

REAPROVEITAMENTO DE DORMENTES DE MADEIRA DA ESTRADA DE FERRO CARAJÁS PARA A COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA*

REUSE OF WOOD TIES FROM CARAJÁS RAILWAY FOR THE COGENERATION OF ELECTRICITY

Fábio Gorayeb Damasceno

Engenheiro sanitaria pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Mestre em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais pelo Programa de Mestrado Profissional do Instituto Tecnológico Vale (ITV) – Belém (PA), Brasil.

Valente José Matlaba

Doutor em Economia pela University of Waikato (UoW). Pesquisador do ITV – Belém (PA), Brasil.

Jorge Filipe dos Santos

Doutor em Engenharia Geográfica pela Universidade de Coimbra (UC). Pesquisador Associado do (ITV) – Belém (PA), Brasil.

José Aroudo Mota

Doutor em Desenvolvimento Sustentável pela Universidade de Brasília (UnB). Pesquisador Titular do ITV – Belém (PA), Brasil.

*Este artigo deriva da dissertação de mestrado profissional do primeiro autor defendida em 30 de maio 2015 no Instituto Tecnológico Vale (ITV). Os autores agradecem os comentários e sugestões do Prof. Dr. Paulo Antônio de Souza (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*) e Prof. Dr. Gustavo Pessin (ITV) e dos pareceristas anônimos, mas não os responsabilizam por eventuais erros e omissões neste trabalho.

Endereço para correspondência:

Valente José Matlaba – Instituto Tecnológico Vale – Rua Boaventura da Silva, 955 – Umarizal – 66055-090 – Belém (PA), Brasil – E-mail: valente.matlaba@itv.org

Recebido: 23/11/2016

Aceito: 03/07/2017

RESUMO

O descarte de resíduos de dormentes de madeira tem importância ambiental e econômica. Todavia, os estudos específicos que testam e avaliam a sustentabilidade de alternativas de sua destinação adequada praticamente são inexistentes. Este artigo avaliou os aspectos ambientais e econômicos do coprocessamento dos dormentes de madeira com biomassa florestal para produzir eletricidade em unidade termelétrica. Os procedimentos consistiram em aplicação de testes em branco e de queima utilizando métodos recomendados por instituições e agências nacionais e internacionais. Nesses testes foram coletadas amostras dos gases emitidos pela chaminé e cinzas residuais utilizando apenas biomassa de origem florestal. O experimento de queima consistiu na mistura de biomassa com dormentes de madeira triturada na proporção de 1/5. As comparações mostraram que os parâmetros da dimensão ambiental obtidos estavam nos limites estabelecidos para emissões atmosféricas na legislação ambiental brasileira de incineração de resíduos, exceto para material particulado e das dioxinas e furanos. Se existir um controle eficiente de emissões gasosas, especialmente destas últimas, os resultados mostraram que o reaproveitamento energético da madeira é ambientalmente sustentável. Na dimensão econômica, considerando certas premissas, tais como a potência da termelétrica de 5 MW, a produção nominal de 43.800 MWh por ano e o consumo de biomassa em torno de 70 mil t anuais, a substituição da biomassa por 20% de dormentes reduz em 19,2% o custo total anual da matéria-prima utilizada no processo de geração.

Palavras-chave: resíduos de dormentes; geração de eletricidade; sustentabilidade.

ABSTRACT

The wood ties waste has environmental and economic importance. However, specific studies to test and evaluate sustainability of adequate destination alternatives for wood ties residuals basically do not exist. This article evaluates the environmental and economic aspects of co-processing of wood ties with forestry biomass to produce electricity in a thermoelectric plant. The procedures involved the application of blank and burn tests using methods recommended by national and international institutions and agencies. In the blank test, samples of emissions of gases from the chimney and residuals ashes using only forestry biomass were taken. The burn test consisted of mixing biomass with crushed wood ties chips in the ratio 1 to 5. Comparisons showed that the obtained values for the environmental parameters were within the permissible limit for the atmospheric emissions set by the Brazilian environmental law of waste incineration. Results show that with efficient control of gas emissions, especially for particulates, dioxins and furans, the energy generation process with reused wood is environmentally sustainable. In economic dimension, under certain assumptions such as thermoelectric power rating of 5 MW, nominal production of 43800 MWh per year and biomass consumption of about 70 thousands tons per year, the substitution of biomass by 20% of wood ties reduced in 19.2% the total annual cost of raw materials used in the generation process.

Keywords: wood ties waste; electricity generation; sustainability.

INTRODUÇÃO

A estrutura de uma via férrea necessita de uma sustentação dos trilhos de aço que garanta a absorção de impactos e trepidações inerentes ao transporte ferroviário. As peças transversais que fazem a sustentação da parte superior da estrutura de uma trilha férrea são chamadas dormentes, os quais amortecem os impactos e os transferem ao lastro e sublastro, conferindo segurança ao transporte de passageiros e cargas.

A utilização desse material em ferrovias se iniciou por volta de 1820, quando, pela primeira vez, foram substituídas pedras por travessas de madeira em estrada de ferro situada em Boston, Estados Unidos. A prática se tornou comum em todo o mundo devido à abundância da madeira. Todavia, ao longo do tempo as pressões por recursos naturais constituíram um alerta para a necessidade de ampliar a vida útil dos dormentes de madeira (ALVES, 2005). As pressões mundiais pela preservação do meio ambiente e a própria escassez dessa matéria-prima obrigam as empresas com operações ferroviárias a buscarem alternativas para esse material. As pesquisas apontam avanços significativos na fabricação de dormentes com polímeros (plástico rígido combinado com outros elementos) que evitam o corte de árvores e são provenientes de materiais recicláveis. Atualmente, existem opções de substituição da madeira por concreto, aço, plástico rígido e borracha (MANALO *et al.*, 2010; FERDOUS *et al.*, 2015). No entanto, no Brasil a produção com outros materiais ainda é insuficiente para atender à demanda anual de 1,5 milhão de unidades. Apesar disso, a utilização de aço e de concreto já tem ampla aplicação em ferrovias no Brasil (e.g., VALE e MRS). Nas classes das madeiras, o eucalipto é considerado inferior às árvores nobres, mas tem sido a solução para a fabricação de dormentes em larga escala por possuir a mesma vida útil e proporcionar ganhos ambientais pelo manejo sustentável (SALLES, 2009).

A primeira parte da literatura consultada sobre dormentes de ferrovias se refere a importância, características estruturais e físicas, especificações, formas de tratamento e materiais de fabricação. Foram estudadas particularidades técnicas e consultados especialistas que atuam na via permanente da Estrada de Ferro Carajás (EFC). Analisaram-se ainda as vantagens e desvantagens dos materiais utilizados na fabricação de dormentes, tais como madeira, aço, concreto, borracha e plástico rígido (PACHA, 2003; SALLES, 2009; MANALO

et al., 2010; DAMASCENO, 2015). Para contextualizar a problemática da destinação de dormentes de madeira descartados como íntegros (peças fora de especificação) ou não íntegros (pedaços e lascas), é importante compreender o seu papel na linha férrea, assim como a origem da madeira e a forma de produção.

A segunda parte dos documentos examinados se refere especificamente aos possíveis reaproveitamentos das sucatas de dormentes. A produção desses a partir da madeira envolve o uso de produtos químicos tóxicos que não se degradam facilmente com o tempo (VIDAL *et al.*, 2015; MARCOTTE *et al.*, 2014). Tal aspecto limita bastante as possibilidades de reutilização dos dormentes rejeitados. Para ultrapassar essa limitação, Ferrarini *et al.* (2016) estudaram uma opção de descontaminação desse tipo de resíduo, no entanto não fazem uma análise da viabilidade econômica do processo. Vários autores consultados apontam que a queima controlada para geração de energia é uma opção viável (BROUWER *et al.*, 1995; FALK; MCKEEVER, 2004; GENOVESE *et al.*, 2006; GOMES *et al.*, 2014; HELSEN *et al.*, 1998; HERY, 2004; RENDEIRO *et al.*, 2008; TASKHIRI *et al.*, 2016; RAMOS *et al.*, 2017). Brouwer *et al.* (1995) estudaram o problema da queima desse tipo de resíduo com carvão e constataram a dificuldade no controle de emissão de gases nocivos. Todavia, apresentaram vantagens desse processo: baixos custos operacionais, de manutenção e ambientais. Falk e McKeever (2004) abordam o problema da destinação da madeira descartada nos Estados Unidos apontando como um passivo ambiental a forma tratada do dejetivo, como é o caso dos dormentes. Ramos *et al.* (2017), considerando a Região Amazônica, analisam o processo de industrialização da madeira em geral e a gestão dos resíduos causados por estas indústrias indicando geração de detritos e problemas ambientais e sociais nos casos de aproveitamento e descarte inadequados. Genovese *et al.* (2006) e Rendeiro *et al.* (2008) reforçam essa preocupação para outras regiões e mostram que o reaproveitamento energético é o tratamento mais adequado, desde que exista controle de emissões gasosas. Gomes *et al.* (2014) consideram também a viabilidade econômica do sistema silvipastoril como alternativa energética em comunidades assentadas pela reforma agrária. Entretanto, nenhum desses estudos realizou experimento com dormentes de madeira visando avaliar simultaneamente as dimensões ambiental e econômica.

