

DESEMPENHO AMBIENTAL E ENERGÉTICO DE UM BIOCOMBUSTÍVEL SÓLIDO OBTIDO DE RESÍDUOS DE MADEIRA GERADOS EM ÁREA METROPOLITANA¹

Environmental and Energy Performance of an Alternative Biomass Fuel Obtained from Wood Residues Generated in a Metropolitan Area

Gilberto Caldeira Bandeira de Melo² e Artur Tôrres Filho³

Resumo: Neste trabalho é apresentado o resultado de experimentos relacionados com o desenvolvimento e o uso de resíduos descartados no aterro sanitário da cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, como matéria-prima para produção de um combustível de biomassa alternativo para utilização em plantas industriais de pequena escala. Amostras dos resíduos de madeira descartados no aterro municipal foram coletadas e submetidas a um processamento mecânico e térmico, para gerar um produto uniforme com características próprias para uso como combustível. Em escala laboratorial, o poder calorífico foi medido, após diferentes tratamentos térmicos, com o objetivo de determinar as melhores condições de processamento para aumentar o valor energético do combustível. Com os resultados dos testes laboratoriais, foram realizados os testes em escala industrial. A liberação de energia no abastecimento de um forno de padaria foi analisada, juntamente com a amostragem isocinética dos gases e determinação do material particulado liberado para atmosfera na queima. Os mesmos procedimentos foram feitos para comparação entre a) o resíduo de madeira com processamento termomecânico e b) a madeira crua. Os resultados mostraram que o poder calorífico inferior dos resíduos de madeira (16,3 MJ kg⁻¹) é maior que o da madeira crua (13,2 MJ kg⁻¹) e que ele aumentava após para 17,4 MJ kg⁻¹ a secagem. Com o tratamento térmico, foi estabelecida a melhor faixa de temperatura de trabalho, variando de 220 a 240 °C, tendo o calor específico atingido 18,7 MJ kg⁻¹. No forno industrial, o uso do combustível alternativo apresentou os melhores resultados para liberação de energia e emissão de material particulado. Para o combustível tratado entre 220 e 240 °C, a concentração de material particulado nos gases de exaustão foi de 137 mg Nm⁻³ e a taxa de emissão específica foi de 1,7 g de particulados para cada kg de combustível queimado, ao passo que para a madeira crua esses valores foram 203 mg Nm⁻³ e 4,6 g kg⁻¹, respectivamente. Uma estimativa do potencial de redução de emissões de gases do efeito estufa também é apresentada, e constatou-se que 1 tonelada do biocombustível é capaz de reduzir as emissões de CO₂ equivalentes a a) 1,3 tonelada por impedir a formação de metano nos aterros; b) 0,4 tonelada por não utilizar combustíveis fósseis; e, ou, c) 0,18 tonelada por melhorar a eficiência energética em fornos convencionais de madeira.

Palavras-chave: Combustíveis de biomassa, energia, emissões de gases de efeito estufa, emissões de material particulado.

¹ Recebido para publicação em 5.5.2006 e aceito em 23.6.2006.

² Engenheiro Químico, Dr.-Ing. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais – DESA/UFMG, Av. do Contorno 842, 7º andar, 30110-060 Belo Horizonte-MG, Tel.: +5531 3238-1934, Fax.: +5531 3238-1879, <gilberto@desa.ufmg.br>. ³ Engenheiro Agrônomo, Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Diretor Técnico da Engenho 9 Engenharia Ambiental Ltda., Av. B, nº 100, Bairro Liberdade, Ribeirão das Neves-MG, PABX.: (31) 3624-0670, <artur@engenho9.com.br>.

