

Avaliação do desempenho energético de fogão a lenha portátil

Assessment of the energy performance of a portable wood stove

Gilmara Oliveira Machado*
André Luis Christoforo**
Marília da Silva Bertolini***
Victor Almeida de Araujo****
Juliano Fiorelli*****
Francisco Antonio Rocco Lahr*****

Este trabalho objetivou a construção e teste de um fogão a lenha portátil, que apresentou eficiência média de 12,3%, enquanto que para os fogões residenciais utilizados na cidade de Irati/PR, a eficiência energética varia na faixa de 2,9 a 4,6%. Utilizou-se como combustível lenha de madeira *Mimosa scabrella*, com 13% de teor de umidade. O fogão portátil apresentou potência de 241,3 W; consumo de combustível em torno de 0,2 kg para cada 20 minutos de funcionamento e como teores de voláteis aproximadamente 0,1 Nm³/kg de CO₂; 0,01 Nm³/kg de CO e 9,6 10⁻⁶ Nm³/kg para SO₂, consistindo assim em resultados promissores.

*This study aimed at making and testing a portable wood stove, which presented an average efficiency of 12.3%. This percentage was higher than the 2.9 to 4.6% range found in residential stoves in the city of Irati/PR. The fuel used in the experiment was wood from the *Mimosa scabrella* tree, with 13% moisture content. The thermal power of the portable stove was 241.3W; the fuel consumption was 0.2 kg for each 20-minute of operation, and the levels of volatiles were 0.1 Nm³ CO₂/kg, 0.01 Nm³ CO/kg and 9.610⁻⁶ Nm³/kg for SO₂. These results show that the wood stove presents very promising results.*

Palavras-chave: Fogão a lenha. Irati/PR. Eficiência energética.

Keywords: Wood stove. Irati/PR. Energy efficiency.

* Doutora em Ciências e Engenharia de Materiais pela Universidade de São Paulo (USP). Professora da Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati/PR - Brasil. E-mail: gilmaromachado@yahoo.com.br.

** Doutorado em Engenharia de Estruturas pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da USP; Pós-Doutor em Engenharia de Estruturas pela EESC/USP; Pós-Doutor pela Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA) da USP e Pós-Doutor pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) *campus* Ilha Solteira. Membro da Comissão de Estudo de Estruturas de Madeiras do Comitê Brasileiro da Construção Civil: Madeiras Ensaio de caracterização de peças estruturais de madeira e Membro do comitê editorial da Revista da Madeira (REMADE). Professor do Departamento de Engenharia Civil (DECiv) e do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PPGECiv) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), e membro da diretoria do Instituto Brasileiro da Madeira e das Estruturas de Madeira (IBRAMEM), São Carlos/SP - Brasil. E-mail: alchristoforo@yahoo.com.br.

*** Doutora em Ciências e Engenharia de Materiais pela USP. Pós-doutoranda no Departamento de Engenharia de Estruturas pela EESC/USP. Professora Substituta da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) *campus* de Itapeva e Pesquisadora da USP, São Carlos/SP - Brasil. E-mail: mariliasilvabertolini@gmail.com.

**** Graduado em Engenharia Industrial Madeireira pela UNESP. Doutorando em Recursos Florestais pela USP. Professor substituto da UNESP, *campus* de Itapeva, Piracicaba/SP - Brasil. E-mail: engim.victor@yahoo.com.br.

***** Doutor em Ciências e Engenharia de Materiais pela USP. Professor do Departamento de Engenharia de Biosistemas, da FZEA/USP, Pirassununga/SP - Brasil. E-mail: julianofiorelli@usp.br.

***** Doutor em Engenharia de Estruturas pela EESC/USP. Professor da USP, São Carlos/SP - Brasil. E-mail: frocco@sc.sup.br.

Introdução

Cerca de três bilhões de pessoas no mundo dependem da biomassa de origem vegetal para cocção de alimentos e aquecimento. Aproximadamente 50-60% utilizam a madeira, frequentemente dentro de casa, com pouca ventilação, sujeitando-se diariamente à exposição de altas concentrações de fumaça provenientes dos fogões no interior das cozinhas; causando um grande impacto na saúde principalmente de mulheres e de seus filhos pequenos. A fumaça da queima da lenha contém centenas de substâncias tóxicas, incluindo monóxido de carbono bem como dioxinas e furanos que são os compostos mais tóxicos conhecidos pela ciência (NORTHCROSS et al., 2012).

A obtenção de energia da biomassa para cocção de alimentos é realizada tradicionalmente por meio da queima direta (combustão) da lenha ou em menor escala do carvão vegetal, em equipamentos térmicos denominados de “fogões a lenha”. Porém, a eficiência desses fogões, que pode variar de 2% a 36%, depende da conversão da energia da lenha em calor, da tecnologia e do tipo de construção utilizados (NOGUEIRA; LORA, 2003; REGUEIRA, 2010). A Tabela 1 apresenta dados mundiais de eficiência registrada em diferentes tipos de fogões (Figura 1) para cocção de alimentos em uso comercial.

