



**17º Congresso de Iniciação Científica**

**ESTUDO POTENCIAL ENERGÉTICO DE COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DA BIOMASSA:  
CONSTRUÇÃO DE UM CALORÍMETRO ISOPERIBÓLICO**

**Autor(es)**

---

ANDRESSA AMBROSIO DE CAMPOS

**Orientador(es)**

---

ANTÔNIO GARRIDO GALLEGO

**Apoio Financeiro**

---

FAPIC/UNIMEP

**1. Introdução**

---

O excessivo uso de combustíveis de origem fóssil tem causado não somente problemas econômicos, mas também danos ecológicos imensuráveis. O aquecimento global é o efeito mais evidente causado pelas emissões de poluentes na atmosfera, e origina-se da queima dos combustíveis fósseis (SAYIGH, 1999).

Segundo Filho e Badr (2004), ao mesmo tempo em que, as reservas de combustíveis fósseis são limitadas, o consumo de energia tem aumentado em proporção superior ao índice de aumento da população, logo, a busca por outras fontes de energia tem se intensificado em todo o mundo. Com isso, uma das alternativas mais pesquisadas, no sentido de promover o desenvolvimento sustentável dos países industrializados e semi-industrializados, é a utilização de energia derivada de fontes renováveis.

**2. Objetivos**

---

- Permitir ao aluno uma visualização de como conduzir e interpretar os dados gerados num projeto de pesquisa;
- Proporcionar ao aluno a possibilidade do mesmo participar em eventos para divulgação do projeto.
- Projeto e construção de um calorímetro tipo isoperibólico, que venha atender às necessidades do LEMA-UNIMEP, com eficiência e precisão compatível com os equipamentos similares disponíveis somente no mercado internacional;
- Realizar estudo sobre o potencial energético de combustíveis derivados da biomassa;
- Determinar o poder calorífico entre outras propriedades de combustíveis sólidos provenientes da biomassa.

**3. Desenvolvimento**

---

### Poder Calorífico

Conforme Van Wylen, Sonntag e Borgnakke (2003) “o poder calorífico superior (PCS) é a quantidade de energia transferida com a água presente nos produtos de combustão no estado líquido e o poder calorífico inferior (PCI) é a quantidade energia transferida com a água presente nos produtos de combustão no estado vapor”. Logo, a diferença entre ambos é a energia requerida para evaporar a umidade presente no combustível e a água de formação obtida a partir da oxidação do hidrogênio do combustível.

O termo “poder calorífico – PC” é numericamente igual à entalpia padrão de combustão ( $\Delta H$ ), conforme equação 1. O PCS é medido em bomba calorimétrica adiabática utilizando-se técnicas padrão ASTM D2015-77 (ASTM, 1982). Cortez, Lora e Gómez (2008) apresentam relações obtidas a partir de análise estatísticas do trabalho desenvolvido por Jenkis, entre a composição elementar e o poder calorífico da biomassa, sendo estas relações me função basicamente do teor de carbono (Cs) (equação 02) e o teor de cinzas (As) (equação 03).

Cortez, Lora e Gómez (2008) também apresentam equações importantes para converter o poder calorífico superior de base seca para base de trabalho (equação 13); converter o poder calorífico superior de base seca para poder calorífico inferior de base de trabalho (equação 04); e a fórmula de Mendeliev para determinação do poder calorífico inferior (kJ/kg) conhecida à composição elementar do combustível completa, baseada na composição química (equação 05).

### Calorímetros

O calorímetro é instrumento/equipamento capaz de medir as transformações energéticas em uma substância pela medida indireta da variação da temperatura de um fluido de resfriamento devido à troca de calor entre o sistema e o meio de resfriamento. Nesse sentido, levando em conta as características de um calorímetro, existem 3 principais tipos básicos: calorímetro adiabático, calorímetro de condução de calor e calorímetro isoperibólico (CIAMP, 1992).

### Procedimentos para determinação do poder calorífico

O poder calorífico pode ser determinado pela técnica da bomba calorimétrica seguindo a norma ASTM D-2015 (ASTM, 1983), Sanchez (2006) e Ciamp (1992).