Abstract: This paper presents the results of experiments carried out to evaluate the development and use of wood residues discharged as waste in Belo Horizonte, Brazil, as raw material for the production of an alternative biomass fuel for use in small scale industrial plants. Samples of the wood wastes discharged in the municipal solid waste landfill were collected and submitted to mechanical and heat processing, to produce a uniform product with proper characteristics for use as fuel. In a laboratory scale, the heat content after different thermal treatments was measured, to determine the optimal processing conditions for improving the calorific value of the fuel. The full scale industrial experiments were performed, based on the laboratory test results. The energy release in fueling an industrial oven of a bakery was assessed, together with the isokinetic sampling and determination of particulate and gaseous releases to the atmosphere. The same determinations were performed for comparison among the (a) thermal and mechanical processed wood residues at two different temperatures and (b) coarse timber. The results showed that the inferior heating values for wood residues (16.3 MJ kg^{-1}) were higher than for fresh timber (13.2 MJ kg^{-1}), and increased after complete drying to 17.4 MJ kg^{-1} . With thermal processing, the optimal condition at industrial testes was obtained at temperature range from 220 to 240 °C, where the heating value reached 18.7 MJ kg^{-1} . In an industrial oven, the use of alternative fuel showed the best results for energy release and atmospheric emissions of particulates. For fuel treated at 220 to 240 °C, the particulate concentration measured in the exhaust gases was 137 mg Nm^{-3} and the specific emission rate was 1.7 g of particulates for each kg of fuel burnt, whereas for the coarse wood, they were 203 mg Nm^{-3} and 4.6 g kg^{-1} , respectively. An estimate of the potential for reducing emissions of greenhouse gases was also presented, and it was found that 1 t of biofuel is able to reduce the equivalent to CO_2 emissions of: a) 1.3 t, by avoiding methane formation in the landfill; b) 0.4 t, by switching the use of fossil fuel; and/or c) 0.18 t, by improving energy efficiency under conventional timber ovens.

Keywords: biomass fuels, energy, greenhouse gas emissions, particulate emissions.

1 INTRODUÇÃO

O uso de madeira como fonte de energia é uma das práticas humanas mais antigas. De fato, a capacidade de dominar o fogo é considerada um ponto crucial na transição da sociedade primitiva para a civilização. Madeira e carvão vegetal permaneceram como as principais fontes de energia por grande parte da história da humanidade, e apenas com o advento da Revolução Industrial o carvão mineral e outros combustíveis fósseis se tornaram dominantes em países desenvolvidos.

No Brasil, por exemplo, a madeira foi responsável por mais de 50% das fontes térmicas de energia da década de 1950, e apenas nas quatro últimas décadas seu uso diminuiu – estima-se que hoje a biomassa corresponda a aproximadamente 27% da energia consumida (REZENDE, 1982). Em

Minas Gerais, o balanço de energia mostrou (CEMIG, 2003) que a lenha e seus derivados foram responsáveis, em 2002, por 8,5 milhões de TEP (toneladas equivalentes de petróleo), o que corresponde a 30,9% da demanda total de energia do Estado. O consumo de madeira e seus derivados forneceu 35,6% da energia total para atividades industriais e 35,6% da residencial, o que mostra que ela é ainda uma fonte de energia estratégica e importante. Contudo, a energia útil final obtida por diferentes fontes primárias de energia mostra que a biomassa tem uma participação menor, principalmente por causa da baixa eficiência dos sistemas de conversão para uso de biomassa (fornos, conversores de carvão etc.).

As mudanças climáticas relacionadas com a queima das reservas de combustíveis fósseis e o aumento dos preços do petróleo estão impondo a tendência de aumento do uso de madeira e biomassa como fontes de

energia. Esse incentivo deve ser seguido por algumas restrições e regulamentações, como o planejamento e o manejo adequado do uso do terreno, de modo a proteger os ecossistemas naturais e o controle das emissões atmosféricas nos sistemas de combustão. Por ser grande a quantidade de energia demandada pelas atividades humanas, a otimização do uso da biomassa como combustível passa a ser uma meta prioritária. Esta pode incluir o uso de resíduos da agricultura e da silvicultura e a gestão dos resíduos urbanos como possíveis fontes de energia.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho descreve os resultados de um experimento para desenvolvimento e uso

de resíduos de madeira descartados como lixo na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, como matéria-prima para produção de um combustível alternativo de biomassa para uso em unidades industriais de pequena escala, como padarias e indústrias alimentícias. Resíduos de madeira descartados no aterro municipal foram separados e submetidos a tratamento termomecânico, com o objetivo de gerar um produto uniforme, com características para ser utilizado como combustível.