Tabela 1 - Dados de eficiência de diferentes modelos de fogões a lenha ou carvão vegetal

Tipo de fogão	Eficiência (%)
Três pedras (A)	7 - 15
“Pesado” com chaminé (B)	15 - 23
Sem chaminé para uma panela (D)	30 - 35
Sem chaminé para duas panelas (E)	18 - 22
Compacto para serragem (H)	15/32 – 36
Fogão a gás	57
Fogão elétrico	50

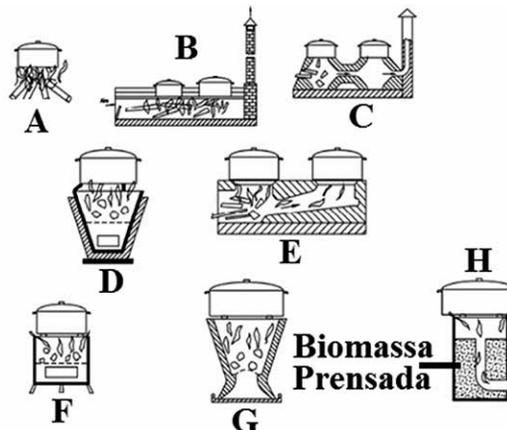


Figura 1 - Diferentes tipos de fogões

Fonte: Nogueira e Lora (2003); Regueira (2010)

Da Tabela 1 e Figura 1, A ilustra o fogão de três pedras, B o fogão “pesado” com chaminé, C “leve” com chaminé, D sem chaminé para uma panela, E sem chaminé para duas panelas, F metálico para carvão vegetal, G cerâmico para carvão vegetal e H compacto para serragem.

No cenário brasileiro, segundo dados do Balanço Energético Nacional (2012), a lenha tem uma participação significativa de 7,2%, sendo que no setor residencial a madeira é utilizada principalmente para a cocção de alimentos e em menor escala, principalmente em regiões de clima temperado, no aquecimento domiciliar. No contexto de consumo de energia térmica pelas famílias, a lenha apresenta uma participação equivalente ao do gás liquefeito de petróleo (Figura 2), que segundo Brito (2007), vem sendo o substituto natural na maioria das residências urbanas e para o qual, ao contrário da madeira, políticas oficiais de incentivos sempre se fizeram presentes.

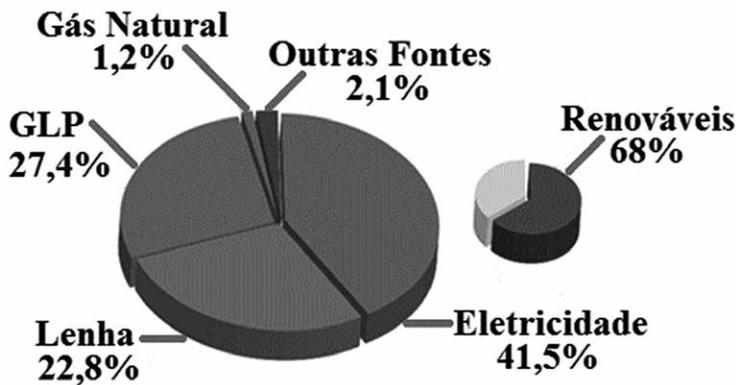


Figura 2 - Consumo de energia pelas famílias brasileiras

Fonte: Brito (2007)

Os fogões a lenha convencionais apresentam uma baixa eficiência energética, em torno de 7% na região Sudeste-Sul brasileira. A ineficiência é decorrente da queima rápida com chama difusa. O aproveitamento da energia térmica liberada não é completo em equipamentos com inadequado isolamento térmico da câmara de combustão e de insuficiente circulação de ar. Esses fogões produzem emissão de voláteis e partículas, gerando grande poluição quando localizados no interior das residências. É bastante comum usuários que apresentam insuficiência respiratória, doenças oftalmológicas, bronquite crônica e escurecimento da pele. (REGUEIRA, 2010; NORTHCROSS et al., 2012).

Borges (1994) relata que a ineficiência dos fogões potencializa a emissão de gases tóxicos, tais como o monóxido de carbono, além de promover um grande consumo de madeira. Adicionalmente, há uma grande ocorrência de desflorestamento, uma vez que a maioria da lenha utilizada não provém de florestas plantadas e sim de coletas manuais em matas nativas.

Devido a todos os inconvenientes que um fogão convencional apresenta, um fogão mais eficiente propicia um adequado tempo para o cozimento do alimento, com combustão mais completa e limpa, bem como economia financeira e de esforço físico da família para a coleta da lenha e seu armazenamento. O menor consumo de lenha gera por fim uma diminuição no desmatamento.

