravimetria, apesar de disponíveis em literatura)
Dedução a partir da composição elementar (Equações de Dulong modificada, Lloyd e Davenport, Boye, etc.)	ASCE, 91		Perda de voláteis durante secagem  Fortes dúvidas quanto à representatividade das amostras utilizadas na análise elementar

Em decorrência do exposto, constatamos que se trata de assunto complexo, cuja condução requer diversas análises, além de boa dose de senso crítico. Descartada a possibilidade da utilização de queima em caldeira instrumentada, a alternativa que proporcionou resultados práticos mais coerentes e consistentes foi a de ensaio por parcelas.

## 2.2. Determinação do Poder Calorífico

A determinação do Poder Calorífico é realizada em um conjunto, composto por uma bomba calorimétrica e um calorímetro, genericamente denominado calorímetro. Uma amostra do combustível é colocada em um cadinho montado dentro de um vaso de pressão (bomba calorimétrica), com volume de 350 ml, dotada de um dispositivo de ignição através de corrente elétrica. A massa da amostra é estimada a partir da equação 1.

$$m_a = 6318 / PCI_a \text{ [ Equação 1 ]}$$

Onde:

$m_a$ : massa da amostra

6318: constante equivalente à energia de 1g da substância-padrão de calibragem do calorímetro (ácido benzóico) [ cal ]

$PCI_a$ : Poder Calorífico Inferior estimado para a amostra [ cal / g ]

No caso do RSU, com Poder Calorífico Inferior estimado em 2.000 cal/g, a massa da amostra seria da ordem de:

$$M_a = 6318 / 2000 = \text{aproximadamente } 3 \text{ g}$$

Após a colocação da amostra, a bomba é hermeticamente fechada e pressurizada com Oxigênio puro a cerca de 25 atm, conforme detalhado na Figura 1.

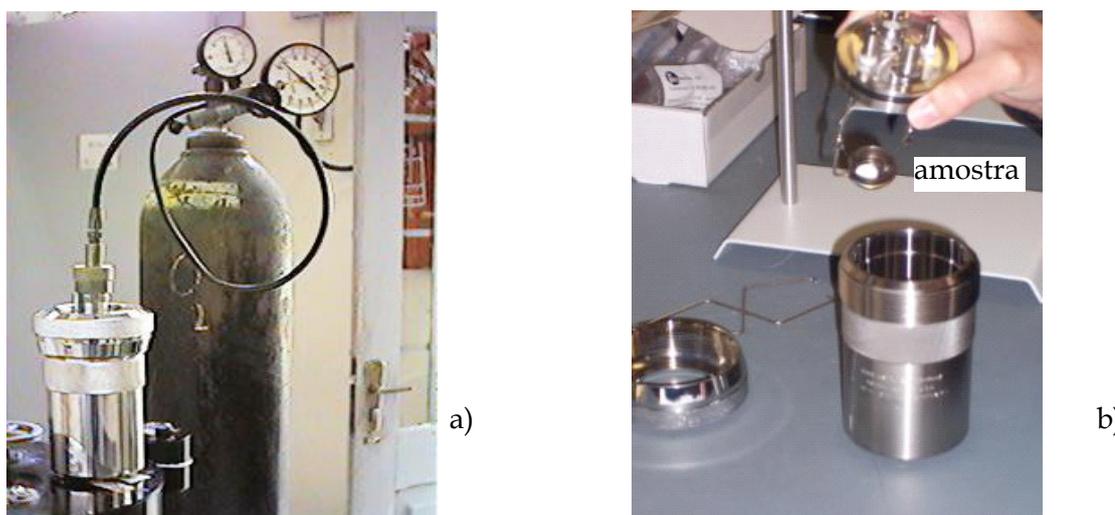


FIGURA 1 - (a) Bomba calorimétrica, com detalhe da tampa, na mão do operador e do cadinho fixado à mesma, preenchido com uma amostra de cor branca (notar o pequeno volume da amostra). (b) Pressurização com Oxigênio a aproximadamente 30 bar

A seguir, a bomba calorimétrica é instalada dentro do calorímetro, composto por um

vaso termicamente isolado do ambiente (adiabático), preenchido com água, dotado de um agitador para homogeneizar a temperatura do conjunto antes da queima e um termômetro de alta precisão, para medir o ganho de temperatura do conjunto, conforme figura 2.

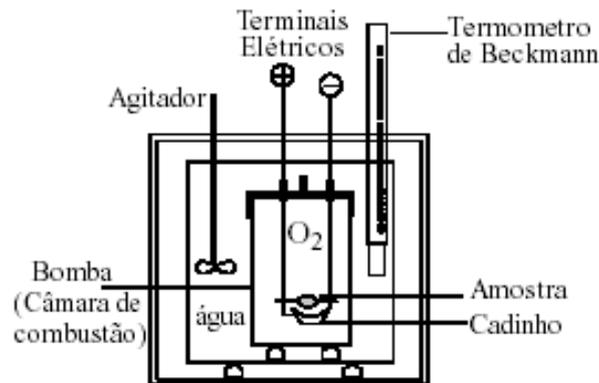


FIGURA 2: Esquema de montagem do calorímetro

A partir do valor esperado para o Poder Calorífico, a temperatura inicial do banho de água é mantida em um valor, de forma que a temperatura de todo o conjunto após a queima seja de 25 °C. A seguir, um pulso elétrico no dispositivo de ignição causa a combustão da amostra, que eleva a temperatura de todo o conjunto. A partir da elevação de temperatura medida com precisão de +/- 0,002 °C, de calibrações prévias com substâncias de Poder Calorífico conhecido, de diversas correções relativas às massas de água, do calorímetro e da bomba calorimétrica, energia de ignição, etc, é medido e calculado o ganho de energia do conjunto. O ganho de energia dividido pela massa da amostra, determinada com precisão de +/- 0,1 mg, resulta no Poder Calorífico Superior.

### 2.3. Poder calorífico superior (PCS)

Segundo definição da ABNT, "Poder Calorífico Superior (calor de combustão total) é o calor liberado pela queima de uma unidade de massa do combustível em uma bomba calorimétrica de volume constante com condensação de toda a água. É expresso em calorias/grama". Nota-se que a definição formal não estabelece as condições de temperatura do combustível e comburente antes da combustão, nem dos produtos após a combustão. Conforme a metodologia de ensaio, levando-se em conta a pequena massa de amostra em comparação com a do calorímetro, pode-se considerar que a temperatura anterior à queima é próxima de 25 °C e que os produtos de combustão sejam resfriados a 25 °C, quando sua temperatura se equilibra com a do calorímetro.

