

POTENCIAL USO DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS COMO MATERIAL PULVERIZADO PARA INJEÇÃO EM ALTOS-FORNOS *

Alex Milton Albergaria Campos¹
Lays Augusta Leal Carvalho²
Luiz Filipe Cardoso de Oliveira³
Paulo Santos Assis⁴

Resumo

O agronegócio movimenta a economia de muitos países, sendo que sua produção representa um terço do PIB mundial. Desde a colheita até o processamento de seus produtos, a atividade agrícola gera uma grande quantidade de resíduos que, muitas vezes, não tem uma alocação correta, o que acaba sendo um problema. Esses resíduos tem um grande potencial para substituir parcialmente combustíveis fósseis, como o carvão mineral. O carvão queimado nos altos-fornos é responsável por cerca de 60% das emissões de CO₂ na indústria siderúrgica. No entanto, a atividade agrícola pode contribuir para a captura de CO₂ na atmosfera à medida que este é absorvido durante a fotossíntese. Portanto, o uso de resíduos do agronegócio pode ser viável para ser usado na injeção de alto-forno, substituindo parte do carvão mineral. Alguns estudos mostraram que o cultivo de cana-de-açúcar e a produção de carvão vegetal no Brasil, os resíduos do cultivo de milho nos Estados Unidos, bem como o uso de resíduos de *Moringa oleifera* na Índia, podem ser usados gerando economia e diminuindo a emissão de CO₂. Neste trabalho, são apresentadas as comparações química, física e térmica de alguns resíduos do agronegócio com potencial para serem utilizados como material pulverizado injetado no alto-forno, junto ao carvão mineral. Além disso, a viabilidade econômica e a possibilidade de reduzir as emissões de CO₂ nesse processo são comentadas.

Palavras-chave: Biomassa, Biocombustíveis, Siderurgia, Processos Limpos, Gases de Efeito Estufa.

POTENTIAL USE OF AGRICULTURAL WASTE AS INJECTING MATERIAL IN THE BLAST FURNACE

Abstract

Agribusiness is one of the largest generators of the world income, and its production accounts for one third of the world economy. From the harvest until the processing of their products, the agricultural activity generates a great amount of waste that often does not have a correct allocation, which ends up being a problem. This waste has great potential for partial replacement of fossil fuels such as coal. The coal burned in blast furnaces accounts for about 60% CO₂ emissions in the steel industry. However, agricultural activity may contribute to the removal of CO₂ from the atmosphere as the crop grows. Therefore, the use of agribusiness waste may be feasible to be used in the blast furnace injection, replacing part of the coal. Some studies have shown that sugarcane cultivation and charcoal production in Brazil, corn cultivation in the United States, as well as the use of *Moringa oleifera* waste in India, can be used to bring financial gains. Furthermore, carbon credits can also be generated. In this work, chemical, physical and thermal comparison of some agribusinesses waste with potential to be used as material injected into the blast furnace together with the coal are shown. In addition, the economic feasibility and the possibility of reducing CO₂ emissions in this process are commented.

Keywords: Biomass, Iron making, Biofuels, Steelmaking, Clean processes, Greenhouse Gas.

¹ Graduado em Engenharia Metalúrgica-UFOP. Aluno de doutorado em Engenharia de Materiais-REDEMAT/UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

² Graduada em Engenharia Metalúrgica-UFOP. Aluno de mestrado em Engenharia de Materiais-REDEMAT/UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

³ Graduando em Engenharia Metalúrgica-Universidade Federal de Ouro Preto-UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

⁴ Professor Doutor Titular na REDEMAT e UFOP - Escola de Minas. Pesquisador CNPq. Conselheiro da ABM e EcoEnviroX, Ouro Preto, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A atividade agrícola é, sem dúvida, uma das atividades mais importantes do mundo. Sua produção está diretamente ligada à economia de um país e pode abastecer vários mercados no mundo, além de gerar alimentos para milhões de pessoas. No mundo, são produzidos bilhões de toneladas de diversos produtos agrícolas, com características de cada localidade que abastecem os mercados interno e externo, representando um terço da economia mundial. A Tabela 1 mostra dados da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), onde é possível ver a produção e a quantidade de resíduos gerados pela atividade agrícola.