Esta pesquisa teve por objetivo principal construir um fogão a lenha portátil de tecnologia *Rocket Stove* e avaliar sua qualidade (eficiência, potência, consumo de lenha e liberação de voláteis) bem como, por meio de uma simulação de uso em uma cozinha hipotética, avaliar a concentração e exposição ao gás tóxico CO em condições reais de uso. A pesquisa foi embasada no uso frequente da população das áreas periféricas e rurais da cidade de Irati/PR, que ainda faz uso de fogões a lenha (LAU et al., 2013). Adicionalmente os resultados obtidos nesta pesquisa foram comparados com os obtidos por Lau et al. (2013) cujo estudo teve como objetivo principal avaliar a eficiência energética de três modelos de fogões a lenha metálicos característicos das residências unifamiliares da cidade de Irati/PR.

Material e métodos

O fogão a lenha portátil de tecnologia *Rocket Stove*, Figura 3, também intitulado “Fogão Poupa Lenha”, é projetado para ser eficiente. Nos fogões tradicionais, na combustão da lenha, geralmente o calor é liberado de maneira difusa enquanto neste tipo de fogão ocorre uma concentração do calor em uma única direção, permitindo a cocção de alimentos com menos lenha que os fogões tradicionais.

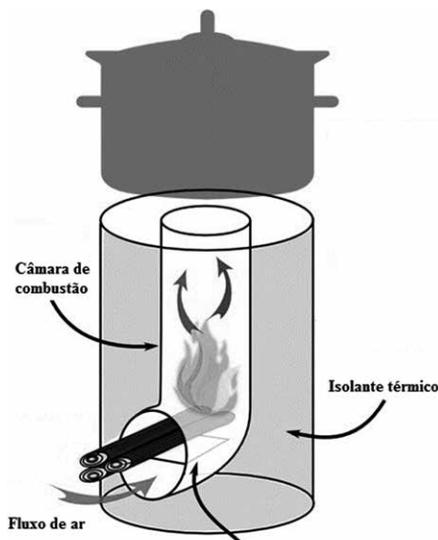


Figura 3 - Rocket stove com detalhe da câmara de combustão e canalização do calor e fumaça proveniente da queima da lenha

Fonte: Rocket stove (2013)

Adicionalmente, a câmara de combustão é isolada termicamente, o que leva a uma menor perda de calor para as paredes metálicas e arredores, melhor mistura de combustível e oxigênio, bem como uma melhor canalização dos voláteis produzidos na queima. Em síntese, seu princípio de funcionamento é baseado na concentração de calor na câmara de combustão.

O fogão metálico portátil foi construído a partir de sucatas adquiridas em ferro-velho da cidade de Irati/PR sendo, dessa forma, totalmente feito de materiais reutilizáveis, cumprindo desta forma o objetivo de ser acessível à comunidade como um todo. O fogão tem 15.394 cm^3 de volume e consiste de parede cilíndrica de latão (liga de cobre e zinco) com um tubo central cilíndrico de zinco na forma de L (câmara de combustão). A câmara de combustão foi isolada termicamente com cinzas provenientes de combustão de carvão vegetal de uma churrasqueira residencial da cidade de Irati/PR, com densidade de $0,43 \text{ g/cm}^3$. O volume do isolante é 11.785 cm^3 e a câmara de combustão tem 3.609 cm^3 . A Figura 4 ilustra as partes constituintes do fogão construído.

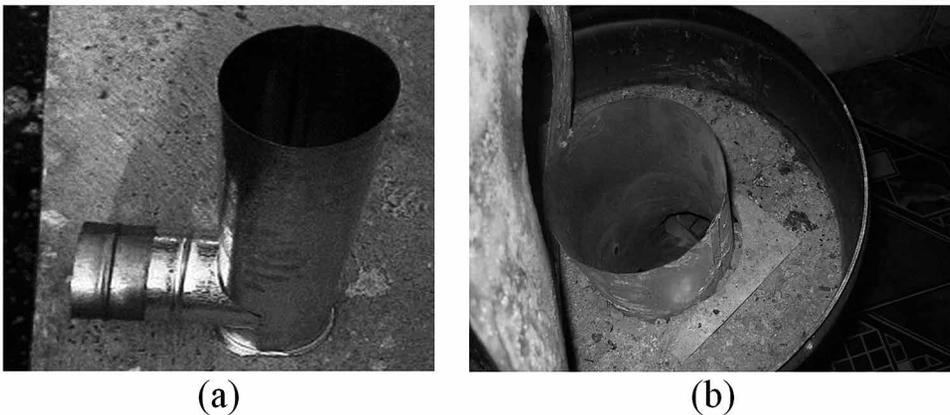


Figura 4 - Constituintes do fogão a lenha portátil: a - chaminé de zinco; b - detalhe do isolamento térmico

O fogão a lenha é apresentado na Figura 5, onde se verifica a baixa emissão de voláteis na queima da lenha dentro da câmara de combustão isolada termicamente. A lenha utilizada é de *Mimosa scabrella* (Bracatinga), com $13\% \pm 0,5$ de teor de umidade, sendo proveniente do comércio local da cidade de Irati/PR.