#### Projeto e construção do Calorímetro

O projeto foi realizado utilizando como referência as recomendações apresentadas por Ciamp (1992), Telles (1991) e código ASME seção VIII ASME (2000).

### Procedimento para determinação da capacidade térmica do calorímetro

Para a padronização do calorímetro utiliza - se ácido benzóico, seguindo as normas ASTM D-2015 (ASTM, 1983), ASTM D-240 (ASTM, 2007) e o procedimento apresentado por Sanches (2006).

### Procedimento para determinação do poder calorífico das amostras

A determinação do poder calorífico das amostras foi realizada conforme o procedimento apresentado. Os ensaios de determinação do poder calorífico das amostras não devem exceder a 3 dias, caso isso ocorra, deve-se ser realizado o procedimento para determinação da capacidade térmica do calorímetro com ácido benzóico.

## **4. Resultado e Discussão**

---

Para a determinação da capacidade térmica do calorímetro foram realizados 10 testes, mas somente 6 foram aprovados, sendo que 4 foram rejeitados porque a combustão foi incompleta. Destaca-se que cada teste em média leva entre 35 a 40 minutos. Destaca-se que foram colocados dois termopares (T1 e T2) para medir temperatura da água no balde, sendo que para a determinação da capacidade térmica do calorímetro foi utilizado o valor médio das duas leituras. Com o perfil de temperatura, foi determinada a capacidade calorífica do calorímetro conforme apresentado no item 19 do procedimento para determinação da capacidade térmica do calorímetro. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 01.

A partir dos experimentos realizados foi determinado que a capacidade térmica do calorímetro era de 22108 J/K (5280 cal/K), valor este utilizado no ensaio das amostras.

Os materiais escolhidos para as análises foram: serragem, casca de macadâmia e coque de petróleo. A escolha foi devida à disponibilidade destes materiais no Laboratório de Energia e Meio Ambiente (LEMA), além de serem materiais que vem sendo estudados no laboratório para a produção de carvão ativado e que faltava em sua caracterização a determinação do poder calorífico.

Foram realizados para cada material pelo menos 5 ensaios, tendo sempre em média pelo menos 3 ensaios válidos. Entende-se como válido o ensaio no qual a amostra é queimada por completo, caso contrário repete-se todo o procedimento apresentado. Macadâmia

Foram feitas análises para calcular o teor de umidade das amostras in natura, resultando em um valor de umidade nas amostras utilizadas de  $8,82\% \pm 0,24\%$ . Na análise imediata foram determinados os teores de voláteis, cinzas e carbono fixo, tendo sido realizadas quatro repetições apresentando os seguintes valores médios:  $79,62\% \pm 0,35$  de voláteis,  $0,18\% \pm 0,05$  de cinzas e  $20,20\% \pm 0,34$  de carbono fixo.

Foram realizados 5 testes para a determinação do poder calorífico da macadâmia sendo que três ensaios foram válidos e dois foram descartados por apresentarem combustão incompleta. Na tabela 02 são apresentados os valores obtidos. O valor obtido do poder

calorífico ficou dentro de uma variação de 2,39%, o que pode ser aceitável dada às condições de operação. Ao comparar o resultado obtido, 505 2.114 21.010 kJ/kg com o apresentado por Parikh, Channiwala e Ghosal (2005) de kJ/kg. Verifica-se que o valor apresentado na literatura está dentro da faixa de variação dos ensaios realizados.

Pode ser verificado que a casca de macadâmia é uma matéria-prima que pode ser destinada produção de carvões ativados como fonte de energia, tendo-se em vista o elevado teor de carbono fixo e teores de voláteis, os baixos teores de cinzas e poder calorífico que é da mesma ordem de grandeza, por exemplo, de madeiras pinus e eucaliptos.

#### Coque de petróleo

O teor de umidade foi realizado através da norma ASTM D678, onde 2 g de amostra de coque foram colocadas em estufa a 110 °C por 6 horas ou até peso constante. O teor de umidade obtido foi de 6,87%±0,40%. A caracterização granulométrica do coque recebido foi feita através de um jogo de peneiras padronizadas em mesa agitadora.