Helsen *et al.* (1998), no experimento laboratorial, apresentaram um sistema no qual a temperatura de pirólise e a duração do seu processo influenciam na liberação de metais e na redução da massa, e o resultado obtido com o uso desse sistema é que o resíduo é menor que 3% do total da massa inicial de madeira. Hery (2004) descreve um sistema de reciclagem de restos de madeira capaz de operar com qualquer resíduo desse tipo, independentemente da toxicidade e da concentração de contaminante da madeira, e aponta que o sistema pode reciclar madeira contaminada com diferentes tóxicos simultaneamente.

Outra opção de reuso apontada por Ashori *et al.* (2012) passa pela utilização desse material triturado em uma mistura com concreto para servir de matéria-prima para a construção. Apesar das boas características físicas do que foi obtido, recomenda-se cuidado com o seu uso devido aos produtos químicos presentes nos dormentes. Mais uma vez, não é realizado qualquer estudo de viabilidade econômica.

De outro lado, Taskhiri *et al.* (2016), focando uma região da Alemanha, analisam a sustentabilidade logística e ambiental do processo de produção e armazenamento da madeira e seus resíduos. Apontam que embora os custos totais da rede logística considerada não mudem significativamente para os resíduos em comparação com a madeira fresca, o uso dos resíduos na mesma rede logística reduz substancialmente as emissões de dióxido de carbono.

Atualmente, ainda há poucas alternativas para tratamento e disposição adequada de dormentes de madeira. Esse fato se deve à presença na sua composição de substâncias químicas preservantes, tais como o pentaclorofenol, sais de cromo, cobre e arsênio (CCA) ou boro (CCB) e creosoto. Dependendo da concentração, as reações com outras substâncias e organismos podem transferir contaminantes para o meio ambiente (GENOVESE *et al.*, 2006; GOMES *et al.*, 2006, 2014; HELSEN *et al.*, 1998; HERY, 2004; RENDEIRO *et al.*, 2008; SALLES, 2009; FERRARINI *et al.*, 2016).

A EFC, com seus 892 km, liga as minas da Serra dos Carajás, no sudeste do Pará, com o porto em São Luís, no Maranhão. Para cobrir essa extensão, são necessários 1,65 milhão de dormentes. Esses materiais têm de ser substituídos quando atingem o seu tempo de vida, gerando uma grande quantidade de produto descartado. As sucatas de dormentes ficam às margens da linha férrea, amontoadas em pilhas, sem prazo definido para o seu recolhimento e entrega na Central de Materiais Descartados (CMD). Esses detritos contêm substâncias químicas nocivas e tendem a aumentar a ocorrência de incêndios ao longo da ferrovia, principalmente no período de estiagem, de agosto a outubro, quando as temperaturas são mais altas e a umidade relativa do ar é baixa.

O presente estudo contribui para a ainda incipiente literatura científica sobre a viabilidade econômica e ambiental do uso de dormentes na cogeração de energia elétrica (NOGUEIRA, 1995; KAMISAKI *et al.*, 2006; JAPH SERVIÇOS ANALÍTICOS; RECICARBON INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA., 2013; CORRÊA NETO, 2001). Procura-se, assim, uma solução para um problema ambiental decorrente da destinação dos dormentes de madeira descartados, sem se esquecer da questão econômica. Além de reduzir os riscos de ocorrências ambientais e de emissões de gases de efeito estufa (GEE), pode ainda ser gerado valor para esses resíduos. O tópico 2 deste artigo apresenta os materiais e métodos. Após fazer uma revisão dos conceitos principais e finalidades dos dormentes, detalha os procedimentos adotados para a realização dos testes. Finalmente, os tópicos 3 e 4 apresentam os resultados, a discussão e as conclusões, enfatizando que o reaproveitamento energético da madeira é sustentável do ponto de vista econômico e ambiental desde que haja um controle eficiente de emissões gasosas, principalmente de material particulado e dioxinas e furanos. Por conseguinte, os objetivos deste artigo foram testar e avaliar os aspectos ambientais e econômicos do coprocessamento dos dormentes com biomassa florestal para a cogeração de energia elétrica em termelétrica da EFC.

MATERIAIS E MÉTODOS

Características dos dormentes

O dormente é o elemento da superestrutura de uma ferrovia com a função de receber e distribuir ao lastro

os esforços gerados pelo tráfego dos veículos ferroviários. A superestrutura compreende lastro, dormentes,

trilhos e acessórios. Tem a finalidade de manter a exata geometria entre os trilhos (afastamento, inclinação, nivelamento longitudinal e transversal) e transmitir os esforços para a infraestrutura sem apresentar deformações, garantindo, assim, a segurança do transporte ferroviário. Serve de suporte aos trilhos, permite a sua fixação e mantém a bitola (distância constante entre os trilhos) invariável (BRINA, 1988; PACHA, 2003). O seu perfeito estado de conservação propicia a consistência da linha, mantendo as condições de segurança do tráfego. A substituição adequada dos dormentes não íntegros contribui significativamente para a excelência da via permanente.

Esses elementos têm vida útil de 20 anos (SALLES, 2009). Entretanto, as condições operacionais e climáticas extremas podem acelerar a sua degradação. Na EFC, algumas peças deterioram na metade deste tempo, o que requer aumento gradativo da substituição. Dois fatores contribuem diretamente para a rápida degradação dos dormentes: primeiro, a espécie da madeira, a qual agrega todas as características inerentes à matéria-prima, tais como idade da árvore, dureza, densidade e resistência ao fendilhamento; segundo, a qualidade do dormente produzido no tocante à presença de defeitos, à saturação das fibras (umidade) e à retenção de substância preservativa.

Para cumprir sua função na superestrutura, os dormentes precisam suportar a ação mecânica provocada por esforços das composições, bem como a ação do intemperismo e seus agentes físicos, químicos e mecânicos (e.g., radiações solares, altas temperaturas, acidez do solo e lixiviação). Eles também podem ser serrados na forma de um paralelepípedo retangu-

lar e suas dimensões são em função da bitola da linha férrea. São travessas de conformação, geralmente de formato prismático, assentadas transversalmente aos trilhos sobre o lastro e espaçadas regularmente uma da outra (Figura 1); no caso da EFC, são 1.851 peças km^{-1} e o peso por unidade é aproximadamente 125 kg.

Em todo o mundo, os dormentes fabricados de madeira são os mais usados nas ferrovias, principalmente pelas qualidades naturais. São muito mais resistentes e elásticos do que os demais materiais e cumprem as funções requeridas para a ferrovia. No Brasil, os primeiros dormentes de madeira foram usados na Estrada de Ferro Madeira-Mamoré, em 1907 (VIDAL *et al.*, 2015). Dava-se a preferência aos dormentes de essências nobres, como maçaranduba, aroeira, ipê e jacarandá.

No início da construção da EFC, em 1985, utilizaram-se árvores nativas (madeiras nobres) da Floresta Amazônica, tais como o Jatobá (*Hymenaea courbaril*) e o Angelim Vermelho (*Dinizia excelsia*) para sua confecção. Atualmente, com a legislação ambiental mais restritiva e a escassez dessas espécies florestais, tem sido aceito para produção de dormentes o eucalipto das espécies *Eucalyptus citriodora*, *Eucalyptus paniculata* e *Eucalyptus tereticornis*. Estas espécies são consideradas madeiras mais moles e requerem tratamento à base de óleo ou produto químico para preservar a estrutura morfológica da madeira contra a ação de micro-organismos e insetos decompositores. Tal cuidado garante a resposta mecânica requerida para o transporte de carga na ferrovia.