Os experimentos foram realizados em duas fases (Figura 1). Primeiramente, em escala laboratorial, as amostras foram trituradas e as condições otimizadas para processamento térmico foram avaliadas. O objetivo foi processar as amostras em um forno

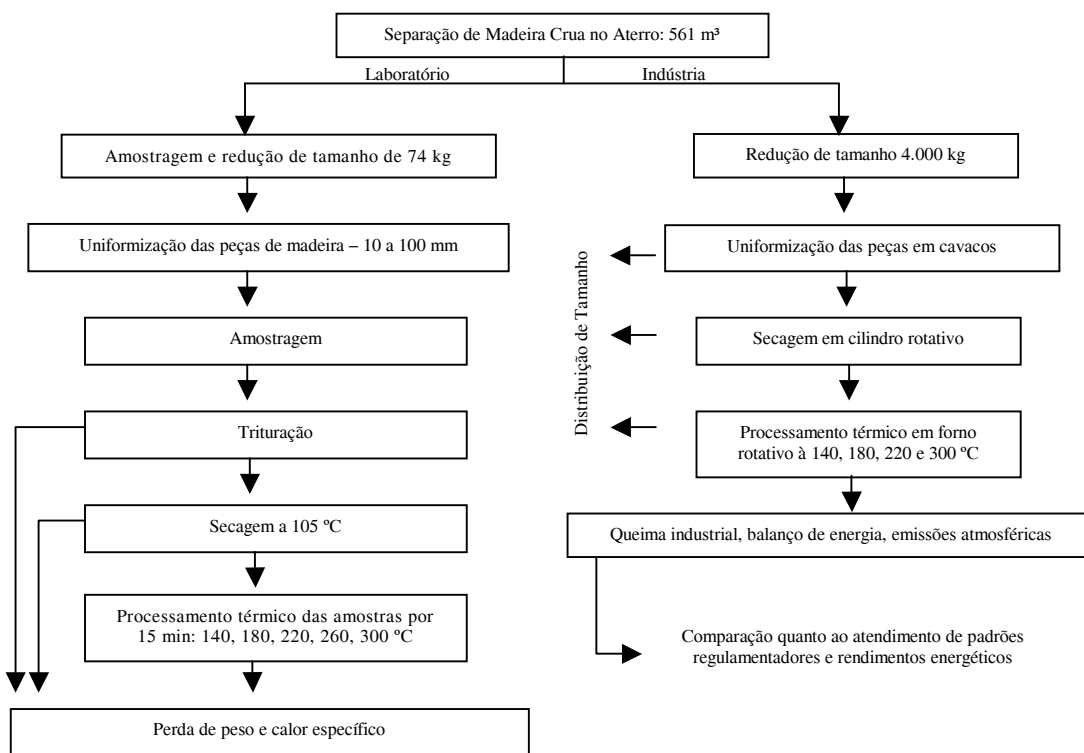


Figura 1 – Fluxograma do experimento realizado, incluindo os testes de laboratório (na esquerda) e os testes em escala industrial (na direita).

Figure 1 – Scheme of the experiments undertaken, including the laboratory tests (on the left) and the industrial scale tests (on the right).

elétrico, alcançando uma conversão térmica controlada da madeira em temperaturas abaixo do processo de carbonização, aumentando seu poder calorífico. No primeiro experimento foi utilizada uma amostra de 14 kg dos resíduos de madeira, gerada pela redução de tamanho de 74 kg de resíduos de madeira obtidos no aterro. A amostra foi triturada para passar na peneira de 60 mesh (0,25 mm), e seca a 105 °C até peso constante. Pequenas porções da amostra foram submetidas ao processamento térmico dentro de um recipiente aberto, que foi aquecido em forno elétrico por 15 minutos, em diferentes temperaturas, sendo o recipiente imediatamente fechado com uma tampa de cerâmica depois do tratamento, para evitar a combustão espontânea das amostras. As seguintes temperaturas foram utilizadas do tratamento térmico: 140, 180, 220, 260 e 300 °C. Para cada temperatura, e para uma amostra sem tratamento térmico, os calores específicos foram determinados em uma bomba calorimétrica, assim como as perdas de massa durante o processo. Para medição do poder calorífico foram utilizados aproximadamente 4 g das amostras, e medições em triplicatas foram realizadas.