Tabela 1. Produção agrícola em 2018 (FAO, 2019)

Matéria-Prima	Produção (milhoes de ton.)	Geração de Resíduos (Milhoes de ton.)
Cana-de-açúcar	1760,7	742,1
Soja	341,5	96,9
Arroz	740,9	518,6
Milho	1093,3	1378,1

Um ponto pouco discutido é a grande quantidade de resíduos que a atividade agrícola gera. Da mesma forma, há bilhões de resíduos que na maioria das vezes não têm destino adequado e acabam se tornando passivos ambientais para os agricultores. Alguns produtores utilizam parte destes resíduos para alimentar animais, queimar em termoelétricas e, conseqüentemente, geração de energia elétrica, entre outros. No entanto, devido ao grande volume de produção, a quantidade desses materiais não é consumida inteiramente, sendo armazenada e gerando custos para os produtores.

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), algumas culturas possuem alto fator residual. O milho, por exemplo, tem um fator residual de 58%, ou seja, para cada tonelada de grãos produzidos, são geradas 1,38 tonelada de resíduos (sabugo e palha). Além do milho, outra planta que chama atenção é a cana-de-açúcar, que tem um fator residual de 52% (palha e bagaço). Cada cultura tem um fator residual diferente, em outras palavras, cada cultura produz uma quantidade diferente de resíduos que podem ser usados para outras aplicações ou simplesmente armazenados até que tenham um destino adequado e viável.

Por outro lado, as siderúrgicas são conhecidas por seu forte consumo de carvão, que é um combustível fóssil de fonte não renovável. Esse consumo de carvão é o maior responsável pelas emissões de CO₂ nas usinas siderúrgicas. Além disso, em alguns países, como o Brasil, não há reservas de carvão com a qualidade desejada para a siderurgia. Porém, é importante lembrar que trabalhos utilizando carvão oriundo do sul do Brasil foram realizados na UFRGS mostrando a viabilidade técnica do seu uso não só na injeção de materiais pulverizados no alto-forno como também na produção de coque metalúrgico (Gums et al., 2018).

Segundo Wang et al. (2015), a produção de aço responde por 4-7% de todas as emissões de CO₂ do planeta. Essas emissões estão diretamente ligadas à queima de combustíveis fósseis. Para Orth (2007), o maior emissor de CO₂ nas siderúrgicas é o alto-forno, responsável por 70% das emissões na produção de aço. Considerando que 72% de todo o aço produzido no mundo é via LD, a quantidade de gases de efeito estufa gerada é enorme. Como pode ser visto na Figura 1, a quantidade de CO₂ gerada na produção de 1 tonelada de aço é de 2227 kg, considerando o carvão mineral como base energética.

CO₂ emissions in conventional steelmaking (blast furnace + BOF)

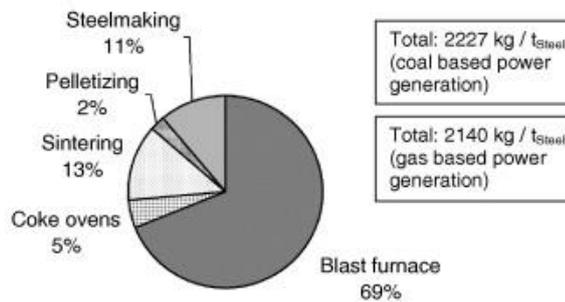


Figura1. Emissões de Co₂ na siderurgia (ORTH, 2007).

A introdução do conceito de energia sustentável aponta para o crescente uso de fontes de energia limpas e renováveis, como a biomassa, eólica e solar. Hoje existe um consenso internacional para reduzir as emissões de gases poluentes, reduzindo o consumo de combustíveis fósseis. A indústria siderúrgica, portanto, precisa redobrar seus esforços para ajustar seus processos operacionais ao compromisso com os protocolos e conferências dos últimos anos. A combinação de tecnologias energéticas mais eficientes, assim como o uso de biomassa, cogeração de energia, otimização do ciclo de vida dos materiais e, em alguns casos, o seqüestro de carbono, pode resultar em reduções significativas no consumo de energia e na quantidade de emissões de dióxido de carbono. Deve-se notar que a utilização da maior parte deste potencial pode gerar um custo maior, já que esse cenário ainda está sendo desenvolvido em todo o mundo e ainda requer pesquisa e investimento (Assis, 2014).