Figura 5 - Fogão a lenha portátil com baixa emissão de voláteis

Para a determinação do teor de umidade da madeira, base seca, foi utilizado o método de secagem em estufa, que consistiu em se colocar quatro toretes, representativos da amostra, na estufa regulada para 105 °C, com pesagens sucessivas até obtenção de massa constante. O teor de umidade (U) é fornecido pela Equação 1 (BRITO, 1993), sendo m_i a massa inicial da amostra e m_s a massa seca.

$$U = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 (\%) \quad (1)$$

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado utilizando os dados da Análise Imediata, por meio da Equação 2, proposta por Parikh et al. (2005).

$$PCI = 0,3536 \times CF + 0,1559 \times TV + 0,0078 \times CZ(\text{MJ/kg}) \quad (2)$$

Foi utilizado dado da literatura especializada (CORTEZ et al., 2009) para a Análise Imediata da Bracatinga, com valores médios de 81,42% de teor de voláteis (TV), 17,82 de carbono fixo (CF) e 0,76% de cinzas (CZ). Com o resultado obtido do PCS, determinou-se o valor do poder calorífico inferior (PCI) da lenha através da Equação 3, considerando a porcentagem de hidrogênio (H) da madeira igual a 6% (BRITO, 1993):

$$PCI = PCS - 600 \times \left(\frac{9H}{100}\right) (\text{kcal/kg}) \quad (3)$$

De posse do valor do teor de umidade da lenha (U) e do poder calorífico inferior (PCI), o poder calorífico líquido (PCU) foi calculado pela Equação 4 (BRITO, 1993).

$$PCU = PCI \times (1 - U) - 600 \times U \quad (\text{kcal/kg}) \quad (4)$$

A eficiência de um fogão a lenha é a relação adimensional entre o efeito energético útil e o consumo de energia do combustível. A eficiência foi calculada com base na avaliação da quantidade de calor absorvido pela água em uma panela metálica ($Q_{\text{útil}}$) e a quantidade de calor fornecida pelo combustível (Q_{lenha}) (NOGUEIRA; LORA, 2003).

Foram efetuadas cinco repetições consecutivas. Cada ensaio apresentou duração de 20 minutos e consistiu em pesar certa quantidade de lenha antes e depois do aquecimento de 2 kg de água, sem ocorrência de ebulição, em uma panela de alumínio com tampa de 3 litros de capacidade. No decorrer do tempo de cada ensaio, a cada 5 minutos foram feitas medidas de temperatura com o auxílio de um termômetro.

Inicialmente o fogão foi aceso para realizar seu aquecimento. Após o pré-aquecimento do fogão, iniciou-se o primeiro teste com a panela permanecendo o tempo todo tampada, exceto no momento de medição da temperatura. A panela só foi colocada no fogão quando a madeira iniciou o seu processo de queima. Com auxílio da Equação 5, o calor útil absorvido pela água na panela ($Q_{\text{útil}}$) foi calculado, sendo $m_{\text{H}_2\text{O}}$ a massa de água a ser aquecida (kg), $C_{\text{H}_2\text{O}}$ o calor específico da água (kcal/kg°C) e $\Delta T_{\text{H}_2\text{O}}$ a diferença de temperatura entre o início e o final do ensaio (°C).

$$Q_{\text{útil}} = m_{\text{H}_2\text{O}} \times C_{\text{H}_2\text{O}} \times \Delta T_{\text{H}_2\text{O}} \quad (\text{kcal}) \quad (5)$$

Passados 20 minutos de cada ensaio o fogo foi apagado a seco, e toda a lenha residual foi retirada para ser pesada. Para se obter precisão na pesagem, os resíduos da queima foram retirados do fogão e armazenados em recipientes fechados de alumínio em caixas de isopor para resfriamento e em seguida pesados em balança semianalítica. O calor total fornecido pela queima da lenha (Q_{lenha}) foi calculado com o auxílio da Equação 6, sendo m_q a massa de lenha consumida no aquecimento da água, diferença entre a massa de lenha inicial e a massa do resíduo da combustão, e PCU_l o poder calorífico líquido da lenha.

$$Q_{\text{Lenha}} = PCU_l \times m_q \quad (\text{kcal}) \quad (6)$$

A eficiência do fogão (E_f) se obteve através do resultado da razão entre o calor absorvido pela água (calor útil) e a energia liberada pela lenha (Equação 7).

$$E_f = 100 \times \left(\frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{lenha}}} \right) \quad (\text{kcal}) \quad (7)$$

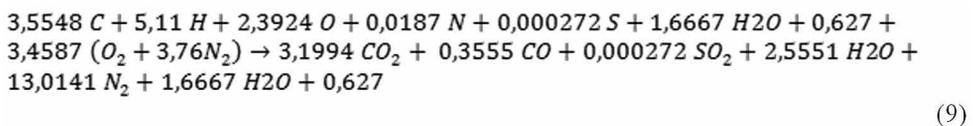
A potência calorífica do fogão está diretamente relacionada com o calor produzido pela lenha através do seu poder calorífico, tempo de queima da lenha (DT) e eficiência. A potência do fogão (Pf) é dada pela Equação 8, sendo m_q a massa de lenha queimada.