Depois da análise dos resultados obtidos, um segundo teste de laboratório foi feito, como descrito anteriormente, seis meses depois, usando outra amostra de 12 de 74 kg de madeira armazenada. A amostra foi triturada até 0,25 mm, seca e submetida a tratamentos térmicos em recipientes fechados de cerâmica, por 15 minutos, nas seguintes temperaturas: 200, 210, 220 e 230 °C. Depois de resfriado à temperatura ambiente, as amostras termoprocessadas foram mantidas em recipientes abertos no laboratório e pesadas novamente após 24, 48 e 72 horas, de modo a determinar a capacidade de absorção de água, assim como determinar sua estabilidade durante a estocagem.

Usando os resultados dos testes laboratoriais, foram então realizados os experimentos

em escala industrial. Aproximadamente 4.000 kg de resíduos de madeira foram separados no aterro, sendo a maioria proveniente de podas urbanas (supressão ou podas de vegetação). Nos estabelecimentos comerciais também são utilizados resíduos de madeira descartados no aterro por residências e atividades comerciais e industriais. O resíduo foi processado mecanicamente (redução de tamanho entre 10 e 100 mm), e submetido ao tratamento térmico, em um cilindro rotativo (1,2 m de diâmetro e 1,86 m de comprimento), aquecido interna e externamente (parede dupla) pela circulação de gases quentes gerados na combustão de pequenas frações de madeira em um forno separado. O fornecimento de calor foi regulado por válvulas que controlavam o fluxo de gases quentes no cilindro. As peças de madeira foram processadas em operação por batelada no cilindro rotativo, no qual permaneceram por 15 minutos no alcance final de temperaturas selecionadas: a) 160 a 180 °C; b) 200 a 220 °C; c) 220 a 240 °C; e d) 240 a 260 °C. Depois do tratamento térmico, o conteúdo do cilindro foi descarregado em telas ventiladas, para resfriamento à temperatura ambiente.

O combustível alternativo obtido foi testado em um forno industrial de uma padaria na cidade de Belo Horizonte. Durante os períodos diários de produção (de 2 às 16 horas), nos quais a temperatura do forno foi mantida de 180 a 200 °C, o uso do combustível alternativo foi testado, com a medição das emissões atmosféricas de material particulado nos gases de exaustão, por meio do método de amostragens isocinéticas (US-EPA Method 5). Os seguintes combustíveis foram testados no forno industrial:

- a) Cavacos de madeira processados mecanicamente e tratados termicamente de 160 a 180 °C.
- b) Cavacos de madeira processados mecanicamente e tratados termicamente de 220 a 240 °C.

- c) Peças de madeira convencionais sem tratamento térmico e mecânico (lenha).

Para cada combustível, o procedimento de amostragem isocinética foi realizado em três séries, com amostragens de 60 minutos em cada série, tendo os parâmetros a seguir sido analisados em 12 pontos na seção da chaminé: temperatura, umidade, velocidade do gás, composição do gás, fluxo gasoso e fluxo gasoso corrigido para as condições normais de temperatura e pressão, concentração de material particulado e taxa de emissão de material particulado.

Uma vez que a viabilidade ambiental do combustível alternativo foi confirmada, uma estimativa do potencial de redução dos gases do efeito estufa foi realizada, sobre a suposição que o uso do combustível alternativo pode ser capaz de evitar as seguintes emissões:

- a) Por evitar a biodegradação anaeróbica de resíduos enviados ao aterro, evitando a formação de metano.

- b) Por substituir os combustíveis fósseis nos processos industriais, reduzindo as emissões de CO₂.