O método de determinação do PCS considera que:

O comburente é o Oxigênio puro a 30 bar, em quantidade mais do que suficiente para garantir uma combustão completa da amostra

O combustível e o comburente estejam a praticamente 25 °C.

O combustível está totalmente seco ou com umidade baixa o suficiente para permitir a ignição e a queima. (Notar que, nesses casos, serão obtidos, respectivamente o PCS seco ou

o PCS in-natura ou PCS<sub>w</sub>)

A combustão ocorre à um volume constante, geralmente de 350 ml

Os gases e as cinzas terminem o processo a 25 °C e 1 atm

Toda a água impregnada no combustível e/ou formada por oxidação do Hidrogênio do combustível termina o processo na forma condensada a 25°C.

Uma vez que os equipamentos comerciais de queima (caldeiras, motores, turbinas a gás) apresentam condições de entrada e saída de produtos bem diferentes das acima, o valor de PCS não é referencia direta para cálculos práticos. Para tal, é utilizado o Poder Calorífico Inferior, com características descritas adiante.

Caso o PCS tenha sido ensaiado em condição diferente da totalmente seca, o PCS seco é calculado conforme equação 2:

$$\text{PCS seco} = \text{PCS}_w / (1-w) \text{ [Equação 2]}$$

onde:

PCS<sub>seco</sub>: Poder calorífico da amostra totalmente seca (kcal/kg).

PCS<sub>w</sub>: Poder Calorífico Superior dos RSU, na condição de umidade “w” (kcal/kg).

w: Teor umidade na condição de ensaio, conforme descrito a seguir (% em massa).

#### 2.4. Teor de umidade

O teor de umidade é obtido a partir de secagem térmica: determina-se a massa total da amostra, que em seguida é submetida a um processo de secagem a 105 °C, com controle periódico da massa. O processo é mantido até que a massa da amostra se estabilize, sendo a seguir calculada a umidade w conforme acima. No caso dos RSU, esse processo pode causar perda de voláteis, acarretando um valor de umidade acima do real, além de uma possível sub-avaliação do PCS, uma vez que esses voláteis não estarão presentes no ensaio. Essa é uma das grandes dificuldades na determinação do PCS e PCI dos RSU. O teor de umidade é calculado através da equação 3.

$$w = m \text{ água} / ( m \text{ cs} + m \text{ água} ) \text{ [Equação 3]}$$

onde

w: teor de umidade (% em massa, expressa entre 0 e 1 )

m cs: massa do combustível seco [ kg ]

m água: massa de água evaporada [ kg ]

#### 2.5. Poder calorífico inferior (PCI):

Segundo definição da ABNT (2004): “Poder Calorífico Inferior (calor de combustão líquido) é o calor liberado pela queima de uma unidade de massa do combustível, a uma pressão constante de uma atmosfera, permanecendo a água no estado vapor. É obtido por cálculo a

partir do Poder Calorífico Superior. Exprime-se em calorias por grama (cal/g)”

Analogamente ao PCS, também mede a energia liberada pelo processo de combustão, porém com os produtos de saída sob condições um pouco mais próximas das reais. Ao contrário do que se poderia imaginar, nem com relação a combustíveis homogêneos e de baixa umidade, não há uma definição formal ou consenso entre as referências consultadas com relação às condições (principalmente temperatura) dos produtos de saída. Com referência à condição de pressão durante a combustão, apenas a ABNT (2004) especifica 1 atm e, ao citar que o PCI é calculado a partir do PCS, não especifica nenhuma correção a partir da pressão de determinação do PCS (30 bar). As condições mais frequentemente encontradas ou deduzidas a partir das referências bibliográficas consultadas são as seguintes:

Os gases e as cinzas terminam o processo a 25 °C e 1 atm (outras referências citam, menos frequentemente, temperaturas de 15,6 °C, 20 °C, 21,1 °C e até 100 °C (CETMG, 2012).

Toda a água impregnada no combustível, no ar de combustão e/ou formada por oxidação do Hidrogênio do combustível sob a forma de vapor a 25 °C. Notar que a água existente como umidade do ar de combustão não altera o PCI, visto que entra e sai do processo sob a forma de vapor a 25 °C.

Conforme comentado em ECS (2012) é importante notar que, principalmente para combustíveis com altos teores de umidade, o estado referido na definição do PCI é hipotético, visto que quantidades significativas de água não se mantêm em equilíbrio na fase vapor a uma pressão de 1 atm e temperatura de 25 °C.

Portanto, apesar de se aproximar um pouco mais de uma situação real, o PCI ainda é um parâmetro matemático (obtido a partir do valor de PCS, de onde se subtraiu a energia de vaporização da água existente e formada). Entretanto, apesar de sua grande distância em relação às condições reais, o PCI é o parâmetro utilizado na caracterização energética de combustíveis, sendo que os demais ajustes às características de cada equipamento são efetuados através do parâmetro parâmetros operacionais e condição específica do RSU empregado.

## 2.6. Balanço de energia no processo real de combustão

Ao se analisar a dinâmica da combustão (queima ou oxidação), verifica-se que, antes da queima, estão presentes:

- Combustível (contendo, entre outros, Hidrogênio e, eventualmente, água impregnada)
- Comburente (ar, com conteúdo de água determinado em função da umidade relativa e temperatura)

Após a queima, são gerados:

- Gases (CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, etc.), oriundos da oxidação do C e N

- Água (em forma de vapor ou líquida), impregnada no combustível, e/ou formada por oxidação do Hidrogênio do combustível. Nas condições reais de combustão, há ainda a água existente como umidade do ar de combustão
- Cinzas, oriundas dos materiais inertes ou produtos de combustão incompleta
- Energia (calor)

Uma vez que o poder calorífico é o resultado de um balanço de energia após e antes da combustão, é necessário padronizar ou fixar as condições de pressão, temperatura e estado físico dos combustíveis, do comburente e dos produtos da combustão.