A análise imediata foi realizada segundo a norma ASTM D3176 e D3180. Foram realizados três ensaios, resultando em um valor de umidade nas amostras utilizadas de 6,87%±0,4%. Na análise imediata foram determinados: teor de voláteis de 14,42%±0,3%; teor de carbono fixo de 85,54%±0,3% e teor de cinzas de 0,04%±0,0%.

Foram realizados 6 testes para a determinação do poder calorífico do coque sendo que três ensaios foram válidos e três foram descartados por apresentarem combustão incompleta. Na tabela 03 são apresentados os valores médios, máximos e mínimos dos ensaios realizados, além da porcentagem de variação.

O valor obtido do poder calorífico ficou dentro de uma variação de 2,85%, o que pode ser aceitável dada às condições de operação. Ao comparar o resultado obtido, 39.270±1120 kJ/kg com o apresentado por Parikh, Channiwala e Ghosal (2005) de 31.224 kJ/kg e pelo Ministério das Minas e Energia (2007) de 35.851 kJ/kg, verifica-se que o valor obtido no calorímetro está acima dos valores apresentados na literatura, mas isto pode ser justificado pelo fato que os valores de poder calorífico do coque de petróleo são muito variáveis, podendo apresentar valores até superiores aos encontrados no experimento realizado.

O elevado teor de umidade no coque de petróleo pode ser pelo fato que na retirada do coque dos tambores da unidade de coqueamento, este é perfurado com injeções de vapor água quente para quebra dos blocos formados, com isto há uma grande impregnação por água. Já o teor de matéria volátil alto indica que no coque ainda há presença de hidrocarbonetos que podem sofrer craqueamento térmico (MÉNDEZ, 2005).

#### Serragem

A análise imediata foi realizada segundo a norma ASTM D3176 e D3180. Foram realizados três ensaios, resultando em um valor de umidade nas amostras utilizadas de 20%±0,4%. Na análise imediata foram determinados: teor de voláteis de 77,67%±1,5%; teor de carbono fixo de 21,43%±0,3% e teor de cinzas de 0,90%±0,05%.

Foram realizados 5 testes para a determinação do poder calorífico da serragem sendo que três ensaios foram válidos e dois foram descartados por apresentarem combustão incompleta. Na tabela 04 são apresentados os valores obtidos. O valor obtido do poder calorífico ficou dentro de uma variação de 4,34%, o que pode ser aceitável dada às condições de operação. Ao comparar o resultado obtido, 821 J/g com o apresentado por Parikh, Channiwala e Ghosal (2006) de 18.00 kJ/kg, Ghosal (2005) de verifica-se que o valor do poder calorífico obtido no calorímetro esta dentro da faixa dos valores apresentados na literatura. Aqui também pode ser destacado que a serragem, que é um resíduo encontrado em serrarias e no setor de papel e celulose é uma matéria-prima que pode ser utilizada como fonte de energia para esses setores, tendo-se em vista os teores de carbono fixo e de voláteis, o baixo teor de cinzas e poder calorífico com valor equivalente a metade do poder calorífico do óleo combustível (40 MJ/kg) que é uma das fontes de energia para grande parte das indústrias, mas que é um combustível de origem fóssil e não renovável.

## **5. Considerações Finais**

---

Foi realizado o projeto e a construção de um calorímetro tipo isoperibólico, que atenderá as necessidades do Laboratório de Energia e Meio Ambiente e também nas disciplinas da área de Engenharia e Meio Ambiente dos cursos de Engenharia, de forma eficiente e com razoável precisão, já que apresentou desvio nos testes realizados entre 2,5 a 5,0 %. Espera-se que este desvio seja reduzido a partir das alterações das recomendações apresentadas.

Foi realizado o estudo do potencial energético da macadâmia, coque de petróleo e da serragem. Os resultados obtidos para a macadâmia e serragem ficaram dentro dos limites apresentados na literatura, com relação ao coque de petróleo o valor obtido ficou acima do indicado na literatura, mas essa variação depende muito do tipo de petróleo utilizado e do processo de refinamento.