$$Pf = \frac{m_q \times PCU_l \times Ef}{\Delta T} \quad (\text{kW}) \quad (8)$$

A maioria dos métodos utilizados para avaliar os fogões a lenha são baseados apenas no desempenho térmico do equipamento, ignorando as emissões de poluentes. Contudo, os fogões a lenha liberam grandes quantidades de voláteis e gases tóxicos, submetendo o usuário a exposições extremamente prejudiciais à saúde. Desta forma, foi realizada uma estimativa da quantidade de CO₂, SO₂ e CO liberados por fogões metálicos.

Segundo dados da literatura, a quantidade média de CO liberado na queima incompleta da madeira em fogões a lenha metálicos equivale a cerca de 10% do teor de gases provenientes da queima do carbono (JOSSI, 1989; ZHANG et al., 1999). De posse dos valores da Análise Elementar, é possível apresentar a equação balanceada da combustão da lenha (Equação 9) e assim determinar os teores de CO, CO₂ e SO₂ liberados na queima de um quilograma de combustível, para cada ensaio realizado, por meio da densidade dos gases na CNTP.

A Análise Elementar da lenha foi obtida da literatura especializada, (CORTEZ et al., 2009), base seca, consistindo em 49,00% de carbono (C); 5,87% de hidrogênio (H); 43,97% de oxigênio (O); 0,30% de nitrogênio (N); 0,01% de enxofre (S) e 0,72% de cinzas (A). A equação de combustão foi elaborada com a composição elementar na base de trabalho assumindo-se que todo o carbono presente na lenha reage durante a combustão produzindo apenas CO₂ e CO (com conversão de 90% do carbono em CO₂ e 10% em CO) e que o enxofre é completamente convertido em SO₂, o hidrogênio em H₂O e nitrogênio em N₂, a equação global da combustão de 100 kg de lenha de bracinga no ar (O₂ + 3,76 N₂), na base de trabalho, com teor de umidade da lenha de 13% ± 0,5, é expressa pela equação 9 (JOSHI, V. et al., 1989; ZHANG, J. et al., 1999).



A combustão incompleta da madeira em ambientes fechados, como cozinhas, gera emissões de monóxido de carbono e assim pode resultar em altas concentrações de CO no meio. O método para prever a concentração média (C_{médio}, em mg/m³), máxima (C_{max}, em mg/m³) e potencial de exposição (E, em h-mg/m³) ao CO foi

baseado nos pressupostos da pesquisa de Zhang et al. (1999), em que se assume que todo CO emitido provém somente do fogão que não apresenta chaminé ou exaustor. Adicionalmente, assume-se também que o CO se dilui homogêneo no ar da cozinha, sendo removido somente pela ventilação e renovação natural do ambiente. Nestas condições, a concentração média e máxima de CO, bem como o potencial de Exposição ao gás são dados pelas equações 10, 11 e 12; onde F (kg/h) se refere à taxa de queima do combustível, E_f (g/kg) à quantidade de CO (g) por unidade de massa queimada de madeira (kg), t (h) é o tempo de queima sendo representado por T para o período completo de queima, V (m³) é o volume da cozinha e S (h⁻¹) a taxa de renovação natural do ar. Adotou-se um volume para a cozinha de 40 m³ (volume típico das cozinhas de Irati/PR), com taxa de renovação do ar de 1 h⁻¹ (valor estimado para uma cozinha com somente uma porta e uma janela). O valor de E_f (valor obtido da equação 9 de combustão incompleta) e F foram determinados com os dados experimentais, sendo 99,5 g/kg e 0,5 kg/h, respectivamente. No tempo de uso do fogão, assumiu-se como uma hora o período de preparação de cada refeição (café da manhã, almoço ou jantar).

$$C_{\max} = \frac{F \times E_f}{V \times S} (1 - e^{-ST}) \quad (10)$$

$$C_{\text{médio}} = \frac{F \times E_f}{V \times S} \left(1 + \frac{1}{S \times T} (e^{-ST} - 1) \right) \quad (11)$$

$$E = \frac{F \times E_f}{V \times S} \left(T - \frac{1}{S} (1 - e^{-ST}) \right) \quad (12)$$

Os dados foram avaliados com o uso da análise de variância (ANOVA) de Kruskal-Wallis (não paramétrica) e do teste de comparações múltiplas entre postos de Student-Newman-Keuls, com o auxílio do *software* BioEstat[®] versão 5.0. O nível de significância (α) estipulado para a ANOVA foi de 5%, e a hipótese nula (H_0) formulada consistiu na equivalência entre médias, implicando a não equivalência entre médias para a hipótese alternativa (H_1). P-valor do teste de Kruskal-Wallis superior ao nível de significância implica aceitar H_0 , refutando-a em caso contrário. Os resultados de eficiência energética, consumo de lenha, concentração e exposição ao CO desta pesquisa foram comparados com os obtidos no trabalho de Lau et al. (no prelo 2013), onde 3 modelos de fogões a lenha metálicos residenciais (Ref 1; Ref 2; Ref 3), da cidade de Irati/PR, foram avaliados. As respostas investigadas pela ANOVA foram a Eficiência, Potência, Massa Queimada, Gases liberados da Combustão (CO₂; SO₂, CO), Concentração e Exposição ao CO; sendo utilizadas cinco amostras por propriedade.