Numerosos trabalhos foram desenvolvidos nos últimos anos usando biomassa como material a serem injetados em altos-fornos. Em geral, os resultados são favoráveis, tendo como principal desafio a disponibilidade, logística e pré-tratamento da biomassa. Assim, este trabalho traz algumas análises sobre o uso de três resíduos do agronegócio. Um deles é o bagaço de cana-de-açúcar, que o Brasil é o maior produtor. Outro é o milho que tem a maior produção nos Estados Unidos da América. Finalmente, a Moringa oleifera, produzida em larga escala na Índia. Uma pequena avaliação técnica, econômica e ambiental do uso desses resíduos como materiais pulverizados injetados no alto-forno será apresentada.

2 DESENVOLVIMENTO

A grande oportunidade de utilizar os resíduos da agricultura no alto-forno é na injeção de materiais pulverizados através das ventaneiras. Nesta técnica, é possível adequar a quantidade injetada de acordo com a disponibilidade de biomassa para esse fim. Para ser injetada, a biomassa deve apresentar algumas características como: baixo teor de cinzas, alto teor de carbono, granulometria adequada e bom poder calorífico. Algumas biomassas apresentam condições favoráveis para injeção, mas tratamentos como torrefação e carbonização podem ser realizados previamente para melhorar as propriedades desses materiais (Suopajarvi et al., 2013). A torrefação é um tratamento onde os resíduos agrícolas são aquecidos em torno de 200°C sem oxigênio. Com isso, a umidade e os voláteis serão removidos e, conseqüentemente, o carbono fixo aumentará.

Um teste muito interessante para avaliar as condições de injeção desses materiais é a simulação física de injeção de materiais pulverizados. Muitos testes foram

realizados na Universidade Federal de Ouro Preto, no laboratório de simulação de injeção de materiais pulverizados, onde é possível simular as condições da zona de combustão do alto-forno. A figura 2 demonstra o equipamento da Universidade Federal de Ouro Preto.



Figura 2. Simulador de injeção e ORSAT.

Neste equipamento o material é inserido no porta amostra onde é carregado para o forno 2 pelo oxigênio pré-aquecido no forno 1. Após a queima do material (milésimos de segundos) o gás é coletado e analisado no ORSAT. Enfim, com os dados destas análises é possível calcular a taxa de combustão (Oliveira et al., 2016). A taxa de combustão nada mais é que a eficiência de combustão que mostra, simplesmente, o quanto este material é capaz de queimar na zona de combustão do alto-forno, liberando gases e fornecendo energia para o processo.

Outra forma de calcular a eficiência de combustão é através do *burnout*, que é obtido a partir da relação entre o teor de cinzas dos materiais que entraram no reator (forno 2) com o teor de cinzas dos chars coletados após o ensaio (Fragoso et al., 2018).

A partir daqui, serão mostradas as possibilidades técnicas, econômicas e ambientais do uso de resíduos agrícolas do cultivo da cana-de-açúcar, moringa *oleifera* e do milho.

2.1 Cana-de-Açúcar

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. Em 2018, a produção foi de cerca de 700 milhões de toneladas. Grande parte dessa produção vai para a indústria do álcool, onde, para produzir 1 tonelada de álcool, é gerado quase 400 kg de bagaço de cana. Isso significa que em um ano cerca de 280 milhões de toneladas desse material são gerados no Brasil.

Devido ao grande potencial de utilização deste material como combustível a ser injetado no alto-forno, foram realizados alguns testes na Universidade Federal de Ouro Preto para avaliar as propriedades do bagaço de cana. A Figura 3 mostra alguns resultados obtidos na simulação de injeção do material de simulação.