A substância química utilizada como preservativo de madeira é tóxica e, dependendo da concentração, in-

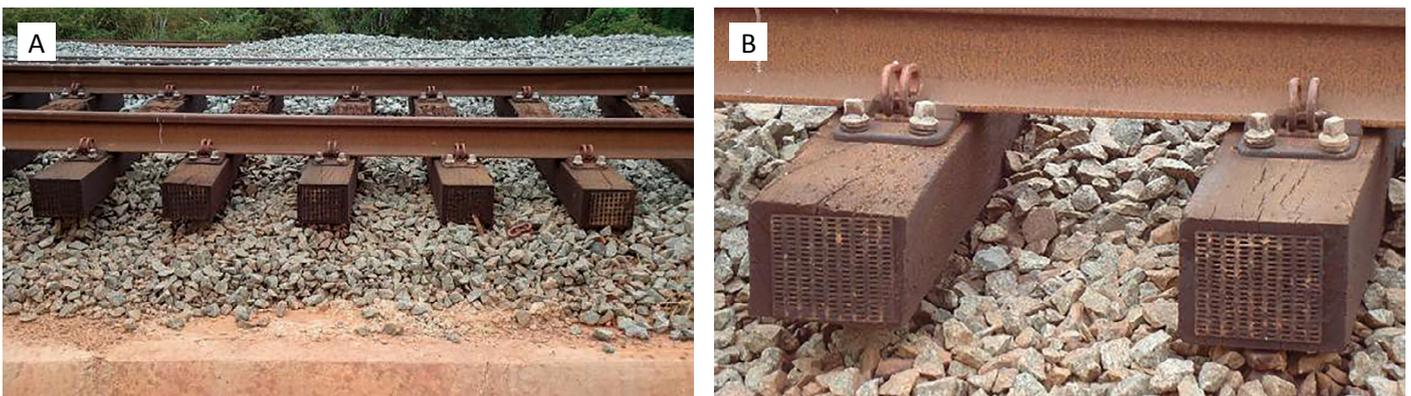


Figura 1 – Dormentes de madeira da Estrada de Ferro Carajás: (A) Superestrutura: lastro, dormentes, trilhos e acessórios; (B) dormentes em detalhe.

fluencia negativamente os indicadores ambientais de toxicidade humana, principalmente quando os dormentes são queimados em combustão incompleta (BECKER *et al.*, 2001; ALVES, 2005; THIERFELDER; SANDSTRÖM, 2008; MAGALHÃES *et al.*, 2012; MARCOTTE *et al.*, 2014). O produto preservativo deve ser aplicado em todas as faces do dormente durante o período de secagem, até atingir o teor de umidade adequado para tratamento (em torno do ponto de saturação das fibras), deve conter fungicida e inseticida de ação temporária e não deve afetar a integridade da travessa. A secagem é na sombra ao ar livre e deve ocorrer até que atinja o teor de umidade menor ou igual à do ponto de saturação das fibras da madeira para

permitir adequada penetração e retenção do produto preservativo (VALE S.A., 2009).

Do ponto de vista ambiental, o resíduo de madeira tratada com preservantes é considerado perigoso na Europa e restrito para uso doméstico nos Estados Unidos devido à toxicidade conferida a micro-organismos do solo e, dependendo da concentração, para a saúde de animais e seres humanos (DAMASCENO, 2015). Na ausência de uma legislação ambiental específica para queima de dormentes, neste estudo de caso utilizou-se a Resolução nº 316/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), pois estabelece limites de poluentes no ar para a queima de resíduos sólidos (perigosos ou não) em fonte fixa.

Descrição do processo de geração de energia elétrica da Unidade Termelétrica (UTE)

A usina de produção de energia elétrica opera com ciclo de *Rankine* convencional, por meio da utilização de uma caldeira alimentada por biomassa e carvão vegetal que gera e reaquece o vapor. O referido ciclo é um modelo usado para avaliar motores a vapor que convertem calor em trabalho mecânico, os quais são largamente usados no mundo inteiro para a geração de energia elétrica (KAPOORIA *et al.*, 2008). A planta está equipada com tratadores de gases a jusante da caldeira, do tipo multiciclone, para redução das emissões de material particulado.

O conjunto gerador de gás quente é formado por um queimador de biomassa de grelha rotativa, caldeira e exaustão. Todo o sistema está equipado com painéis eletrônicos de monitoramento das condições e parâmetros operacionais. A unidade geradora de energia, com potência elétrica de 5 MW, tem capacidade nomi-

nal de fornecer energia de 3 GW por mês. É composta por uma caldeira à biomassa que produz 28 t por hora de vapor e 90% de eficiência térmica, uma turbina e um gerador.

A alimentação da mistura de madeira é feita de forma automática pelo silo de acordo com a necessidade. É queimada na fornalha da caldeira e os gases gerados no processo de combustão são encaminhados para o recuperador de calor. Este último é composto por um trocador de calor que recupera a energia e aquece o ar primário. Após esse processo, o efluente gasoso passa por um multiciclone para o abatimento do material particulado, o qual é coletado e encaminhado, por gravidade, para caçambas instaladas na parte inferior do multiciclone. Após eliminação do material particulado, o efluente gasoso é encaminhado para a chaminé.

Procedimentos

O método escolhido foi baseado no teste de queima de biomassa florestal com dormentes em três etapas. Na primeira, realizou-se o teste em branco (somente com biomassa de origem florestal usada na Unidade Termelétrica (UTE) para produzir energia elétrica) e coleta das cinzas resultantes. Durante a segunda, fez-se o teste de queima de biomassa florestal com resíduos de dormentes de madeira da EFC misturados na proporção de 1/5 e foram coletadas as cinzas. Os parâmetros de ambos os testes foram analisados à luz da legislação ambiental brasileira (Resolução

nº 316/2002 do CONAMA) sobre emissões atmosféricas de fontes potencialmente poluidoras. A referida resolução descreve a incineração de resíduos e a respectiva aferição das emissões gasosas e das cinzas residuais (Estudo de Viabilidade de Queima – EVQ), sendo este o método mais rigoroso para a avaliação do tratamento térmico de detritos existente na legislação brasileira. A terceira etapa consistiu na análise qualitativa das cinzas de ambos os testes para classificá-las como resíduo perigoso ou não perigoso, de acordo com a Norma Técnica Brasileira

(NBR) para caracterização de restos (NBR 10.004; 10.006 e 10.007:2004). Entre os procedimentos de amostragem apontados pela Resolução nº 316/2002, foram utilizados os métodos para análise das emissões atmosféricas da Companhia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo — CETESB (2003) e da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY — USEPA, 2007), a partir do monitoramento dos gases na chaminé da UTE.

Esses processos foram baseados nas seguintes premissas: a geração de energia elétrica é conseguida por meio da produção de calor a partir da queima de biomassa florestal na UTE; a quantidade anual de dormentes de madeira descartados pela EFC responde somente por cerca de 12% do total anual de matéria-prima (biomassa) necessária; e, nas condições do teste, só houve disponibilidade logística para entregar 1/5 da quantidade diária necessária para a produção nominal de energia elétrica.

Uma limitação encontrada no experimento foi a impossibilidade de identificar e separar dormentes tratados com creosoto dos tratados com composto químico de CCA, após descarte como resíduo, visto que a área operacional responsável dispõe apenas de verificação visual para fazer essa distinção. Assim, assume-se que todos os dormentes, independentemente do tratamento preservativo da madeira, serão triturados e coprocessados de forma homogênea para uso como combustível na caldeira.

A realização de cada teste envolveu três atividades: preparação do teste, monitoramento e elaboração do relatório. Abaixo são apresentados os métodos e as substâncias de coleta e análise adotados na realização de ambos os testes:

- Efluentes gasosos: foram aplicados os métodos estabelecidos pela Environmental Protection Agency (EPA), a saber: métodos 1 a 8, 0010, 13B, 23, 26A, 29, 101^a e 429 (USEPA, 2007);
- Material particulado (MP): essa substância foi coletada isocineticamente. A sua massa foi determinada gravimetricamente. Simultaneamente à coleta, determinou-se o volume do gás amostrado e obteve-se a concentração de MP pelo rácio entre as duas variáveis;
- Óxidos de enxofre (SOx): para a determinação da concentração dessas substâncias fez-se absorção do SO₃ em solução de álcool isopropílico e reação do SO₂ com peróxido de hidrogênio. A determinação da concentração de SOx nas soluções absorvedoras foi realizada por meio de titulação;
- Óxidos de nitrogênio: os óxidos presentes no fluxo gasoso foram coletados em um frasco de absorção contendo ácido sulfúrico diluído e peróxido de hidrogênio. Estas substâncias foram determinadas por colorimetria, utilizando o método do ácido fenedissulfônico;
- Metais: as análises da concentração destes elementos nas amostras de efluentes gasosos foram realizadas pelo método EPA 29, utilizando-se absorção atômica. Os metais analisados foram: Cd, Hg, Tl, As, Co, Ni, Te, Se, Sb, Pb, Cr, Cu, Sn, F, Mn, Pt, Pd, Rh, V. As análises de mercúrio foram realizadas com base na metodologia EPA 101A. Dioxinas e furanos e principais compostos orgânicos perigosos (PCOPs). O procedimento adotado para a amostragem de dioxinas e furanos (D/F) em fontes estacionárias está descrito no método EPA 23 (USEPA, 2007). Os compostos orgânicos semivoláteis (SVOCs) são poliaromáticos, incluindo o benzo-pireno (PAHs) e o pentaclorofenol. Os efluentes gasosos foram coletados isocineticamente, utilizando-se cartucho de resina XAD-2 como material adsorvente. Após a amostragem, a resina empregada na coleta, bem como o filtro de amostragem e soluções de lavagem de sonda e vidraria (acetona, cloreto de metila e tolueno), foi extraída com diclorometano. O extrato foi analisado por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa de alta resolução (CG/EM), com base nos métodos EPA 8290 e 8270 da referida fonte;
- Compostos orgânicos voláteis (VOCs – *Volatile Organic Compounds*): para estas substâncias aplicou-se o método US EPA 0030. Os gases passam por um trem de amostragem (VOST – *Volatile Organic Sampling Train*) com dois tubos de resinas. O primeiro tubo foi preenchido com resina Tenax e o segundo, além dessa, com carvão ativado. Os compostos orgânicos voláteis, neste caso específico o benzeno, tolueno e xileno (BTX), foram adsorvidos na resina e posteriormente analisados quimicamente por CG/MS. Cada coleta durou

60 minutos, sendo que a cada 20 minutos ocorreu a troca dos pares de resinas, conforme os métodos US EPA 5041A e 8260B. Cada coleta de VOC foi realizada com 3 jogos de *traps* de resina por coleta com duração de 60 minutos;

Testes e amostras

Os métodos de amostragem utilizados para coletas e análises de gases em fontes fixas, como a chaminé da UTE, são estabelecidos pela EPA (USEPA, 2007). Todas as coletas, exceto de NO_x, foram realizadas de forma isocinética, a qual garante que a velocidade de entrada dos gases e partículas na boquilha de coleta seja a mesma do fluxo gasoso. Este procedimento permitiu a representatividade das amostras para a determinação da concentração e da quantidade de poluentes emitidos, tais como gases e material particulado. As coletas isocinéticas foram realizadas utilizando um equipamento chamado “trem de amostragem”.

O trem de amostragem padrão é composto por uma sonda de coleta, um filtro aquecido, um conjunto de borbulhadores e um gasômetro, para a medição do gás seco coletado. Para este experimento utilizou-se o modelo básico descrito no método EPA 5 (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, s/d). Os gases são coletados diretamente da chaminé por meio de uma sonda aquecida, que evita a condensação dos mesmos e possui uma boquilha na sua ponta por onde os gases são coletados. A sonda encaminha os gases e as partículas para um filtro de quartzo, aquecido a 120°C, que retém todos os fragmentos no filtro. Em se-

- Análise de cinzas: foi realizada uma análise composta para a caracterização das cinzas em resíduo perigoso ou não perigoso, conforme os métodos de Classificação de Resíduos Sólidos NBR-10004, 10005 e 10006 (ABNT, 2004).

guida, os gases são enviados para a sequência de borbulhadores com soluções para absorção de poluentes como SO_x, HCl, HF, metais, etc.

São necessárias resinas específicas para a coleta de poluentes como dioxinas e furanos. Foram utilizados cartuchos com resinas que são posicionados antes dos borbulhadores para a adsorção desses poluentes. As amostras coletadas foram encaminhadas para laboratórios especializados e acreditados pela norma ISO 17.025.

As análises destas coletas foram realizadas em um laboratório independente. Também foram coletados os VOCs e dioxinas e furanos com análises feitas em outro laboratório independente. A estratégia de coleta de cada parâmetro foi determinada pelas condições operacionais da caldeira (Tabela 1). Para evitar contaminação das amostras entre os testes, foi estabelecido um intervalo de 12 horas entre as medições com biomassa e com dormentes (mistura).

Como referido, a primeira atividade em cada teste consistiu em preparação das amostragens. Detalhou-se o planejamento dos testes e descreveram-se as amostras, bem como os respectivos métodos e equipamentos utilizados.

Tabela 1 – Coleta de compostos orgânicos voláteis e dioxinas e furanos.

Parâmetros	Duração (minutos)
MP e SO _x	60
MP e SO _x	60
HCl e HF	60
PCDD, PCDF e SVOC (pentaclorofenol)	180
NO _x	Instantâneo
VOC	60 min: 20 minutos/cartucho
Cianetos	60
Metais (classes I, II e III)	60

Fonte: Relatório do teste de queima de dormentes na UTE (ERM BRASIL; VALE S.A., 2013).

Testes em branco

Os testes foram efetuados durante a operação normal da UTE e utilizaram somente biomassa de casca de eucalipto, tendo sido feita uma avaliação das emissões gasosas na chaminé. Dependendo da umidade, a operação da UTE mistura 1/4 de carvão vegetal à biomassa. Esta operação não foi necessária durante o teste em branco.

Estes testes consistiram em três coletas de amostras das seguintes substâncias:

- dioxinas e furanos (D/F) e PCOPs e PAHs;
- MP e SO_x;

Testes de queima com dormentes

Foram realizados testes com a queima da mistura de biomassa com dormentes na proporção 1/5, tendo sido adotada a mesma metodologia do teste em branco para avaliar os níveis das substâncias. Fi-

Análise das cinzas

O teste de queima seguiu estritamente as normas vigentes com o objetivo de quantificar as emissões geradas durante a queima de biomassa e dormentes na caldeira para posterior avaliação da sua viabilidade.

Nesta fase, realizaram-se testes com queima de dormentes sem a utilização de carvão vegetal na propor-

- NO_x;
- metais (classes I, II e III);
- mercúrio (Hg);
- ácido clorídrico (HCl), cloro (Cl₂) e ácido fluorídrico (HF);
- VOCs, com análise da concentração de benzeno, tolueno e xilenos (BTX);
- concentrações de O₂, CO₂, CO e excesso de ar com um monitor eletrônico Tempest.

zeram-se três coletas de todas as substâncias listadas acima nos testes em branco, e nove no caso de NO_x. Todas as amostras foram analisadas por um laboratório independente.

ção de 1/5 de dormentes picados. As cinzas foram coletadas na grelha da caldeira e na saída do multiciclone após cada um dos testes. As análises foram efetuadas conforme as normas NBR 10.004; 10.006; 10.007:2004 (ABNT, 2004) por um laboratório independente visando classificar as cinzas em perigosas ou não perigosas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos estão de acordo com o tipo de combustível utilizado conforme os testes e a condição operacional de queima, como descrito, apresentando temperatura, umidade e velocidade médias dos gases no duto e análise dos gases de combustão (DAMASCENO, 2015). A avaliação do resultado do experimento na UTE considerou os aspectos ambiental e econômico. A avaliação do resultado do experimento na UTE considerou os aspectos ambiental e econômico.

Na dimensão ambiental, foram comparados os resultados das amostras coletadas na UTE, com o resultado do mesmo teste realizado em outra empresa, que designaremos por empresa X, cujo processo utiliza

somente dormentes de madeira para carbonização (Quadro 1). Estes resultados foram comparados ao valor máximo permitido (VMP) pela Resolução nº 316/2002.

Os resultados mostram a instabilidade do sistema de controle operacional de queima de combustível na UTE para material particulado. O número de três amostras por parâmetro e, no caso do NO_x, nove, foi limitado pelo orçamento disponível para o experimento. Abaixo são apresentados os resultados dos testes de queima na UTE e na empresa X à luz do VMP estabelecido pela Resolução nº 316/2002. O experimento feito na empresa X, apesar de analisar os efeitos da queima somente de dormentes, é o único comparável

ao presente estudo, pois considerou quase os mesmos parâmetros. O presente experimento não anali-

Metais

Conforme a Resolução nº 316/2002, as concentrações de metais foram agrupadas em três diferentes classes: a classe I é composta por metais como cádmio, mercúrio e tálio; a classe II, por arsênio, cobalto, níquel, telúrio e selênio; e a classe III envolve antimônio, chumbo, cromo, cobre, estanho, manganês, platina, ródio e vanádio.