Resultados e discussão

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos das propriedades energéticas investigadas, sendo \bar{x} a média amostral, S o desvio padrão e Cv o coeficiente de variação. O coeficiente de variação indica boa precisão experimental.

Tabela 2 – Resultados da eficiência (Ef), potência calorífica (Pf), massa queimada (mq) e volume de gases da combustão (CO₂, CO e SO₂) da lenha de bracinga

Ef (%)	Pf (W)	mq (kg)	CO ₂	CO (Nm ³ /kg)	SO ₂
$\bar{x} \pm S$					
12,3±1	241,3±28,4	0,157±0,02	0,1±0	0,01±0	9,60E-06±0
Cv (%)					
8,1	11,8	12,7	12,7	12,7	12,7

A Tabela 3 apresenta os resultados da ANOVA de Kruskal-Wallis e do teste de comparações múltiplas entre postos de Student-Newman-Keuls referente à comparação dos valores de eficiência da espécie de madeira aqui estudada (F Bas 1) com os valores de eficiência dos fogões (Ref 1; Ref 2; Ref 3) avaliados no trabalho de Lau et al. (2013), conforme anteriormente mencionado. Todos os fogões residenciais apresentaram uma baixa eficiência energética média de 2,9 % ± 0,3 (Ref 1), 2,6 % ± 0,5 (Ref 2) e 4,6 % ± 0,2 (Ref 3).

Tabela 3 - Resultados da ANOVA de Kruskal-Wallis e do teste de comparações múltiplas entre postos de Student-Newman-Keuls. Agrupamento por eficiência (%) do fogão para cada espécie de *Eucalyptus*.

P-valor	Eficiência (%)			
	F Bas1	Ref 1	Ref 2	Ref 3
0,0009	12,3±1 A	2,9 % ± 0,3 C	2,6 % ± 0,5 C	4,6 % ± 0,2 B

* As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade (P-valor < 0,05).

Os resultados obtidos evidenciam uma boa qualidade do fogão a lenha aqui proposto, apresentando maior eficiência térmica que os fogões metálicos tradicionalmente utilizados na cidade de Irati/PR e de custo final muito mais acessível às famílias de baixa renda ou mesmo para agricultores que poderão utilizar o equipamento térmico quando se encontram em trabalho de campo.

Os fogões-referência (LAU et al., no prelo 2013) apresentam baixa eficiência no aproveitamento do combustível, decorrente principalmente da perda de calor para as paredes metálicas expostas aos gases de combustão. O isolamento da câmara de

combustão, do protótipo proposto neste estudo, garantiu um melhor aproveitamento da energia útil, possibilitando a concentração de calor na câmara de combustão.

Dados comparativos do fogão a lenha portátil com os fogões-referência são apresentados na Tabela 4 e Figura 6, onde se verifica a relação entre eficiência e quantidade de combustível queimado.

Observa-se uma tendência de diminuição da quantidade de lenha necessária na combustão com o aumento da eficiência, Figura 6. Esse resultado indica que fogões mais eficientes consomem menos lenha e conseqüentemente promovem uma maior economia no uso do combustível.

Outro fator que pode influenciar na eficiência dos fogões a lenha é a umidade desta biomassa. Yuntenwi et al. (2008) citam que o combustível extremamente seco ou excessivamente úmido inibe a eficiência da combustão, conforme comprovado em seus estudos, nos quais os *rocket stoves* apresentaram maior eficiência a 15% de umidade da madeira do que a 5 e 30% (base úmida).

Tabela 4 - Resultados estatísticos comparativos da massa de lenha queimada (m_q) pelo fogão portátil (F- Bas 1) relativo aos três fogões-referência (FR 1, FR 2 e FR 3), sendo Ef a eficiência do fogão a lenha

R	P-valor	F-Bas 1	FR1	FR2	FR3
EF (%)		12,3	2,6	2,9	4,6
m_q (kg)		0,16±0,02	0,44±0,11	0,44±0,04	0,31±0,03
	0,000	C	A	A	C

* Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de comparação entre postos de Student-Newman-Keuls, ao nível de 5% de probabilidade (P-valor < 0,05)