- c) Por aumentar as eficiências térmicas dos fornos que utilizam lenha como combustível, evitando as emissões de CO₂, proporcionalmente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 1 estão os resultados dos poderes caloríficos das amostras processadas nos experimentos laboratoriais. Constata-se que os menores valores de poder calorífico dos resíduos de madeira (16,3 MJ kg⁻¹ pelo segundo experimento) foram maiores que os valores citados na bibliografia para madeira crua (13,2 MJ kg⁻¹ para madeira crua com 30% de umidade, de acordo com DINIZ, 1981). Esse fato ocorre em virtude de os resíduos usados terem ficado armazenados em condições expostas ao ambiente por no mínimo 120 dias, aumentando seu grau de secagem. Depois de secos a peso constante, em 105 °C, o poder calorífico aumentou para

Quadro 1 – Valores médios do poder calorífico (inferior e superior) e perdas de peso relacionados às amostras sem tratamento nos experimentos em laboratório

Table 1 – Mean heating values (higher and lower) and weight losses related to the untreated sample in the laboratory experiments

Tratamento Térmico	Primeiro Experimento (cadinho aberto)			Segundo Experimento (cadinho fechado)		
	Calor Específico (MJ kg ⁻¹)		Perdas de peso (%)	Calor Específico (MJ kg ⁻¹)		Perdas de peso (%)
	Inferior	Superior		Inferior	Superior	
Sem tratamento	-	-	0,00	16,31	17,68	0,00
105 °C (seca)	16,18	17,55	13,00	17,40	18,71	5,73
140 °C	18,73	20,08	13,38	-	-	-
180 °C	19,05	20,39	14,88	-	-	-
200 °C	-	-	-	19,12	20,42	7,14
210 °C	-	-	-	19,13	20,46	7,16
220 °C	21,57	22,05	48,92	19,14	20,49	7,28
230 °C	-	-	-	19,15	20,50	7,29
260 °C	22,43	22,43	51,12	-	-	-
300 °C	23,81	23,81	74,78	-	-	-

17,4 MJ kg⁻¹. A condição escolhida para o tratamento térmico foi de 200 °C, tendo o poder calorífico atingido 19,1 MJ kg⁻¹, um ganho de 17% comparado ao do material cru, ou de 45% quando comparado ao da madeira convencional. O aumento da temperatura acima desse nível foi considerado desnecessário, uma vez que o ganho em calor específico foi muito pequeno. No primeiro experimento, com o recipiente aberto, as altas perdas de peso no tratamento térmico indicaram que a pirólise da madeira ocorreu de forma muito intensa e o acesso de oxigênio do ar resultou em uma carbonização descontrolada. Os altos ganhos no calor específico foram compensados pelas perdas de peso.

No uso industrial para liberação de energia em um forno de padaria, os combustíveis alternativos preparados apresentaram os melhores resultados, tanto para liberação de energia quanto para emissões atmosféricas, comparados com os da lenha convencional. A Figura 2 mostra fotos de um forno de padaria queimando lenha convencional e do combustível processado termicamente (220

a 240 °C). Pode-se constatar que a liberação de energia do combustível alternativo é muito mais intensa. A estabilidade das condições operacionais do forno foi também mais evidente, uma vez que o suprimento de oxigênio e a liberação de energia no forno queimando o combustível alternativo foram muito mais suaves, comparados com a alimentação de peças grandes de lenha úmida, no procedimento convencional de operação.

O Quadro 2 mostra os resultados dos poderes caloríficos medidos para o processamento térmico da madeira na fornalha industrial. A faixa de temperatura entre 220 a 240 °C, foi considerada a melhor condição para o tratamento térmico, pois é onde o poder calorífico inferior é o mais próximo dos melhores resultados obtidos nos testes laboratoriais.

No Quadro 3 estão as medições de material particulado quando foram usados os três combustíveis testados. Pode-se perceber que as emissões da queima do combustível alternativo são muito menores, atendendo aos padrões de lançamento do Estado de Minas Gerais, de 150 mg Nm⁻³, sem a