Os parâmetros dos metais da classe I variaram entre 60 e 90% daqueles obtidos pelo experimento na em-

presas X e estiveram somente entre cerca de 0,9 e 1,3% do VMP. Para os metais da classe II, embora no teste somente com biomassa o experimento tenha apresentado um valor do parâmetro de cerca de 6,4% daquele obtido pela empresa X, no teste com a mistura chegou a alcançar 121,4%, indicando melhor desempenho do sistema daquela empresa nestas substâncias em relação ao teste com mistura. O resultado da queima da mistura está na origem do aumento das concentrações de arsênio e níquel. Entretanto, mesmo nesse caso

Quadro 1 – Resultados: média e desvio-padrão do estudo da viabilidade da queima na unidade termelétrica, média na empresa X e valor máximo permitido*.

Viabilidade ambiental					
EVQ		UTE		Empresa X	CONAMA nº 316/2002
Parâmetro	Unidade	Somente biomassa	Dormente + biomassa (1/5)	Somente dormente	VMP*
Material particulado	mg Nm ⁻³	960,06 ± 94	778,38 ± 149	19,50	70,00
Óxidos de enxofre	mg Nm ⁻³	7,65 ± 5	1,98 ± 0,6	38,70	280,00
Óxidos de nitrogênio	mg Nm ⁻³	129,34 ± 45	145,80 ± 20	199,90	560,00
Metais classe I: Cd, Hg, Tl	mg Nm ⁻³	0,003 ± 0,0001	0,003 ± 0,0006	0,004	0,280
Metais classe II: As, Co, Ni, Se, Te	mg Nm ⁻³	0,01 ± 0,001	0,16 ± 0,01	0,14	1,40
Metais classe III: Sb, Pb, Cr, CN, F, Cu, Mn, Pt, Pd, Rh, V, Sn	mg Nm ⁻³	0,65 ± 0,01	0,77 ± 0,02	0,45	7,00
Ácido clorídrico	mg Nm ⁻³	18,38 ± 6	15,98 ± 0,3	0,06	80,00
Ácido fluorídrico	mg Nm ⁻³	0,36 ± 0,05	0,28 ± 0,02	0,20	5,00
Dioxinas e Furanos	Total PCDD + PCDF ng Nm ⁻³	0,24 ± 0,18	0,52 ± 0,19	0,075	0,50
Cloro	Kg h ⁻¹	0,13 ± 0,03	0,11 ± 0,01	----	1,80
Monóxido de carbono	ppm Nm ⁻³	----	----	84,20	100,00

*VMP: valor máximo permitido pela Resolução nº 316/2002 do CONAMA; EVQ: estudo da viabilidade da queima; UTE: unidade termelétrica. Fonte: Relatórios de Teste de Queima (ERM BRASIL; VALE S.A., 2013; JAPH SERVIÇOS ANALÍTICOS; RECICARBON INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA., 2013).

tais parâmetros foram de até 12,1% do estabelecido pela resolução.

Os parâmetros dos metais da classe III eram entre 142,2 e 175,6% superiores aos da empresa X. Entretanto, o VMP da legislação é, pelo menos, quase nove vezes su-

Óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio

As concentrações médias destes elementos químicos foram corrigidas a 7% de oxigênio para as duas situações monitoradas pelo teste de queima e apresentaram resultado abaixo do limite de emissão estipulado pela Resolução nº 316/2002. Os resultados de óxido de enxofre estiveram entre 3,6 e 32,7% daqueles obtidos pela empresa X, sendo que o valor máximo permitido de 280 mg Nm⁻³ é, pelo menos, sete vezes superior aos obtidos nestes

Halogênios

Todos os elementos deste grupo têm a tendência de receber elétrons de outros elementos e formar íons de haletos, constituindo moléculas diatômicas. Também reagem diretamente com a maior parte dos metais especialmente com o hidrogênio formando haletos. Como nos metais, os resultados das concentrações de halogênios, tais como ácido clorídrico, cloro livre e ácido fluorídrico ficaram abaixo do limite de emissão estabelecido pela Resolução nº 316/2002.

Os agrupamentos de ácido clorídrico (HCl) no experimento da empresa X foram praticamente nulos, ficando entre cerca de 0,4 e 0,5% daquelas observadas

Material particulado

Os resultados do monitoramento de emissões atmosféricas neste experimento evidenciaram que as concentrações de MP (Figura 2), as quais eram equivalentes independentemente do insumo energético utilizado, e pelo menos aproximadamente nove vezes superiores ao VMP da referida resolução. Nota-se que as condições operacionais durante o

Dioxinas e furanos

Os resultados destes elementos químicos no experimento superaram o estabelecido pela resolução no teste de queima, tendo variado somente de 12 a 142% em

perior aos valores do experimento da empresa X e de ambos os testes. Nestes últimos, estes metais apresentaram os mesmos níveis de concentração, evidenciando que não existem alterações significativas nas emissões, exceto pela presença de dormentes tratados com CCA que elevaram a concentração de arsênio.

estudos. Os resultados do óxido de nitrogênio variaram entre 42,2 e 87,2% daquele referente à empresa X, demonstrando que a substituição de 20% de biomassa por madeira de dormentes não altera de forma significativa as emissões atmosféricas do processo avaliado. O limite estabelecido pela referida resolução é, no mínimo, aproximadamente o triplo dos valores destes elementos nos experimentos de ambos os estudos.

nopresente experimento. O limite de emissões de 80 mg Nm⁻³ estabelecido para este elemento é, pelo menos, quase cinco vezes os valores obtidos neste trabalho. Os resultados sobre o ácido fluorídrico (HF) no presente estudo ficaram entre 130 e 205% daqueles do experimento na empresa X. O VMP de 5,00 mg Nm⁻³ estabelecido pela referida resolução é, pelo menos, 12 vezes superior aos valores obtidos nestes estudos.

Neste exame, os valores das emissões de cloro variaram entre 5,6 e 8,9% do valor limite de 1,80 kg h⁻¹ estabelecido pela referida resolução, tendo apresentado concentrações equivalentes e da mesma ordem de grandeza.

teste de queima eram instáveis e a remoção de cinzas da fornalha se deu pelo processo de sopragem, o qual arrastou grande quantidade dessas substâncias para a chaminé. Somente a experiência da empresa X apresentou resultados de acordo com a legislação, com emissões equivalentes a aproximadamente 28% do VMP.

relação ao VMP considerando todos os ensaios. Como estas substâncias variam com a queima da mistura da biomassa com dormentes, a realização de outras expe-

riências com diferentes percentuais de dormentes seria importante. De outro lado, o experimento na empresa

Pentaclorofenol

Em nenhuma das amostras foi detectada a presença deste elemento, o PCOP, utilizado no tratamento da

Cinzas

A caracterização das cinzas geradas no processo de queima em ambos os testes deste experimento as classificou como classe I (resíduos perigosos). Portanto, as cinzas da queima na caldeira deverão ser encaminhadas para um aterro específico de disposição de resíduos perigosos.

O estudo visou avaliar também a viabilidade econômica que está associada à substituição do percentual de biomassa florestal por dormentes, considerando dados informados pelo fabricante dos equipamentos da UTE (DAMASCENO, 2015), a potência da UTE de 5 MW, a produção nominal de 43.800 MWh por ano e o consumo de biomassa em torno de 70 mil t por ano. Com base nessas informações e considerando o preço da energia elétrica de termelétricas de R\$ 209,00 por MWh (Leilão nº 6/2014 A-5, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2014; BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2014), foram calculados a receita anual, o lucro bruto associado, a economia associada à biomassa e o percentual da margem de lucro associada à mistura de *chips* de dormentes com a biomassa (ver memória de cálculo no Quadro 2).

X resultou em somente 15% do VMP ilustrando, neste aspecto, um melhor processo de produção de energia.

madeira de dormentes. Neste exame, todos os resultados foram inferiores ao limite de detecção de 0,5 µg.

O custo estimado da matéria-prima em uma UTE é 60% do preço da energia (NOGUEIRA, 1995). Neste estudo de caso foi de R\$ 21,00 por t, que envolve as etapas de corte, carregamento e transporte. O custo total estimado para somente biomassa (cavaco de eucalipto) é de R\$ 1,47 milhão por ano. Considerando que a disponibilidade de dormentes é de 16% do total de biomassa requerida para o consumo anual, mesmo assim a inoculação de 20% de dormentes misturados à biomassa reduziria o gasto, gerando uma economia de R\$ 282 mil por ano para a UTE, o que representa uma margem de lucro de 19,2%. O custo de destinação dessas peças para um aterro industrial ou para incineração era de R\$ 1.012,89 por t em 2013 (VALE S.A., 2013). O gasto anual seria de R\$ 11 milhões para incinerar 11.000 t de dormentes inservíveis até 2018. O reaproveitamento energético dos dormentes processados com biomassa em UTE para a cogeração de energia elimina essa despesa com destinação e agrega valor ao resíduo, gerando ganhos financeiros de R\$ 14 mil e R\$ 282 mil por ano, respectivamente.