## 2.7. Secagem externa versus secagem na caldeira

Em qualquer análise sobre aproveitamento energético de RSU e como também ficará evidenciado nesse trabalho, notar-se-á a grande perda de energia representada pela água existente sob a forma de umidade, o que invariavelmente leva o pesquisador a considerar processos de secagem dos RSU antes de sua queima. A seguir serão estimadas as quantidades de energia dispendidas para secagem de 1 kg de água, em processo externo e na própria caldeira:

Secagem em processo externo: (partindo-se de RSU a 20 °C, evaporação e superaquecimento a 110 °C).

$$\text{Aquecimento entre 20 e 100 °C} = m \cdot c \cdot \Delta t = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ kcal/kg °C} \cdot (100-20) = 80,0 \text{ kcal}$$

$$\text{Evaporação} = m \cdot h_{LV} = 1 \text{ kg} \cdot 539,6 \text{ kcal/kg} = 539,6 \text{ kcal}$$

$$\text{Superaquecimento entre 100 e 110 °C} = \Delta h_{\text{vapor}} = 644,2 - 638,9 = 5,3 \text{ kcal}$$

$$\text{Total} = 624,9 \text{ kcal}$$

$$\text{Com rendimento de secagem de 70\%, consumo de energia} = 624,9 / 0,7 = 893 \text{ kcal}$$

Energia que 1 kg de água “subtrai”, caso a evaporação ocorra dentro da própria caldeira e o vapor saia pela chaminé na mesma condição dos gases (180 °C):

$$\text{Aquecimento entre 20 e 100 °C} = m \cdot c \cdot \Delta t = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ kcal/kg °C} \cdot (100-20) = 80,0 \text{ kcal}$$

$$\text{Evaporação} = m \cdot h_{LV} = 1 \text{ kg} \cdot 539,6 \text{ kcal/kg} = 539,6 \text{ kcal}$$

$$\text{Superaquecimento entre 100 e 180 °C} = \Delta h_{\text{vapor}} = 677,3 - 638,9 = 38,4 \text{ kcal}$$

$$\text{Total} = 658,0 \text{ kcal}$$

Ou seja, a perda de energia seria maior na secagem através de processo externo. Isso se explica pelo fato de que as maiores parcelas de energia são as correspondentes ao aquecimento e evaporação, que ocorrem em ambos os processos. Portanto, a princípio, e desde que tecnicamente viável, o mais adequado seria fazer a secagem dentro da própria caldeira. Um acréscimo de investimento em dutos e ventiladores da caldeira para a condução dessa massa de vapor ainda deve ser menor que o investimento e O&M da planta de secagem, dispêndio adicional de energia durante toda a “vida” do empreendimento,

além de dificuldades quanto a odores e impactos referentes à água separada em instalação interna.

## 2.8. Rendimento térmico da caldeira e da planta

Conforme comentado, apesar das condições adotadas na definição PCI se aproximarem um pouco mais das encontradas em equipamentos reais (caldeiras, motores, etc.), as temperaturas e estados físicos dos produtos de saída são ainda bastante diferentes. Então, é definido o Rendimento térmico da caldeira ( $\eta_{\text{caldeira}}$ ), Equação 4:

$$P_{\text{caldeira}} = \eta_{\text{caldeira}} * m * \text{PCIw} \text{ [Equação 3]}$$

onde:

$P_{\text{caldeira}}$ : Potencia líquida efetivamente recuperada na caldeira [ kcal/s ] = ,

$\eta_{\text{caldeira}}$  = rendimento térmico da caldeira (porcentagem, expressa entre 0 e 1)

$m$  = vazão em massa do combustível (kg/s)

$\text{PCIw}$  = Poder Calorífico Inferior dos RSU, na condição de umidade “w” (kcal/kg).

ou ainda:

$$\eta_{\text{caldeira}} = P_{\text{caldeira}} / ( m * \text{PCIw} ) \text{ [Equação 4]}$$

Para que o cálculo da energia líquida recuperada seja consistente e representativo da performance do equipamento, é preciso que o valor de rendimento informado pelo fabricante tenha sido calculado com bases compatíveis às metodologias e referências utilizadas na determinação do Poder Calorífico. Nos combustíveis usuais e com baixos teores de umidade (óleo, gasolina, gás, etc.), onde as bases de cálculo do Poder Calorífico são relativamente normatizadas, isso já ocorre.

Para o caso específico do RSU, onde ainda não há uma normatização internacionalmente aceita, nem para condições iniciais e finais no cálculo do PCI, nem para cálculo de rendimento, é imprescindível o contato do projetista da caldeira com executante dos ensaios de PCI, de forma a possibilitar um pleno entendimento das bases de cálculo, garantindo uma compatibilidade e homogeneidade de critérios.

Na determinação do rendimento térmico da caldeira, devem ainda ser levados em conta, além do  $\text{PCIw}$  e da umidade dos RSU:

- Temperatura, umidade e pressão do ar de combustão;
- Excesso de ar;
- Eficiência de queima;
- Composição e temperatura dos gases de saída;
- Composição e temperatura das escórias e cinzas;
- Temperatura de água de alimentação;
- Temperatura e pressão do vapor;

- Vazões, temperaturas e pressões de drenagens contínuas e intermitentes;
- Perdas por radiação e convecção nas paredes e superfícies

Complementarmente, na determinação do rendimento térmico global da planta, devem ainda ser levados em conta, além do rendimento da caldeira:

- Temperatura e pressão do vapor
- Rendimento da turbina
- Temperaturas de água de resfriamento (para o caso de condensador em circuito aberto)
- Temperaturas de bulbo úmido do ar ambiente (para o caso de condensador em circuito fechado com torre úmida de resfriamento)
- Temperaturas do ar ambiente (para o caso de condensador em circuito fechado com torre seca de resfriamento ou condensador a ar)
- Rendimento do gerador
- Perdas em barramentos, condutores e outros equipamentos elétricos
- Consumo de energia nos auxiliares
- Perdas por radiação nas tubulações e superfícies dos equipamentos

Quando se diz que um aproveitamento energético típico de RSU é de 0,5 MWh por tonelada de RSU com PCI de 2000 kcal/kg, o rendimento global da planta é de:

$$D_{\text{planta}} = E_{\text{líquida}} / E_{\text{combustível}} = 0,5 \text{ MWh} * 859845,2 \text{ kcal/MWh} / (1000 \text{ kg} * 2000 \text{ kcal/kg}) = 21,5\%.$$

Notar o valor extremamente baixo de rendimento global da planta se comparado com o de uma Unidade termoeletrica convencional a gás (entre 28 e 35%) ou em ciclo combinado (entre 48 e 55%). Isso se deve, em grande parte, à umidade dos RSU, às baixas temperaturas de vapor (limitadas a 400 °C, por problemas de corrosão) e às baixas pressões associadas às temperaturas (da ordem de 40 bar).