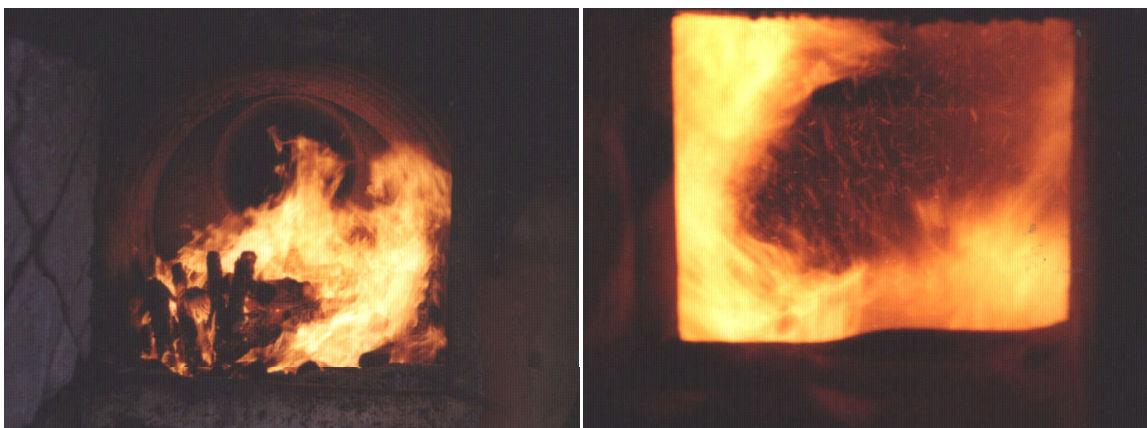


Figura 2 – Fotografia do forno de uma padaria queimando lenha convencional (esquerda) e do combustível alternativo obtido através do processamento térmico e mecânico (220-240 °C) de resíduos de madeira (direita), mostrando a diferença na liberação de energia em ambos os casos.

Figure 2 – Photographs of the bakery furnace burning conventional timber (left) and alternative fuels obtained by mechanical and thermal processing (220-240 °C) of wood residues (right), showing the difference in energy release intensity in both situations.

Quadro 2 – Valores médios do poder calorífico (inferior e superior) dos combustíveis obtidos no tratamento térmico industrial

Table 2 – Mean heating values (higher and lower) of the obtained fuels in the industrial thermal treatment experiments

Tratamento Térmico	Calor Específico (MJ kg ⁻¹)		Perda de Peso (%)
	Inferior	Superior	
160 a 180 °C	18,13	19,48	10,5
200 a 220 °C	19,78	20,08	17,5
220 a 240 °C	18,73	20,03	18,9
240 a 260 °C	19,10	19,98	21,5

necessidade de equipamentos de tratamento de gases de exaustão. Este é um importante benefício econômico do uso do combustível alternativo, uma vez que ele pode substituir a lenha convencional sem a necessidade de sistemas de controle atmosférico. A taxa de emissão de particulados relacionada com o combustível utilizado mostra a grande diferença entre os experimentos: o combustível termoprocessado rendeu 1,7 g de particulados para cada kg de combustível queimado, tendo esta taxa sido de 4,6 g kg⁻¹ para a madeira.

Pelo fato de o forno da padaria ter sido alimentado manualmente quando queimava a lenha convencional e ter sido utilizado um

aparato automático para alimentação de cavacos de madeira por uma hélice rotativa, à velocidade constante, quando queimados os combustíveis alternativos, não foi possível otimizar a operação, alcançando diferentes consumos de combustível em cada caso. Neste experimento, não foi possível obter o balanço de energia para medição do calor útil. Outros experimentos serão realizados para medir os ganhos na liberação de calor, a sua transferência para o uso final e a potencial redução do consumo de combustível quando se substitui a lenha convencional pelo combustível alternativo.

No caso da substituição de um forno a óleo pelo combustível alternativo, pode-se estimar que o equipamento terá de ser adaptado, com um substancial aumento da zona de reação e adequação do suprimento de ar. As razões para esses ajustes estão relacionadas tanto com o valor calorífico dos combustíveis (kJ m⁻³) como com a intensidade de liberação do calor (cinética da reação), que são menores no caso de uso de pedaços de lenha do que no uso de óleo combustível. Contudo, o combustível alternativo irá evitar a necessidade de tratamento dos gases de exaustão e terá preços menores, o que faz com que seu uso seja altamente promissor em um futuro próximo.