A margem de lucro associada à mistura de dormentes com biomassa na UTE poderá ser aplicada como investimento na melhoria do sistema de controle ambiental



Figura 2 – Emissão de material particulado e de gases para a atmosfera durante o teste de queima com dormentes.

das emissões atmosféricas. O dimensionamento adequado dos dispositivos de tratamento necessários para reduzir MP, PCDD e PCDF tem custo estimado entre R\$ 300 e R\$ 800 mil.

Como referido, os estudos sobre os efeitos ambientais e econômicos do reaproveitamento de dormentes para a produção de energia elétrica são escassos. No experimento com queima de dormentes de madeira com carvão visando analisar as emissões, Brouwer *et al.* (1995) concluíram que a queima com até 20% de resíduos de madeira não aumenta os níveis de poluição e reduz a emissão de nitrogênio em cerca de 30%. Tendo em vista que o percentual de madeira é idêntico ao dos dormentes triturados na experiência do presente artigo, na dimensão ambiental esse resultado é parcialmente

consistente. Todavia, o estudo não analisa a grandeza econômica e, portanto, não comparável nesse aspecto. Consistente com o presente experimento, Genovese *et al.* (2006) confirmaram viabilidade econômica da produção de eletricidade em cogeração com biomassa. Entretanto, o estudo não permite comparação direta dos parâmetros analisados porque os autores fizeram o levantamento bibliográfico de diversas fontes de energia. Do mesmo modo, Gomes *et al.* (2014) apresentam resultados da simulação de utilização de metade da área de pastagem para a produção de biomassa florestal para a cogeração de energia elétrica. Embora destaque o caráter preliminar dos seus resultados, as experimentações de campo efetuadas ilustraram que os custos de produção de energia são menores, demons-

Quadro 2 – Análise da viabilidade econômica no reaproveitamento de dormentes da Estrada de Ferro Carajás.

Viabilidade econômica				
Variável	Unidade	Somente biomassa	Dormentes + Biomassa	Memória de cálculo/Fonte
Potência UTE ¹	MW	5,0		Fonte: Icavi (fabricante)
Produção nominal	MWh ano ⁻¹	43.800		Fonte: UTE Cosima
Fator parada para manutenção	%	7,0		Fonte: Rendeiro <i>et al.</i> , 2008
Produção efetiva	MWh ano ⁻¹	~40.800		D=b*c
Consumo de biomassa ²	t ano ⁻¹	70.080	14.016	Fonte: UTE Cosima
Preço médio	R\$ t ⁻¹	~21,00	0,88	f=g/6, preço médio contrato de venda
Custo médio MWh ⁻³	R\$ MWh ⁻¹	~125,00	5,25	g=60% i (biom) g=f*6 (dorm)
Custo médio anual	R\$ ano ⁻¹	1.471.680,00	1.189.678,00	$h_1=e*f$ $h_2=(e*0,8*f_1)+(e*0,2*f_2)$
Preço energia UTE à biomassa ⁴	R\$ MWh ⁻¹	209,00		Edital Leilão 06 ANEEL, 2014.
Receita média anual	R\$ ano ⁻¹	8.527.200,00		j=d*i
Lucro bruto	R\$ ano ⁻¹	7.055.520,00	7.337.522,00	k=j-h
Economia de custo	R\$ ano ⁻¹	----	282.002,00	l=k ₂ -k ₁
Margem de lucro	%	----	19,17	m=l/h ₁ *100

¹Dados fornecidos pelo fabricante (DAMASCENO, 2015, p. 40); ²Consumo específico de vapor na turbina=5 kg kWh⁻¹ (DAMASCENO, 2015, p. 56); ³Incidência da biomassa sobre o preço da energia em MWh=60% (NOGUEIRA, 1995); ⁴Editais dos leilões de energia de biomassa (ANEEL, 2014); UTE: unidade termelétrica; ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica.

trando viabilidade econômica neste estudo de caso e no experimento deste artigo.

O problema de emissão de material particulado constatado neste ensaio também é apontado em outros estudos. Torres Filho (2005) analisou a viabilidade técnica e ambiental do uso de resíduo de madeira para a produção de energia. Este autor obteve uma emissão de material particulado de 4,57, 2,77 e 1,73 (em g/kg) com o forno utilizando lenha, cavaco sem tratamento

térmico e processado termicamente, respectivamente. Entretanto, tais resultados não são comparáveis com os do presente experimento e da empresa X. Estes dois últimos estudos foram baseados na legislação recomendada para emissões de material particulado e outras substâncias nesse tipo de teste, Resolução nº 382/2002 do CONAMA, a qual apresenta a unidade das substâncias em mg Nm⁻³. Aquele estudo não analisa as implicações econômicas da queima de madeira para produzir energia.

CONCLUSÕES

Este artigo confirmou a sustentabilidade do reaproveitamento de dormentes íntegros e não íntegros descartados como resíduo pela EFC. Há agregação de valor ao destiná-los de forma adequada para a cogeração de energia elétrica em UTE, com vantagens na redução de vários custos, a saber, armazenamento interno, destinação final e do pós-plantio (colheita, transporte e secagem de biomassa). Também podem ser destinados para carbonização e posterior uso na indústria siderúrgica como insumo. O mercado da construção civil e paisagismo é outro nicho econômico que pode reutilizar dormentes em pontes, pontilhões, pilares e cercas, ou como peças ornamentais, no entanto teria de ser considerado o seu tratamento químico.

A destinação adequada dos dormentes também reduz o número de ocorrências ambientais de queima a céu aberto e, ao reduzir incêndios, proporciona melhoria da qualidade de vida e da segurança das comunidades. A alternativa de queima controlada e monitorada para a cogeração de energia elétrica ou carbonização para uso em siderurgia é defendida pela literatura (HERY, 2004; RENDEIRO *et al.*, 2008; BOLIN; SMITH, 2011a, 2011b, 2011c; TREATED WOOD COUNCIL, 2012). Estes estudos apontam que madeiras tratadas com creosoto têm sido reconhecidas como combustível tradicional. Segundo a USEPA (2007), este combustível pode ser biomassa celulósica (e.g., madeira) ou combustíveis fósseis (e.g., carvão, óleo e gás natural), incluindo seus derivados (e.g., coque de petróleo, coque betuminoso, óleo de alcatrão de carvão, gás de refinaria, combustível sintético, asfalto, gás de alto forno, butano gasoso recuperado e gás de coqueria). Estes materiais têm sido queimados como combustíveis e gerenciados como produtos com valor agregado.

A experiência realizada neste trabalho aponta para a necessidade de se mitigar as emissões de material particulado pela chaminé da caldeira e se considerar a destinação das cinzas geradas no processo, classificadas como resíduo perigoso. Deve-se implantar e monitorar um sistema de tratamento dos gases para garantir que as emissões atmosféricas estejam de acordo com a legislação ambiental vigente no Brasil. O estudo confirmou a sustentabilidade econômica e ambiental da substituição de 1/5 da biomassa da lenha de eucalipto por *chips* de dormentes como insumo energético na UTE, desde que sejam adotadas as seguintes medidas:

- Melhorar o controle do processo de alimentação e de queima de biomassa na caldeira, para possibilitar o monitoramento mais eficiente da relação ar/combustível, temperaturas e pressões no interior da fornalha e quantidade de biomassa a ser queimada em função da demanda de vapor;
- Evitar a retirada das cinzas da fornalha pelo processo de “sopragem”, o qual promove o seu arraste com os gases de combustão para a chaminé, elevando a emissão de partículas para a atmosfera. Este problema foi evidenciado pelos espasmos intermitentes de fumaça preta lançados pela chaminé da UTE durante o teste de queima;
- Avaliar a eficiência de retenção do equipamento multiciclone; caso ele se mostre eficiente, com taxas superiores a 50% de abatimento, sugere-se que seja mantido e um equipamento auxiliar seja acoplado em série;
- Instalar equipamento de controle da poluição para a retenção e abatimento do material particulado. Isto pode ser feito através de um filtro de mangas

ou de um precipitador eletrostático que operem em conjunto com um defagulhador, para evitar a queima das mangas, ou ainda um lavador de gases. O referido filtro é um dispositivo de tratamento de emissões que filtra as partículas de impurezas presentes no ar carregado, retendo-as nos poros dos fios e na superfície do filtro, criando uma barreira que também atua como meio filtrante, mas precisa ser mantida limpa. O precipitador (ou filtro de ar eletrostático) é um dispositivo que, por processo de ionização, deixa as partículas de impurezas do ar carregadas eletricamente, sendo essas atraídas pelas placas laterais do equipamento, neutralizadas e deslocadas para um funil, de onde seguem para a área de descarte para receber o tratamento adequado;

- Avaliar as condições de uso e o desgaste do material refratário da caldeira, pois os parâmetros que apresentaram alterações indicam que o contaminante possa ser dos compostos existentes nesse material;
- Estudo complementar deverá focar na formação de dioxinas e furanos ao longo do processo para se evitar esses poluentes. De acordo com as melhores técnicas e práticas ambientais disponíveis (BAT/BEP), a adição de ureia pode reduzir até 50% da emissão de PCDD e PCDF ao limitar a disponibilidade de cloro e inibir a formação desses poluentes (WANG *et al.*, 1983; ASSUNÇÃO; PESQUERO, 1999; ERM BRASIL; VALE S.A., 2013; ASSUNÇÃO, 2014).