## 2.9. Relações entre PCI, PCS, teores de umidade e de Hidrogênio

### Combustíveis com baixos teores de umidade

Inicialmente, sem considerar a água adicional formada pelo Hidrogênio do combustível, nem a oriunda da umidade relativa do ar de combustão e considerando que a temperatura de equilíbrio antes da condensação seja igual à do ambiente (25 °C), a maioria das referências aceita, para combustíveis com baixos teores de umidade ( $w < 0,03$ ), Equação 5:

$$PCI_w = PCS_{\text{seco}} - w * h_{LV} \text{ [Equação 5]}$$

Onde:

PCI<sub>w</sub>: Poder Calorífico Inferior dos RSU, na condição de umidade “w” (kcal/kg).

PCS<sub>seco</sub>: Poder Calorífico Superior da amostra totalmente seca (kcal/kg).

w: Teor de umidade da amostra (% em massa, expressa entre 0 e 1)

hLV: entalpia de vaporização da água a 25 °C (kcal/kg)

Ou seja, nessa simplificação,

PCI<sub>w</sub> = [ energia total da fração seca ] - [entalpia (energia) de vaporização da água impregnada no combustível, a 25 °C]

### Combustíveis com elevados teores de umidade

Para o caso de combustíveis com apreciáveis quantidades de água ( w > 0,03 ), o valor do PCI<sub>w</sub> passa a ser calculado através da equação 6:

$$\text{PCI}_w \text{ [ kcal/kg ]} = (1 - w) * \text{PCS}_{\text{seco}} - w * 584,2 \text{ [Equação 6]}$$

Onde:

PCI<sub>w</sub>: Poder Calorífico Inferior dos RSU, na condição de umidade “w” (kcal/kg).

w: Teor de umidade da amostra (% em massa, expressa entre 0 e 1)

PCS<sub>seco</sub>: Poder Calorífico Superior da amostra totalmente seca (kcal/kg).

584,2: hLV, ou Entalpia de vaporização da água a 25 °C ( 584,2 kcal/kg ) - para unidades em [kJ/kg], a constante 584,2 deve ser substituída por 2441

Ou seja, considerando os aspectos acima,

PCI<sub>w</sub> = [energia total da fração seca] - [entalpia (energia) de vaporização da parcela de água impregnada no combustível]

### Influência do conteúdo de Hidrogênio

A maioria dos combustíveis apresenta Hidrogênio em sua composição, o qual, durante a combustão, reage com o oxigênio, gerando uma quantidade adicional de água. Define-se teor de Hidrogênio em base seca do combustível (Equação 7):

$$H = m \text{ hidrogênio} / m \text{ cs} \text{ [Equação 7]}$$

Onde:

H: teor de Hidrogênio em base seca do combustível (porcentagem, expressa entre 0 e 1)

m hidrogênio: massa de Hidrogênio [kg]

m cs: massa do combustível seco [kg]

Uma vez que, durante a combustão, este Hidrogênio gera água, uma relação mais precisa entre PCI e PCS, levando em conta este fator e os anteriormente citados, considerando

que todo o Hidrogênio se converta em água e que cada grama de Hidrogênio no combustível gera estequiometricamente 9,0 g de água, é a seguinte:

$$PCI_w \text{ [ kcal/kg ]} = (1 - w) * PCS_{seco} - w * 584,2 - (1 - w) * 9 * H * 584,2 \text{ ou ainda:}$$

$$PCI_w \text{ [ kcal/kg ]} = (1 - w) * PCS_{seco} - [(1-w) * 9 * H + w] * 584,2 \text{ [Equação 8]}$$

Onde:

PCI<sub>w</sub>: Poder Calorífico Inferior dos RSU, na condição de umidade “w” (kcal/kg).

PCS<sub>seco</sub>: Poder Calorífico Superior da amostra totalmente seca (kcal/kg).

w: Teor de umidade da amostra (% em massa, expressa entre 0 e 1)

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

584,2: Entalpia de vaporização da água, a 25 °C [kcal/kg]- para unidades em [ kJ/kg ], a constante 584,2 deve ser substituída por 2441.

Ou seja, nessa visão completa, PCI<sub>w</sub> = [ energia total da fração seca ] - [ entalpia (energia) de vaporização da parcela de água impregnada no combustível ] - [ entalpia (energia) de vaporização da água adicional formada pelo Hidrogênio. Essa é a equação a ser utilizada para os RSU, que contem elevadas quantidades de água e consideráveis teores de Hidrogênio.

### Resumo das relações entre PCI, PCS, teor de umidade e teor de Hidrogênio para os RSU

Na figura 2 procura-se demonstrar as relações entre PCS seco, PCI seco, PCS in-natura e PCI in-natura. Simultaneamente, fica clara a necessidade do esclarecimento a respeito das condições e estados aos quais se refere um determinado valor de Poder Calorífico, o que muitas vezes não ocorre em trabalhos e literaturas:

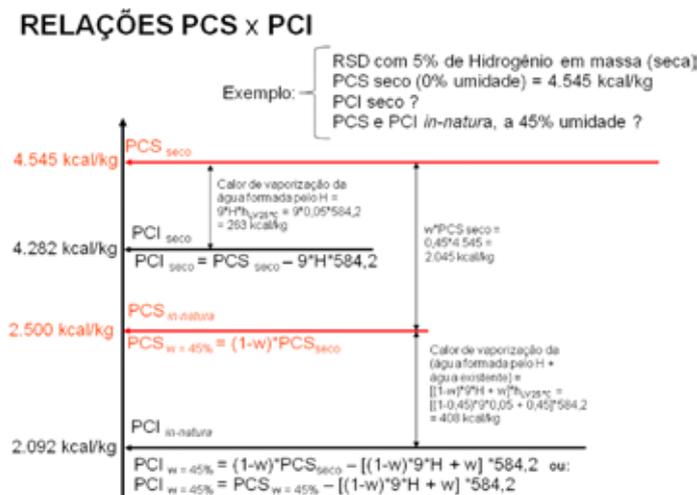


Figura 2 - Relações entre PCS seco, PCI seco, PCS in-natura e PCI in-natura

## 3. METODOLOGIAS PARA DETERMINAÇÃO DO PCI DOS RESÍDUOS

Os fatores acima elencados dificultam a determinação de valores efetivamente

representativos de PCI, o qual, entretanto, é fundamental para o desenvolvimento de projetos de recuperação energética. Até onde temos conhecimento, o único procedimento normalizado e internacionalmente aceito para determinação do PCI é uma norma da comunidade Europeia [CEN/TS 15400:2006], relativa a Resíduos Processados, também conhecidos como Combustível Derivado de Resíduos (CDR), bastante diferentes dos RSU in-natura. Visando a estimativa e cálculo do PCI e, em vista das dificuldades inerentes e anteriormente mencionadas, foram desenvolvidos diversos métodos, cujas descrições e características são apresentadas a seguir:

### **3.1. Queima em caldeira instrumentada**

Indubitavelmente, trata-se do método mais efetivo e preciso. Consiste no envio de uma quantidade elevada de RSU (da ordem de 100 toneladas) a uma planta já existente, para queima e geração de uma carga estável durante cerca de 5 horas. Simultaneamente, a caldeira e a planta são instrumentadas em função dos tipos de dados desejados, de forma que a planta funcione como um calorímetro em escala real. Mais do que dados de PCS e PCI, essa alternativa fornece resultados finais, diretamente voltados para o aproveitamento energético, reproduzindo condições específicas de campo. As desvantagens da alternativa são as de requerer uma instalação já em funcionamento, o que restringe sua aplicação a Europa, parte dos USA e da Ásia, necessitar o deslocamento de uma grande quantidade de RSU, além de ser influenciada pelas características da caldeira.

### **3.2. Ensaio único em calorímetro convencional**

O lote a ser amostrado é homogeneizado através de técnicas de quarteamento ou equivalentes. A amostra é submetida a secagem em estufa a 105 °C por 12 horas (IUPAC, 1991), ou até que a massa se estabilize (ORER, 2004), para determinação do teor de umidade. Metais, vidros e materiais duros são separados, sem desprezar sua participação na composição da amostra. Em seguida, seus constituintes são sucessivamente fragmentados, moídos e homogeneizados através de processos mecânicos, extraindo-se um corpo de prova de cerca de 3g, na forma de partículas da ordem de 0,5 mm, representativo da composição do lote e em condições que possibilitem o ensaio em um calorímetro. O valor final do PCI é calculado a partir de correções em função da umidade e composição química. A vantagem da alternativa é a de corresponder teoricamente à metodologia padrão de determinação de PCS e PCI, enquanto que as desvantagens e dificuldades residem nas sérias dúvidas quanto à representatividade de um corpo de prova de apenas 3g, além de possíveis perdas de voláteis durante a secagem, perdas de materiais e alterações de propriedades durante a moagem.

### 3.3. Ensaio único em calorímetro de alta capacidade

No tocante à representatividade de um corpo de prova de apenas 3g, a Referência IUPAC (1991) é um interessante trabalho onde os autores desenvolveram um calorímetro com capacidade para ensaiar corpos de prova com 2,5 kg e compararam os resultados com os de um calorímetro convencional, para 3g. Foi concluído que os resultados são idênticos (dentro de +/- 2%), desde que as amostras utilizadas em ambos os processos sejam realmente representativas. Apesar de melhorar a representatividade (2,5 kg em relação a 3g), a alternativa ainda apresenta as mesmas possibilidades de perdas de voláteis durante a secagem, perdas de materiais e alterações de propriedades durante a moagem, acrescidas de dúvidas quanto à precisão de um calorímetro especialmente desenvolvido para essa finalidade.

### 3.4. Ensaio por parcelas

Para cada componente da gravimetria, são ensaiados ou assumidos, com base em literatura, valores de umidade intrínseca e de PCS seco. Em seguida, o PCS seco da amostra I é calculado a partir da somatória das [% em massa seca do componente x PCS seco do componente]. Então, o PCI<sub>w</sub> da amostra é calculado a partir do teor de umidade e de Hidrogênio (em base seca).

Para essa alternativa é conveniente uma gravimetria mais detalhada, principalmente em relação aos componentes com influencia significativa no poder calorífico: papéis (papelão, jornal, revistas, impressos, embalagens longa vida) e plásticos (polietileno, polietileno tereftalato, PVC, polipropileno, poliestireno, isopor, filmes), visto que há significativas variações de poder calorífico entre estas parcelas, além de madeiras, couros, têxteis e borrachas. A vantagem dessa alternativa é uma melhor representatividade da amostra, visto que análises gravimétricas são relativamente simples e podem ser feitas grandes volumes de amostras. As desvantagens são a necessidade de atribuir valores arbitrários à umidade intrínseca e PCS seco para cada componente da amostra, ainda que consubstanciados por farta literatura. Por exemplo, apesar de a literatura fornecer valores de PCS seco para um polietileno, existe a possibilidade de que parte do material enquadrado na gravimetria como polietileno não corresponda exatamente ao material citado na literatura.

Outra variante dessa metodologia consiste em se assumir, para cada componente, valores de umidade intrínseca teores de Hidrogênio (de literatura ou ensaiados), calcular o respectivo PCI e estimar o PCI total a partir da soma ponderada dos PCIs dos componentes. Essa variante fornece resultados praticamente idênticos ao método anteriormente descrito.

### 3.5. Dedução a partir da composição elementar

Os valores de PCS seco, podem também ser deduzidos a partir da composição elementar da amostra (em base seca), a partir de diversas equações. Basicamente essas equações levam

em conta as entalpias de oxidação dos elementos que liberam energia durante a combustão. O PCI<sub>w</sub> pode então ser calculado a partir da umidade e do teor de Hidrogênio em base seca. Existe uma grande variedade de equações, muitas das quais parcial ou totalmente empíricas e frequentemente desenvolvidas para aplicação em um determinado combustível. Portanto, uma análise detalhada deve preceder a sua utilização, com o devido cuidado no sentido de utilizar a composição em base seca. As desvantagens dessa alternativa são as de requerer análise elementar em base seca, incorrendo em todas as incertezas da secagem, além de fortes dúvidas quanto à representatividade da amostra para análise elementar em espectrógrafos (quantidades ainda menores que as utilizadas nos calorímetros). As equações mais comumente aplicadas aos RSU são apresentadas a seguir:

### Equação de Dulong modificada

Os valores de PCS seco podem ser obtidos a partir da equação de Dulong modificada:

$$\text{PCS}_{\text{seco}}[\text{kcal/kg}] = 7831 \cdot \text{C}_{\text{org}} + 35932 \cdot (\text{H} - \text{O}/8) + 2212 \cdot \text{S} - 3545 \cdot \text{C}_{\text{inorg}} + 1187 \cdot \text{O} + 578 \cdot \text{N}$$

onde:

C<sub>org</sub>: % em massa e em base seca de Carbono orgânico, expressa entre 0 e 1

H: % em massa e em base seca de Hidrogênio, expressa entre 0 e 1

O: % em massa e em base seca de Oxigênio, expressa entre 0 e 1

S: % em massa e em base seca de Enxofre, expressa entre 0 e 1

C<sub>inorg</sub>: % em massa e em base seca de Carbono inorgânico, expressa entre 0 e 1

N: % em massa e em base seca de Nitrogênio, expressa entre 0 e 1

Na equação de DuLong modificada consta uma parcela referente ao carbono inorgânico (C<sub>inorg</sub>), que corresponde ao Carbono mineralizado, principalmente sob a forma de carbonatos, que não participa da combustão e se incorpora nas cinzas.