## **Referências Bibliográficas**

---

ASTM., Annual Book of ASTM Standards, D-2015, vol. 05.05, p.317-325, Philadelphia: American Society for Testing Materials, 1983.

ASTM., Annual Book of ASTM Standards, D-3176, vol. 05.05, p.406-409, Philadelphia: American Society for Testing Materials,

1983.

CIAMP, G.J.S Desenvolvimento de um calorímetro para a determinação do conteúdo energético de combustíveis sólidos. 1992. 84 p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica)-Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, 1992.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. (Organizadores) Biomassa para energia. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

FILHO, P.A.; BADR, O.; Biomass resource for energy in North-Eastern Brazil. Applied Energy, nº77, p. 51-67, 2004.

MÉNDEZ, M. O. A. Síntese de Materiais Carbonosos Ativados a Partir de Coque de Petróleo. 2005. 117 p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Química)-Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA Balanço Energético Nacional, ano base 2005. Brasil: Ministério de Minas e Energia do Brasil, 2006.

NOGUEIRA, L.A.H., LORA, E.E.S., TROSSEIRO, M.A., FRISK, T. Dendroenergia: fundamentos e aplicações. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2000.

PARIKH,J., CHANNIWALA,S.A., GHOSAL,G.K., A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. Fuel, nº 84, p. 487-494, 2005.

SANCHEZ,C. Disciplina IM-351 – Tecnologia de combustão. Campinas: Departamento de Térmica e Fluidos, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 2006.

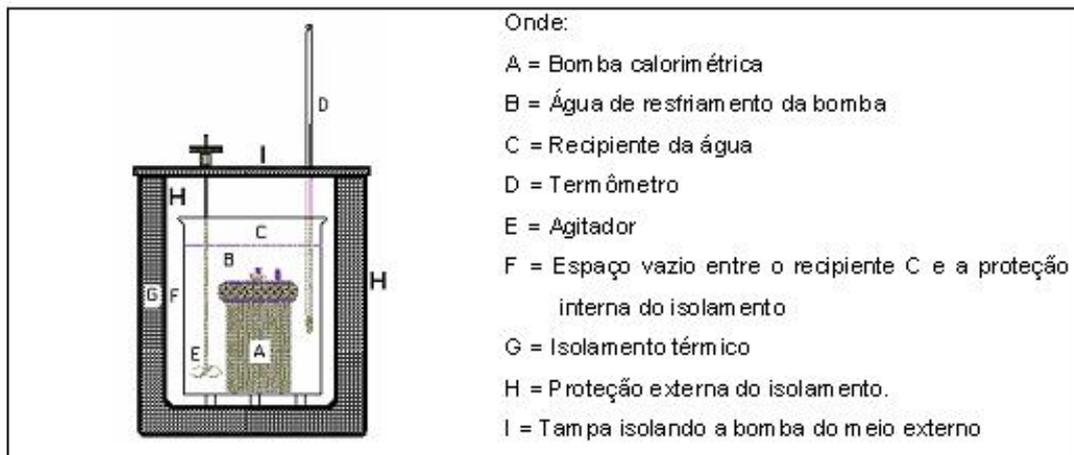
SAYIGH, A. Renewable energy the way forward. Applied Energy, nº64, p.15-30, 1999.

TELLES,P.C.S. Vasos de pressão. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora, 1991.

VAN WYLLEN,G. J., SONNTAG,R.E., BORGNAKKE, C., Fundamentos da Termodinâmica Clássica-6ªEd.,São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

## Anexos

Figura 1 – Calorímetro isoperibólico.



$$PC = -\Delta H \quad (01)$$

$$PCS' = 2,3381 + 0,351C' \quad \text{Com um } R^2 = 0,805 \quad (02)$$

$$PCS' = 20,180 - 0,203A' \quad \text{Com um } R^2 = 0,498 \quad (03)$$

$$PCS' = PCS' (100 - W') \quad (04)$$

$$PCI' = \left[ (PCS' - \lambda(r + 0,09H'))(100 - W') / 100 \right] \quad (05)$$