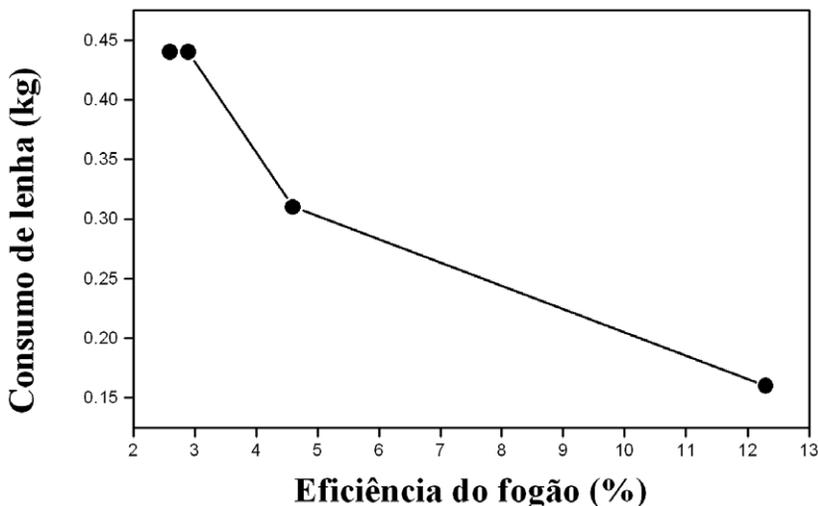


Figura 6 - Comparação da eficiência *versus* quantidade de lenha consumida para o fogão a lenha portátil em conjunto com os três fogões-referência

O fogão portátil apresenta uma economia de combustível em torno de 60% quando comparado aos fogões-referência. Os fogões metálicos tradicionais da cidade de Irati/PR demandam uma maior quantidade de combustível por terem uma menor eficiência de conversão da energia liberada em energia útil e não apresentarem isolamento térmico da câmara de combustão.

Adicionalmente, o fogão portátil apresenta menor potencial de risco à saúde do usuário, decorrente da menor liberação de voláteis, Figura 5, mesmo não contendo chaminé. Desta forma, caso seja usado em interiores residenciais, apresenta uma menor liberação de gases tóxicos, como o monóxido de carbono (Tabela 4), presentes na fumaça no interior das cozinhas.

Segundo a Organização Mundial da Saúde e Normas Americanas, para uma hora de exposição ao CO, o valor limite recomendado é de 40 h-mg/m³. Os resultados apresentados tanto pelo fogão portátil como pelos fogões tradicionais são da ordem de 975 a 2.930% maior que o limite recomendado. Esse dado indica fortes evidências da grande toxicidade a que o usuário de fogão a lenha está exposto em ambiente residencial.

Tabela 5 – Concentração e Exposição ao CO em ambiente interno (cozinha) hipotético para 1 h de consumo de lenha em fogão metálico sem chaminé ou exaustor

	F (kg/h)	Ef (g/kg)	Cmáx (mg/m³)	Cmédio (mg/m³)	E (hmg/m³)
	$\bar{x} \pm S$		$\bar{x} \pm S$	$\bar{x} \pm S$	$\bar{x} \pm S$
FBas1	0,5±0,1 B	99,5	740±94 C	430±54 C	430±54 C
Ref 1	1,3±0,3 A	99,4	2083±507 A	1212±295 A	1212±295 A
Ref 2	1,3±0,1 A	99,4	2069±186 A	1204±108 A	1204±108 A
Ref 3	0,9±0,1 C	99,4	1454±122 B	846±71 B	846±71 B

* Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de comparação entre postos de Student-Newman-Keuls, ao nível de 5% de probabilidade (P-valor < 0,05)

Neste estudo está sendo analisada apenas a emissão de CO, porém se sabe que a fumaça da queima da lenha também contém muitas outras substâncias tóxicas ou potencialmente tóxicas, tais quais compostos cancerígenos como benzeno, 1,3-butadieno, além de dióxido de nitrogênio, aldeídos, hidrocarbonetos aromáticos e material particulado. Adicionalmente, a população de Irati/PR, principalmente da periferia e meio rural, ainda faz uso frequente de fogões a lenha. Uma solução, de menor impacto à saúde do usuário seria o uso de chaminés que diminuam a exposição aos gases tóxicos em mais de 50%, uma maior ventilação do ambiente por meio de janelas, portas e exaustores e o uso de equipamentos térmicos mais eficientes.

Conclusões

Há grande interesse em pesquisas que visem à avaliação da qualidade de fogões a lenha, bem como propostas de novos *designs* que apresentem maior eficiência e menor emissão de poluentes.

O fogão a lenha deste estudo apresentou eficiência na faixa de 12%; potência de 241,3 W; consumo de combustível em torno de 0,5 kg/h e teores de voláteis de aproximadamente 0,1 Nm³/kg de CO₂; 0,01 Nm³/kg de CO e 9,6 10⁻⁶ Nm³/kg para SO₂.