Uma vez que a fração de Cinog se situa normalmente entre 0,8 e 1%, sua influencia é bastante pequena – da ordem de 32 kcal em relação a um total de cerca de 3.500. Portanto, ainda que esse parâmetro não tenha sido ensaiado, a parcela 3545\* Cinog será considerada igual a 32 kcal/kg.

Em função das observações acima e da Equação 8, o valor de PCI<sub>w</sub> a partir da equação de Dulong modificada é dada pela equação 9.

$$\text{PCI}_w [\text{kcal/kg}] = (1-w) \cdot [7831 \cdot \text{C}_{\text{org}} + 35932 \cdot (\text{H} - \text{O}/8) + 2212 \cdot \text{S} + 1187 \cdot \text{O} + 578 \cdot \text{N} - 32] - [(1-w) \cdot 9 \cdot \text{H} + w] \cdot 583,2 \quad [\text{Equação 9}]$$

onde:

PCI<sub>w</sub>: Poder Calorífico Inferior dos RSU, na condição de umidade “w” (kcal/kg).

C<sub>org</sub>: % em massa e em base seca de Carbono orgânico, expressa entre 0 e 1

H: % em massa e em base seca de Hidrogênio, expressa entre 0 e 1

O: % em massa e em base seca de Oxigênio, expressa entre 0 e 1

S: % em massa e em base seca de Enxofre, expressa entre 0 e 1

N: % em massa e em base seca de Nitrogênio, expressa entre 0 e 1

### Equação de Lloyd e Davenport

Os valores de PCS seco, podem ser obtidos a partir da composição elementar, através da equação de Lloyd e Davenport:

$$\text{PCS seco [kcal/kg]} = 8546 \cdot C + 27126 \cdot H - 2018 \cdot O + 1419 \cdot N + 2672 \cdot S$$

Em função da Equação 8, o valor de PCI<sub>w</sub> a partir da equação de Lloyd e Davenport é dada pela equação 10.

$$\text{PCI}_w \text{ [kcal/kg]} = (1-w) \cdot [8546 \cdot C + 27126 \cdot H - 2018 \cdot O + 1419 \cdot N + 2672 \cdot S] - [(1-w) \cdot 9 \cdot H + w] \cdot 583,2 \text{ [Equação 10]}$$

onde:

PCI<sub>w</sub>: Poder Calorífico Inferior dos RSU, na condição de umidade “w” (kcal/kg).

C: % em massa e em base seca de Carbono, expressa entre 0 e 1

H: % em massa e em base seca de Hidrogênio, expressa entre 0 e 1

O: % em massa e em base seca de Oxigênio, expressa entre 0 e 1

N: % em massa e em base seca de Nitrogênio, expressa entre 0 e 1

S: % em massa e em base seca de Enxofre, expressa entre 0 e 1

### Equação de Boye

Os valores de PCS seco podem ser obtidos a partir da composição elementar, através da equação de Boye:

$$\text{PCS seco [kcal/kg]} = 8400 \cdot C + 27766 \cdot H - 2649 \cdot O + 1500 \cdot N + 2672 \cdot S$$

Em função da Equação 8, o valor de PCI<sub>w</sub> a partir da equação de Boye é dada pela equação 11.

$$\text{PCI}_w \text{ [kcal/kg]} = (1-w) \cdot [8400 \cdot C + 27766 \cdot H - 2649 \cdot O + 1500 \cdot N + 2672 \cdot S] - [(1-w) \cdot 9 \cdot H + w] \cdot 583,2 \text{ [Equação 11]}$$

Onde:

PCI<sub>w</sub>: Poder Calorífico Inferior dos RSU, na condição de umidade “w” (kcal/kg).

C: % em massa e em base seca de Carbono, expressa entre 0 e 1

H: % em massa e em base seca de Hidrogênio, expressa entre 0 e 1

O: % em massa e em base seca de Oxigênio, expressa entre 0 e 1

N: % em massa e em base seca de Nitrogênio, expressa entre 0 e 1

S: % em massa e em base seca de Enxofre, expressa entre 0 e 1

## 4. A COMPLEXIDADE DA DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

As determinações de valores representativos e confiáveis de Poder Calorífico constituem as análises mais importantes e de maior complexidade, para fins de aproveitamento energético de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), em função das seguintes características dos mesmos:

**Alta heterogeneidade:** Os RSU podem conter desde materiais orgânicos a produtos químicos e medicamentos, passando por diversos tipos de papel, plásticos, materiais de construção, solventes, etc. Ressalte-se que já foi encontrado até Césio em um depósito de sucata em Goiânia, com trágicas consequências, amplamente noticiado.

**Diversidade de dimensões dos componentes:** variando desde poeiras até carcaças de eletrodomésticos, móveis, entre outros;

**Macrocomposição (gravimetria), composição elementar e demais propriedades físico-químicas extremamente variáveis,** sujeitas ainda a sazonalidades, tais como período de férias em cidades litorâneas, usos e costumes dos locais, como por exemplo, alto consumo de água de coco com descarte da casca, incidência de coleta seletiva, ação de catadores, lançamento clandestino de resíduos de construção (inertes) e restos de podas nos caminhões de RSU, descarte irregular de pilhas, baterias, lâmpadas, aerosóis etc.