Onde  $\lambda$  = calor latente da água = 2,31 MJ/kg a 25 °C e  $r =$

$$W' / 100 - W'$$

$$PCI' = 339C' + 1030H' - 109(O' - S') - 24W' \quad (06)$$

$$W = \frac{(PCS_{AB} \times g + e_1 + e_2)}{\Delta T} \quad (07)$$

$$\xi_{umida} = \frac{PCS_{AB} \times g_{AB}}{PCS_{umida}} \quad (08)$$

$$PCS_{AB} = \frac{(W \times \Delta T - e_1 - e_2)}{\xi_{umida}} \quad (09)$$

Tabela 01 – Resultados obtidos nos ensaios do calorímetro com ácido benzóico.

Valor médio e limites	Faixa de Valores obtidos			
	Inferior	Média	Superior	% variação
Massa de água no balde (kg)	4,82	4,85	4,88	0,64
Massa amostra de ácido benzóico (g)	0,96	0,99	1,01	2,82
Energia liberada durante o processo de combustão				
Calor liberado pelo ácido benzóico (J)	25365	26100	26834	2,82
Calor liberado pelo arame (J)	63	69	75	8,07
Calor liberado ácido nítrico (J)	1,26	1,26	1,26	0,00
Calor liberado total (J)	25439	26170	26900	2,79
Temperatura				
Temperatura inicial (°C)	24,38	25,35	26,32	3,83
Temperatura final (°C)	25,54	26,55	27,56	3,79
Variação de temperatura (°C)	1,06	1,20	1,34	11,55
Capacidade calorífica ou equivalente em água do calorímetro (W)				
W (JK)	19995	22108	24210	9,55
W (cal/K)	4776	5280	5785	9,55

Tabela 02 – Resultados obtidos da macadâmia na bomba calorimétrica.

Valor médio e limites	Faixa de Valores obtidos			
	Inferior	Média	Superior	Variação
Massa de água no balde (kg)	---	4,84	---	---
Massa amostra (g)	2,20	2,21	2,21	0,23
Temperatura inicial (°C)	21,52	22,35	23,18	3,73
Temperatura final (°C)	23,69	24,46	25,24	3,18
Variação de temperatura (°C)	2,06	2,12	2,17	2,60
Ácido Nítrico (J)	15,91	16,54	17,17	3,80
Poder calorífico Superior (kJ/kg)	20659	21164	21669	2,39
Poder calorífico Superior (kcal/kg)	4934	5055	5176	2,39

Tabela 03 – Resultados obtidos do coque de petróleo na bomba calorimétrica.

Valor médio e limites	Faixa de Valores obtidos			
	Inferior	Média	Superior	Variação
Massa de água no balde (kg)	---	4,88	---	---
Massa amostra (g)	0,83	0,85	0,87	2,35
Temperatura inicial (°C)	22,37	22,38	22,40	0,08
Temperatura final (°C)	23,87	23,90	23,92	0,10
Variação de temperatura (°C)	1,51	1,51	1,52	0,50
Ácido Nítrico (J)	13	14,65	17	14,29
Poder calorífico Superior (kJ/kg)	38150	39270	40390	2,85
Poder calorífico Superior (kcal/kg)	9112	9379	9647	2,85

Tabela 04 – Resultados obtidos da serragem na bomba calorimétrica.

Valor médio e limites	Faixa de Valores obtidos			
	Inferior	Média	Superior	Variação
Massa de água no balde (kg)	---	4,88	---	---
Massa amostra (g)	1,41	1,44	1,47	2,01
Temperatura inicial (°C)	21,90	22,35	22,80	2,00
Temperatura final (°C)	23,21	23,59	23,96	1,58
Variação de temperatura (°C)	1,16	1,24	1,31	5,94
Ácido Nítrico (J)	8,05	8,23	8,42	2,26
Poder calorífico Superior (kJ/kg)	18113	18934	19755	4,34
Poder calorífico Superior (kcal/kg)	4326	4522	4718	4,34