Os dados mostraram que o planejamento anual de dormentes descartados da EFC até 2022 pode reduzir até 16% a biomassa anual utilizada na UTE (DAMASCENO, 2015), o que evitaria o corte de árvores de eucalipto nas fazendas. A termelétrica considerada neste trabalho tem capacidade de produção de energia elétrica para abastecer cerca de 20 mil residências.

O presente experimento mostrou que o coprocessamento com dormentes reduz o custo da matéria-prima em 19,2%, evitando etapas de plantio, cultivo, colheita e secagem da madeira. Evita também o desperdício de água para irrigação do eucalipto e o custo de transporte porque esta UTE possui um ramal ferroviário que possibilita a logística do transporte dos dormentes até o seu pátio interno de descarga de insumos.

Conforme apontado por alguns estudos, o cultivo de biomassa para a geração de energia em áreas rurais tem se mostrado economicamente viável devido à dificuldade de abastecimento destas zonas por combustíveis fósseis ou sistema hidrelétrico. Quanto aos aspectos ambientais, verifica-se que uma central a biomassa possui um balanço de carbono lançado na atmosfera menor do que o das centrais a combustíveis fósseis, considerando as emissões de carbono que são evitadas e o ciclo de vida da biomassa. Comparativamente às emissões de uma termelétrica a diesel, para efeito de inventário de emissões, 1 kWh gerado por uma UTE a biomassa deixa de contabilizar 1,02 kg de carbono equivalente. Este elemento está relacionado ao Potencial de Aquecimento Global (PAG) dos gases do efeito estufa (GEE) em comparação à quantidade de dióxido de carbono que teria o mesmo PAG medido em um período de tempo específico (e.g., o PAG do metano é 21 e do óxido nitroso é 310). Isto significa que a emissão de 1 milhão de t métricas de metano e óxido nitroso é equivalente à emissão de 21 e 310 milhões de t métricas de dióxido de carbono, respectivamente.

Somente a emissão de carbono relativa ao transporte (com óleo diesel) da biomassa é lançada à atmosfera. O carbono restante é absorvido pelo manejo sustentável de florestas de eucalipto plantadas e pelo crescimento de novas árvores. Essas centrais também possuem capacidade de receber resíduos vegetais que são abandonados ou queimados a céu aberto, amenizando a questão ambiental desse tipo de queima de resíduos e emissão de GEE. No aspecto socioeconômico, centrais de biomassa de pequeno ou médio portes podem ser instaladas em regiões remotas, nas quais o sistema convencional tem dificuldade de produção e distribuição de energia elétrica. A UTE deste estudo de caso pode ser integrada à economia local e gerar empregos diretos e indiretos, inclusive com posições menos qualificadas que podem ser ocupadas por empregados com baixa escolaridade.

O custo do quilowatt-hora (kWh) gerado na usina a biomassa é inferior ao produzido pela usina a diesel e, apesar de não ser competitivo quando comparado ao da geração hídrica, lidera o *ranking* entre as outras usinas térmicas. Essas UTEs podem operar por longos períodos de tempo sem interrupção (requerem somente 250 horas por ano de parada para manutenção) e

atendem às exigências da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (RENDEIRO *et al.*, 2008).

Em conclusão, o artigo traz uma contribuição importante no debate sobre produção de energia a partir de madeira, por dois motivos. Primeiro, os resultados do presente estudo são consistentes com parte da literatura

especializada que confirmou a viabilidade ambiental da madeira para a cogeração de energia elétrica. Segundo, o trabalho analisou a dimensão econômica dos efeitos da queima controlada de madeira para a produção de eletricidade na UTE, preenchendo parcialmente uma lacuna na discussão deste aspecto ainda praticamente inexplorado.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Edital do Leilão de Geração nº 6/2014 (A-5) é republicado pela ANEEL*. 2014. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=8185&id_area=90>. Acesso em: 01 jun. 2017.

ALVES, G. K. A. Dormentes – dormentes ferroviários, seu tratamento. Dormentes de madeira, 2013. Disponível em: <<http://dormentesdeeucaipto.blogspot.com.br/2013/09/dormentes-dormentes-ferroviarios-seu.html>>. Acesso em: 01 jun. 2017.

_____. *Os dormentes ferroviários, seu tratamento e o meio ambiente*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.

ASHORI, A.; TABARSA, T.; AMOSI, F. Evaluation of using waste timber railway sleepers in wood-cement composite materials. *Construction and Building Materials*, v. 27, n. 1, p. 126-129, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR-10004, NBR-10005, NBR-10006 e NBR-10007: Classificação de resíduos sólidos – Coletânea de Normas*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

ASSUNÇÃO, J. V. Estratégias para redução de liberações de dioxinas e furanos no Brasil. 2014. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/226151549/Estrategias-para-Reducao-de-Liberacoes-de-Dioxinas-e-Furanos-pdf#scribd>>. Acesso em: maio 2015.

ASSUNÇÃO, J. V.; PESQUERO, C. Dioxinas e Furanos: origens e riscos. *Revista de Saúde Pública*, São Paulo, v. 33, n. 5, p. 523-530, 1999. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0034-89101999000500014>>. Acesso em: 01 jun. 2017.

BECKER, L.; MATUSCHEK, G.; LENOIR, D.; KETTRUP, A. Thermal degradation of wood treated with creosote. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 57, n. 1, p. 15-36, 2001. DOI: 10.1016/S0165-2370(00)00117-0

BOLIN, C.; SMITH, S. Life cycle assessment of ACQ-treated lumber with comparison to wood plastic composite decking. *Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 6-7, p. 620-629, 2011a. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652610004567>>. Acesso em: jan. 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.12.004

BOLIN, C.; SMITH, S. Life cycle assessment of borate-treated lumber with comparison to galvanized steel framing. *Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 6-7, p. 630-639, 2011b. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652610004579>>. Acesso em: jan. 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.12.005

BOLIN, C.; SMITH, S. Life cycle assessment of pentachlorophenol-treated wooden utility poles with comparisons to steel and concrete utility poles. Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Journal of Cleaner Production*, v. 15, n. 5, p. 2475-2486, 2011c. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111000682>>. Acesso em: jan. 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2011.01.019

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. *Balço Energético Nacional*. Síntese do Relatório Final 2014. Matriz Energética Brasileira em 2013. Brasil: Empresa de Pesquisa Energética/Ministério das Minas e Energia, 2014. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2017.

BRINA, H. L. *Estradas de ferro: tração, frenagem, material rodante, circulação de trens*. 2. ed. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 1988. v. 2.

BROUWER, J.; OWENS, W. D.; HARDING, N. S.; HEAP, M. P. Co-Firing Waste Fuels and Coal for Emissions Reduction. *Proceedings of the Second Biomass Conference of the Americas*, 1995.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). *Relatório de Qualidade do Ar do Estado de São Paulo 2002*. São Paulo: CETESB, 2003.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 316/2002. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res31602.html>>. Acesso em: set. 2017.

CORRÊA NETO, Vicente. *Análise de viabilidade da cogeração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural*. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/vcneto.pdf>>. Acesso em: out. 2014.

DAMASCENO, F. G. *Avaliação do reaproveitamento de dormentes de madeira da Estrada de Ferro Carajás para a cogeração de energia elétrica*. Dissertação (Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais) – Instituto Tecnológico Vale, Belém, 2015.