**Valores elevados e variáveis de umidade,** em função de costumes locais, regime pluviométrico, tipos de equipamentos e metodologias de coleta e manuseio;

**Macrocomposição e demais propriedades variando ao longo do tempo,** em função de características, hábitos e costumes locais, etc. Este aspecto dificulta o projeto de plantas com vida útil da ordem de 20 a 25 anos;

**A macrocomposição apresenta forte relação com o nível econômico, PIB ou renda per-capita da região estudada.** Regiões de baixo poder aquisitivo tendem a apresentar elevados teores de orgânicos, enquanto que as de alta renda apresentam elevados teores de plásticos e papel (apesar da coleta seletiva ser mais praticada no segundo caso). Isso faz, por exemplo, com que o PCI em algumas regiões da China seja da ordem de 1,000 kcal/kg e no Norte da Europa atinja 4.000 kcal/kg;

**Dificuldades de amostragem,** no tocante à obtenção dos intervalos de confiança requeridos. Em termos práticos o número de amostras e ensaios ficam, de alguma forma, limitado pelos custos envolvidos;

**Dificuldades na obtenção e tratamento das amostras,** tais como preservação da umidade até a realização de ensaios, falta de critérios normatizados para a gravimetria – por exemplo, o componente fralda descartável apresenta material orgânico associado a fibras sintéticas. Não há consenso (nem viabilidade) em se separar total ou parcialmente em orgânico e fibras ou assumir como categoria em separado. Por outro lado, alguns trabalhos separam grosseiramente o total de plásticos apenas de acordo com os critérios “mole” ou

“duro”, enquanto que outros já separam por tipos de plástico (PET, PP, PEAD, PEBD, PVC, etc.). Nesse caso, outro questionamento reside na capacitação do profissional de triagem em efetuar essa diferenciação, nem sempre muito fácil;

Eventual descaracterização ou modificação das amostras durante o preparo para os ensaios, tais como perda de voláteis durante a secagem, perdas físicas e alterações de propriedades durante moagem, etc. Deve-se notar que a quase totalidade dos ensaios se refere a materiais homogêneos e em condições padronizadas, exatamente o oposto do encontrado nos RSU;

Dificuldades quanto à representatividade das amostras para ensaios, em vista da heterogeneidade: Uma amostra para ensaio de PCS possui cerca de 3,0 g (gramas), enquanto que para determinação de composição elementar em cromatografia é menor ainda.

---

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A redução da quantidade de RSU é uma realidade necessária para implantação imediata. Muitos são os projetos, idéias e proposições, porém a aplicação prática é limitada por ações diversas de políticas e de opiniões divergentes de diversos segmentos da população.

Para que o fato se concretize, necessário é que haja vontade de ambas as partes, buscando um único objetivo, que não somente o interesse de uma classe específica, em detrimento de aborrecimento de outra.

O que atualmente ocorre na prática é a ação de uma pequena parcela da população que se dispõe a contribuir com a coleta seletiva, que têm apoio governamental e ação de grupos de iniciativa própria, e um grupo de catadores atua em consonância com esta ação, ampliando a quantidade do material a ser reciclado ou até reutilizado.

A coleta de lixo tem a estrutura mantida nos moldes contratuais já de longa data, atuando de acordo com o que lhes é verificado como rentável.

A proposta de contribuição para redução dos aterros através da geração de energia é uma frente que cobrirá duas vertentes distintas que se encontram em um ponto comum, a necessidade de uma ação imediata. O país precisa de energia elétrica, notar que os reservatórios das hidrelétricas, no corrente ano já estão deplecionados desde o início do inverno, sendo observado que a perda de qualquer linha ou máquina de porte, já tem chamado as termelétricas para o despacho, e os aterros já não mais suportam a produção atual de lixo, que sendo mantida na mesmice, se tornará exponencialmente maior a cada dia. Observemos que enterramos diariamente toneladas de materiais combustíveis sendo tratados como desprezíveis, enquanto sondamos a terra e retiramos nobres hidrocarbonetos em escala monumental, para produzir energia com eficiência em média menor do que 45%.

Este trabalho apresenta uma visão teórica e prática de como quantificar o poder calorífico do RSU, sendo que se houver um pouco mais de investimento em pesquisa e

experimentos, torna-se possível a realidade brasileira do tratamento térmico de resíduos, que em países evoluídos já está bem equacionado e operacional.

Dizem os ditados dos mais idosos que ou se aprende pelo amor, ou pela dor. No caso de desperdiçar energético sendo enterrado como lixo, será que o tal ditado pode nos aplicar uma lição?

Vamos pensar um uma cena, onde os recipientes coletores de recicláveis, disponibilizados para a população tenham um de metal, um de plástico, um de vidro, um de papel e outro escrito “energético”, com a seguinte instrução: “PODE: papel manchado, palito de sorvete, madeira, plástico sujo, entre outros” que fossem destinados para uma central de geração de energia elétrica para esta região onde ele foi coletado, evitando queimar algumas dezenas de litros de óleo diesel para o transporte para uma região distante. A logística, tratamento, separação e outros relevantes itens podem ser tratados em trabalhos que serão gerados à partir desta concepção de respostas à perguntas que decorrem deste e de outros artigos similares. Com pesquisa, sempre o mundo humano encontrou soluções.

---

## REFERÊNCIAS

ASCE, American Society of Civil Engineers, New Approach for Estimating Energy Content of Municipal Solid Waste Journal of Environmental Engineering, Vol. 117, No. 3, May/June 1991, pp. 376-380, Disponível em: <<http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?9102139>>. Acesso em: 29 de setembro de 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 10 004. Resíduos Sólidos: Classificação. 71 p. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 10 005. Procedimento para Obtenção de Extrato Lixiviado de Resíduos Sólidos. 16 p. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 10 006. Procedimento para obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos. 03 p. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 10 007. Amostragem de Resíduos Sólidos. 21 p. 2004.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia - EPE. Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS. Nota Técnica DEN 06/08. Rio de Janeiro, novembro de 2008, 73p.

CETMG, Centro de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Apostila de Máquinas Térmicas do Centro de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Disponível em: <[www.apostilas.netsaber.com.br/apostilas/682](http://www.apostilas.netsaber.com.br/apostilas/682)>. Acesso em: 30 de setembro de 2012.

DEFA – Guidance Notes in Enery Inputs, Disponível em: <[https://www.chpqa.com/guidance\\_notes/GUIDANCE\\_NOTE\\_14.pdf](https://www.chpqa.com/guidance_notes/GUIDANCE_NOTE_14.pdf)>. Acesso em: 23 de setembro de 2012.

ECEN, Economia e Energia, Apostila Teor de Carbono em combustíveis da biomassa, Disponível em: <[http://ecen.com/eee57/eee57p/teor\\_de\\_carbono\\_em\\_combustiveis\\_da\\_biomassa.htm](http://ecen.com/eee57/eee57p/teor_de_carbono_em_combustiveis_da_biomassa.htm)>. Acesso em: 29 de setembro de 2012.

ECS, EUROPEAN COMITEE FOR STANDARDIZATION Solid recovered fuels - Methods for the determination of calorific value, Disponível em: <[http://biom.cz/data/normy/15400\\_Biomass-determination.pdf](http://biom.cz/data/normy/15400_Biomass-determination.pdf)>. Acesso em: 23 de setembro de 2012.