Quadro 3 – Emissões atmosféricas de material particulado de um forno industrial de padaria queimando lenha convencional e os combustíveis alternativos obtidos por tratamento térmico de resíduos de madeira com dimensões entre 10 e 100 mm

Table 3 – Atmospheric emissions of particulate matter by an industrial bakery oven burning conventional timber and the alternative biofuels obtained by thermal treatment of wood residues at sizes 10 to 100 mm

Parâmetro	Combustível		
	Lenha Convencional	Biocombustível tratado de 160 a 180 °C	Biocombustível tratado de 220 a 240 °C
Temperatura dos gases de exaustão (°C)	242	213	259
Vazão dos gases de exaustão (Nm ³ h ⁻¹)	371	381	363
Material Particulado (mg Nm ⁻³)	203	111	137
Taxa de emissão (g h ⁻¹)	74,7	42,4	49,5
Taxa específica de emissão (g kg ⁻¹)	4,57	2,77	1,73

Quadro 4 – Redução potencial de CO₂ quando usados 1 tonelada de biocombustível alternativo para três tipos de mecanismos

Table 4 – Potential CO₂ emission reduction when using 1 ton of the alternative biofuel for three types of mechanisms

Mecanismo ⁽¹⁾	Potencial de Redução (toneladas de equivalente de CO ₂)
Eliminação da formação de metano nos aterros ⁽²⁾	1,294
Substituição de óleo combustível ⁽³⁾	0,395
Melhora da eficiência energética em fornos de lenha ⁽⁴⁾	0,177

⁽¹⁾ O consumo de energia para o tratamento térmico do biocombustível não foi considerado, uma vez que o seu aquecimento pode ser fornecido em uma produção industrial de biocombustível pelas peças de madeiras menores que 10 mm, não-utilizadas. ⁽²⁾ Foram utilizados valores-padrão do IPCC (1996) para formação de metano a partir de resíduos de madeira, e do *Global Warming Potential of Methane*. ⁽³⁾ Poder calorífico e fatores de emissão para óleo combustível do IPCC (1996) foram utilizados, comparados com os poderes caloríficos do biocombustível apresentados neste trabalho. ⁽⁴⁾ A diferença medida de 45% do poder calorífico do biocombustível, comparado com a lenha seca, e o fator de emissão de CO₂ para biomassa sólida, obtidos do IPCC (1996), foram utilizados.

Outro ponto a ser considerado é que as emissões de gases do efeito estufa podem ser substancialmente reduzidas se o combustível alternativo for utilizado. O Quadro 4 apresenta a redução potencial de CO₂ para três tipos de mecanismos, quando 1 tonelada de biocombustível for utilizada: a) por evitar a formação de metano no aterro (1,3 t de equivalente de CO₂), por substituir o óleo combustível (0,4 t de CO₂), ou por melhorar a eficiência energética de fornos de lenha existentes (0,177 t de CO₂). É importante ressaltar que os mecanismos são aditivos, quando o biocombustível é usado para alcançar o Certificado de Redução de Emissões de acordo com os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Kyoto (UNFCCC, 2002).

4 AGRADECIMENTOS

À empresa Engenho 9 Engenharia Ambiental Ltda., pelo apoio financeiro às pesquisas.

REFERÊNCIAS

- COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG. **18º Balanço Energético do Estado de Minas Gerais – BEEMG**. Belo Horizonte, CEMIG, 2003, 184 p. Disponível em: <www.cemig.com.br>. Acesso em: 10 dez. 2004.
- DINIZ, V. Y. **Caldeiras a lenha**. Belo Horizonte: Fundação CETEC, 1981. p. 113-131.
- IPCC. Revisited 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Reference Manual, Volume 3. IPCC, 1996. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.htm>. Acesso em: 10 dez. 2004.
- REZENDE, C. G. Implantação e produtividade de florestas para fins energéticos. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982. p. 9-24.
- UNFCCC. Report of the Conference of the Parties on its Eight Session, realizado em New Delhi de 23 de Outubro a 1 de Novembro 2002, Anexo II: Simplified Modalities and Procedures for Small-Scale Clean Development Mechanism Project Activities. Disponível em: <www.unfccc.int>. Acesso em: 10 dez. 2004.