ERM BRASIL; VALE S.A. *Teste de queima de dormentes na Usina Termelétrica da Queiroz Galvão localizada em Santa Inês-MA*. Relatório Final. VALE/ERM, dez. 2013.

FALK, R. H.; MCKEEVER, D. B. Recovering wood for reuse and recycling: a United States perspective. In: EUROPEAN COST E31 CONFERENCE: MANAGEMENT OF RECOVERED WOOD RECYCLING BIOENERGY AND OTHER OPTIONS. *Proceedings*, 22-24 abr. 2004, Thessaloniki: University Studio Press, 2004. p. 29-40.

FERDOUS, W.; MANALO, A.; VAN ERP, G.; ARAVINTHAN, T.; KAEWUNRUEN, S.; REMENNIKOV, A. Composite railway sleepers – Recent developments, challenges and future prospects. *Composite Structures*, v. 134, p. 158-168, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.058>

FERRARINI, S.F.; SANTOS, H. S.; MIRANDA, L. G.; AZEVEDO, C. M. N.; MAIA, S. M.; PIRES, M. Decontamination of CCA-treated eucalyptus wood waste by acid leaching. *Waste Management*, v. 49, p. 253-262, 2016.

GENOVESE, A. L.; UDAETA, M. E. M.; GALVÃO, L. C. R. Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo. In: ENCONTRO DE ENERGIA DO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. *Anais...* 2006. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000100021&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 13 jun. 2013.

GOMES, H.; RIBEIRO, A. B.; LOBO, V. Otimização da localização de unidades de remediação de resíduos de madeira tratada. *Silva Lusitana*, v. 14, n. 2, p. 181-202, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0870-63522006000200005&lng=es&nrm=.pf>. Acesso em: jan. 2015.

GOMES, S. I.; CORRADI, G.; RAVAGNANI, M. A. S. S.; ANDRADE, C. M. G. Análise da viabilidade do sistema silvipastoril como alternativa energética, não convencional, para produção complementar de energia elétrica e o desenvolvimento territorial sustentável. In: SIMPÓSIO DE BIOENERGIA E BIOCMBUSTÍVEIS DO MERCOSUL, 2., 2014.

Anais... 2014. Disponível em: <<http://cac-php.unioeste.br/eventos/simbiomercosul/anais/arquivos/171.pdf>>. Acesso em: 12 jun. 2017.

HELSEN, L.; VAN DEN BULCK, E.; HERY, J. S. Total recycling of CCA treated wood waste by low-temperature pyrolysis. *Waste Management*, v. 18, p. 571-578, 1998.

HERY, J.-S. A complete industrial process to recycle CCA-treated wood. In: ENVIRONMENTAL IMPACTS OF PRESERVATIVE-TREATED WOOD, 2004, Orlando. *Proceedings...* 2004. Disponível em: <http://ccaresearch.org/ccaconference/pre/document/FI_Env_Cent_Treated_Wood_Proceedings2.pdf#page=321>. Acesso em: 01 jun. 2017.

JAPH SERVIÇOS ANALÍTICOS; RECICARBON INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. *Relatório do Estudo de Viabilidade de Queima (EVQ) com dormentes*. Unidade Industrial de Aracruz, Espírito Santo. Relatório Final. Aracruz: Recicarbon Ind. Com. Ltda./JAPH Serviços Analíticos Ltda., 2013.

KAMISAKI, G.; VALENTE, R. C.; HEIER, T.; MACHADO, H. A. Análise técnica e econômica da cogeração de energia elétrica utilizando turbina a vapor em ciclo simples a partir de biomassa. Faculdade de Tecnologia de Resende da Universidade Estadual do Rio de Janeiro. Paper CIT-06-0260. *Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering ENCIT*, Curitiba, 2006.

KAPOORIA, R. K.; KUMAR, S.; KASANA, K. S. An analysis of a thermal power plant working on a Rankine cycle: a theoretical investigation. *Journal of Energy in Southern Africa*, v. 19, n. 1, 2008.

MAGALHÃES, W. L. E.; MATTOS, B. D.; MISSIO, A. L. Field testing of CCA – treated Brazilian spotted gum. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 74, p. 124-128, 2012. DOI: 10.1016/j.ibiod.2012.05.024

MANALO, A.; ARAVINTHAN, T.; KARUNASENA, W.; TICOALU, A. A review of alternative materials for replacing existing timber sleepers. *Composite Structures*, v. 92, n. 3, p. 603-611, 2010.

MARCOTTE, S.; POISSON, T.; PORTET-KOLTALO, F.; AUBRAYS, M.; BASLE, J.; DE BORT, M.; GIRAUD, M.; NGUYEN HOANG, T.; OCTAU, C.; PASQUEREAU, J.; BLONDEEL, C. Evaluation of the PAH and water-extractable phenols content in used cross ties from French rail network. *Chemosphere*, v. 111, p. 1-6, 2014. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.03.012

NOGUEIRA, L. A. H. *Uso da biomassa florestal para geração elétrica em grande escala: o projeto “WBP-SIGAME” brasileiro*. Itajubá: Instituto de Mecânica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá/Depósito de Documentos da FAO, 1995. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/t2363s/t2363s0m.htm#usodebiomassaflorestalparageraçãoeletricaemgrande>>. Acesso em: out. 2014.

RAMOS, W. F.; RUIVO, M. L. P.; GONÇALVES JARDIM, M. A.; PORRO, R.; SILVA CASTRO, R. M.; SOUSA, L. M. Análise da indústria madeireira na Amazônia: gestão, uso e armazenamento de resíduos. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 43, p. 1-16, mar. 2017. DOI: 10.5327/Z2176-947820170057

RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. F. M.; BRASIL, A. C. M.; CRUZ, D. O. A.; GUERRA, D. R. S.; MACÊDO, E. N.; ICHIHARA, J. A. Combustão e gasificação de biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. Disponível em: <<http://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/863/2/combust%C3%A3o%20e%20gasifica%C3%A7%C3%A3o%20de%20biomassa%20s%C3%B3lida.pdf>>. Acesso em: dez. 2014.

SALLES, A. C. N. de. *Emissões dos gases do efeito estufa dos dormentes de ferrovia de madeira natural e de madeira plástica no Brasil e na Alemanha com base em seus ciclos de vida*. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

TASKHIRI, M. S.; GARBS, M.; GELDERMANN, J. Sustainable logistics network for wood flow considering cascade utilization. *Journal of Cleaner Production*, v. 110, n. 1, p. 25-39, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.098>

THIERFELDER, T.; SANDSTRÖM, E. The creosote content of used railway crossties as compared with European stipulations for hazardous waste. *Science of the Total Environment*, v. 402, p. 106-112, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969708004701?via%3Dihub>>. Acesso em: 01 jun. 2017. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.04.035

TORRES FILHO, A. *Viabilidade técnica e ambiental da utilização de resíduos de madeira para produção de um combustível alternativo*. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

TREATED WOOD COUNCIL. *Comments on proposed draft final regulations – 225 CMR 14:00: Renewable Energy Portfolio Standard – Class I: Eligible Biomass Fuel Definition Revisions*. Massachusetts Department of Energy Resources, 2012.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Method 5 - Particulate Matter (PM). Air Emission Measurement Center (EMC). Disponível em: <<https://www.epa.gov/emc/method-5-particulate-matter-pm>>. Acesso em: 01 jun. 2017.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Preliminary Risk Assessment for Creosote. *Pesticides: Topical & Chemical Fact Sheets*, 2007. Disponível em: <https://inspectapedia.com/chimneys/Creosote_Risks_EPA.pdf>. Acesso em: abr. 2014.

VALE S.A. *Contrato interno nº 2162147 para incineração de resíduos perigosos*. Central de Materiais Descartados (CMD). VALE S.A., 2013. (mimeo.).

_____. *Especificação técnica para dormentes de eucalipto*. VALE S.A., 2009. (mimeo.).

VIDAL, J. M.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; JANKOWSKY, I. P. Preservação de madeiras no Brasil: histórico, cenário atual e tendências. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 25, n. 1, jan.-mar. 2015. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cflo/v25n1/0103-9954-cflo-25-01-00257.pdf>>. Acesso em: 12 jun. 2017.

WANG, D. K. W.; CHIU, D. H.; LEUNG, P. K.; THOMAS, R. S.; LAO, R. C. Sampling and analytical methodologies for PCDDs and PCDFs in incinerators and wood burning facilities. In: TUCKER, R. E.; YOUNG, A. L.; GRAY, A. P. (Eds.). *Human and Environmental Risks of Chlorinated Dioxins and Related Compounds*. New York: Plenum Press, 1983. p. 113-126.