EEB, EUROPEAN ENVIROMENTAL BUREAU, The energy efficiency formula of annex ii of the waste framework directive - European Commission for revision of the Waste Framework Directive

- 75/442/EEC, Disponível em: <<http://www.eeb.org/activities/waste/20060630-Okopol-Brief-on-MSWI-efficiencyformula-v5-final.pdf>>. Acesso em: 22 de setembro de 2012.
- EPO, Economy Point Organization, Apostila sobre eficiência energética, Disponível em: <<http://www.economy-point.org/h/heat-value-dulong.html>>. Acesso em: 23 de setembro de 2012.
- GLOBAL ENERGY MANAGEMENT. Landfill Gas Capture. Disponível em: <<http://www.globalenergymanagement.com/Landfill-Gas-Capture.php>> Acesso em 24 maio 2010.
- HENRIQUES, R. M. Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Tecnológica. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2004, 190p. Dissertação (mestrado).
- HINRICHS, R.A.; KLEINBACH, M. Energia e Meio Ambiente. Tradução da 3. ed norte americana. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. 543p.
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Curso de combustão industrial. São Paulo. [sn]. 2001.
- IUPAC, "Assessing the credibility of the calorific content of municipal solid waste, Disponível em: <<http://old.iupac.org/publications/pac/1991/pdf/6310x1415.pdf>>. Acesso em: 22 de setembro de 2012.
- JIURGIU, Paulo Adriano, engenheiro mecânico, Usina Piratininga - EMAE, e-mail: paulojiuigi@hotmai.com, Comunicação Privada.
- KÜTTNER. Reciclar e agregar valor ao lixo doméstico e urbano. Disponível em: <[www.kuttner.com.br/cat/7\\_reciclar\\_lixo\\_domestico\\_urbano\\_pt.pdf](http://www.kuttner.com.br/cat/7_reciclar_lixo_domestico_urbano_pt.pdf)>. Acesso em: 24 maio 2010.
- MALONE, R., World's Worst Waste. Disponível em: <[http://www.forbes.com/2006/05/23/waste-worlds-worst-cx\\_rm\\_0524waste.html](http://www.forbes.com/2006/05/23/waste-worlds-worst-cx_rm_0524waste.html)>. Acesso em: 3 jun. 2010.
- MEIO NEWS. RJ: Usina transforma lixo da Baía de Guanabara em energia elétrica. Disponível em: <<http://www.meionews.com.br/index.php/noticias/21-estado-do-rio/3340-rjusina-transforma-lixo-da-baia-de-guanabara-em-energia-eletrica.html>> Acesso em 14 maio 2010.
- MELDONIAN, N. L. Alguns aspectos do lixo urbano no Estado de São Paulo e considerações sobre a reciclagem do alumínio e do papel. Campinas: UNICAMP, 1998, 196p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação de Planejamento de Sistemas Energéticos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas.
- ORER, Office of Renewable Energy Regulator - Australian Government - Guideline for Determining the Renewable Components in Waste for Electricity Generation, Disponível em: <<http://www.orer.gov.au/publications/pubs/wasteelectricitygen-jan04.pdf>>. Acesso em: 26 de setembro de 2012.
- PAVAN, M. C. O. Geração de Energia a Partir de Resíduos Sólidos Urbanos: Avaliação e Diretrizes para Tecnologias Potencialmente Aplicáveis no Brasil. 2010, 186p. . Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Energia da universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- Rand, J. Haukohl, U., Municipal Solid Waste Incineration, Disponível em: <[http://books.google.com.br/s?id=bLt9IBHdgmcC&pg=PA11&lpg=PA11&dq=%22General+construcion,+demolition+and+street+sweeping+wastes%22&source=web&ots=v1QGfnuMTm&sig=kiNyiUi\\_75A5xdkz9Ani5vFXPo&hl=ptBR&sa=X&oi=book\\_result&resnum=1&ct=result](http://books.google.com.br/s?id=bLt9IBHdgmcC&pg=PA11&lpg=PA11&dq=%22General+construcion,+demolition+and+street+sweeping+wastes%22&source=web&ots=v1QGfnuMTm&sig=kiNyiUi_75A5xdkz9Ani5vFXPo&hl=ptBR&sa=X&oi=book_result&resnum=1&ct=result)>. Acesso em: 20 de setembro de 2012.
- REIS, L.B. Geração de energia elétrica - Tecnologia, inserção ambiental, planejamento, operação e análise de viabilidade. São Paulo: Manole, 2003. 324p.
- SAGE Journals, Technology Ressources Inc - Solid Waste Composition Study for Metropolitan Vancouver, Disponível em: <<http://www.metrovancouver.org/about/publications/Publications/SolidWasteCompositionStudyFinal-2007.pdf>> , acesso em 26 de setembro de 2012.
- SANTOS, G. G. D. Análise e Perspectivas de Alternativas de Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos: o Caso da Incineração e da Disposição em Aterro. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011, 193p. Dissertação (mestrado).

SPILLSORB, Calorific Value Measurement, Disponível em: <<http://spillsorb.com/calorific26.htm>>. Acesso em: 23 de setembro de 2012.

TIRU, Traitement Industriel des Residus Urbains, Heating Value of Municipal Solid Waste, Disponível em: Waste Management & Research Volume 5, Issue 2, June 1987, Pages 141-145 <<http://wmr.sagepub.com/cgi/content/abstract/5/1/141>>. Acesso em: 21 de setembro de 2012.

UCF, University of Central Florida, Estimation of Energy content of Municipal Solid Waste, Disponível em: <[msw.cecs.ucf.edu/EnergyProblem.ppt](http://msw.cecs.ucf.edu/EnergyProblem.ppt)>. Acesso em: 24 de setembro de 2012.

UFSC, Apostila de Laboratório de calorimetria, Disponível em: <[http://www.qmc.ufsc.br/~minatti/aulas/qmc5401/20071\\_qmc5401\\_experimento10\\_entalpia\\_combustao.pdf](http://www.qmc.ufsc.br/~minatti/aulas/qmc5401/20071_qmc5401_experimento10_entalpia_combustao.pdf)>. Acesso em: 26 de setembro de 2012.

USINA VERDE. O Lixo e o Meio Ambiente - Panorama Internacional - Gestão de Resíduos Urbanos. Disponível em: <<http://www.usinaverde.com.br/lixoemeioambiente.php?cod=2152313A-ACA1-D5D1-D9CF-D81528495D55>>. Acesso em: 14 maio 2010.