Comparações com fogões metálicos residenciais de Irati/PR mostraram que o fogão proposto por essa pesquisa tem melhor desempenho, por apresentar maior valor de eficiência e menor concentração de CO médio (430 mg/m³) e máximo (740 mg/m³) bem como de Exposição ao gás (430 mg/m³) por uma hora de uso em uma cozinha hipotética.

Em linhas gerais, os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciam o desempenho superior do fogão proposto quando comparado com fogões metálicos tradicionais da cidade de Irati/PR, com baixo custo na sua construção e praticidade de uso. Além disso, os protótipos representam menor risco à saúde do usuário, como no caso dos fogões metálicos, nos quais ocorre liberação de gases tóxicos, como o monóxido de carbono, presentes na fumaça no interior das cozinhas das casas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao professor Luiz Augusto Horta Nogueira, da UNIFEI, pela colaboração nas etapas iniciais desta pesquisa, com os alunos da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO): Helene Pereira, Reinaldo Senra Carvalho Jr., Thiare Aparecida do Valle Coelho e Wiliann Rospirski Oliveira.

Referências

BORGES, Thomaz Pentead de Freitas. *Fogão a lenha de combustão limpa*. São Paulo, 1997, 121 p. 1997. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica - Departamento de energia) - Universidade de Campinas, 1997.

BRAND, Martha Andreia. *Energia de biomassa florestal*. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 114p.

BRASIL. Empresa de pesquisa de energética. *Balanco Energético Nacional 2012: Ano base 2010*. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2013.

BRITO, José Otávio. Expressão da produção florestal em unidades energéticas. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1., CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. *Anais...* Curitiba: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 1993. p.280-282.

_____. O uso energético da madeira. *Estudos avançados*, v. 21, n. 59, p.185–193, 2007.

BRITO, José Otávio; CINTRA, Tânia Cerbino. Madeira para energia no Brasil: realidade, visão estratégica e demanda de ações. *Biomassa & Energia*, v. 1, n. 2, p. 157-163, 2004.

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva; GÓMEZ, Edgardo Olivares *Biomassa para energia*. Campinas: Unicamp, 2009. 735p.

EMBRAPA. *Eucaliptos indicados para plantio no estado do Paraná*: Documento 129. Colombo, PR, 2006. 45p.

JOSHI, Veena; VENKATARAMAN, Chandra; AHUJA, Dilip R. Emissions from Burning Biofuels in Metal Cookstoves. *Environmental Management*, v. 13, n. 6, p. 763-772, 1989.

LAU, Pâmela Caroline; MACHADO, Gilmara de Oliveira; NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; CRISTOFORO, André Luis; GONÇALVES, Decio; LAHR, Francisco Antonio Rocco. Evaluation of the efficiency energy of wood stove from Irati Brazilian city. *International Journal of Agriculture and Forestry*, v.3, n.7, pp: 267-272, 2013.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; LORA, Electo Eduardo Silva. *Dendroenergia: fundamentos e aplicações*. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 200p.

NORTHCROSS, Amanda L.; HAMMOND, Katharine; CANUZ, Eduardo; SMITH, Kirk R. Dioxin inhalation doses from wood combustion in indoor cookfires. *Atmospheric Environment*, v. 49, p. 415-418, 2012.

PARIKH, Jigisha; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G.K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, v. 84, p. 487-494, 2005.

REGUEIRA, Tainah Madureira. *Comparação entre a eficiência de dois modelos de fogão a lenha e seus impactos sobre o desmatamento da caatinga*. 2010. 38 p. Monografia (Bacharelado em Ciências Biológicas) - Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2010.

ROCKET STOVE. Disponível em: <<http://www.rocketcityspacepioneers.com/space/rocket-stove>>. Acesso em: 30 ago. 2013.

ROSILLO-CALLE, Frank; BAJAY, Sergio, ROTHMAN, Harry *Uso da biomassa para produção de Energia na indústria brasileira*. Campinas: Unicamp, 2005. 448p.

SEIXAS, Fernando; COUTO, Laércio; RUMMER, Robert. Colheita de Plantios Arbóreos de Curta Rotação para Energia. *Biomassa & Energia*, v. 3, n. 1, p. 1-16, 2006.

TESTE de uso múltiplo de eucaliptos: tume. Disponível em:<<http://www.ipef.br/eventos/2010/eucaliptocultura/06-TUME.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2012.

YUNTENWI, Tangang Yuntewi; MACCARTY, Nordica; STILL, Dean; ERTEL, Jürgen. Laboratory study of the effects of moisture content on heat transfer and combustion efficiency of three biomass cook stoves. *Energy for Sustainable Development*, v. 12, n. 2, jun., 2008.

ZHANG, J.; SMITH, Kirk; UMA, R.; MA, Y.; KISHORE, Vipuil; KHALIL,

Mak. *Carbon monoxide from cookstoves in developing countries*: 1. Emission factors. *Chemosphere: Global Change Science*, 1999. v. 1, p. 353 – 366.

Artigo recebido em: 25 abr. 2015

Aceito para publicação em: 19 out. 2015