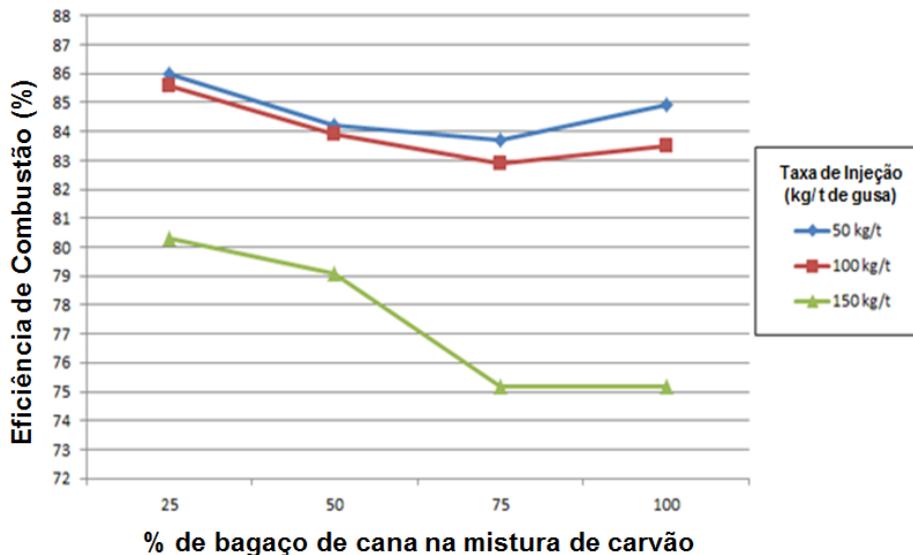


Figura 3. Eficiência de combustão para misturas de bagaço de cana e carvão mineral. (ASSIS, 2014)

Observa-se que a taxa de combustão diminui à medida que se aumenta a quantidade de bagaço de cana na mistura com o carvão mineral. Essa diminuição na taxa de combustão pode ser justificada pelo menor poder calorífico do bagaço. É observado também que à medida que se aumenta a taxa de injeção a taxa de combustão diminui. Porém este efeito é notado para todos os materiais, inclusive o carvão mineral, pois desta maneira se tem um maior volume e uma maior massa de material para ser queimado na zona de combustão.

Para altas taxas de injeção o bagaço puro, 100%, não se mostra vantajoso devido a grande diferença na eficiência de combustão em relação às misturas e as outras taxas. Este resultado leva a crer que este tipo de injeção poderia ocasionar em uma diminuição da temperatura de chama, o que demandaria mais energia para reduzir os materiais no interior do forno e conseqüente aumento no consumo de coque/carvão vegetal. Mas, ao mesmo tempo, misturas contendo 25% de bagaço de cana demonstram a possível vantagem técnica do uso para injeção nos altos-fornos.

2.3 Moringa oleifera

Moringa *oleifera* é uma árvore versátil, que se adapta bem a solos com baixa umidade e clima quente, com inúmeras aplicações na área farmacêutica, cosmética, alimentícia e outras. Seu óleo tem grande potencial não só para a produção de cosméticos e medicamentos, mas também para a produção de biodiesel. Ao extrair o óleo, são gerados alguns resíduos, como a casca de sementes e os resíduos após a prensagem mecânica ou extração por solventes das sementes descascadas. Esse resíduo tem grande potencial para gerar energia para processos como a injeção de materiais pulverizados nos altos-fornos. É possível ver na figura 4 que o grande produtor é a Ásia, com destaques para a Índia que foi responsável por 80% das exportações de Moringa em 2015.

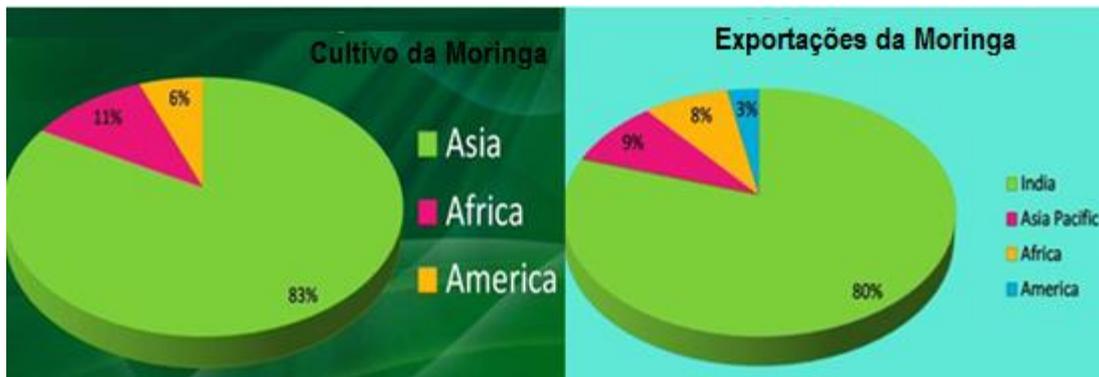


Figura 4. Produção e mercado da moringa (Prunderground, 2015).

As análises eficiência de combustão da casca da semente da moringa (MH), feitas no simulador de injeção, mostra possíveis comportamentos deste material na zona de combustão do alto-forno. A figura 5 mostra alguns resultados simulando três taxas de injeção diferentes.

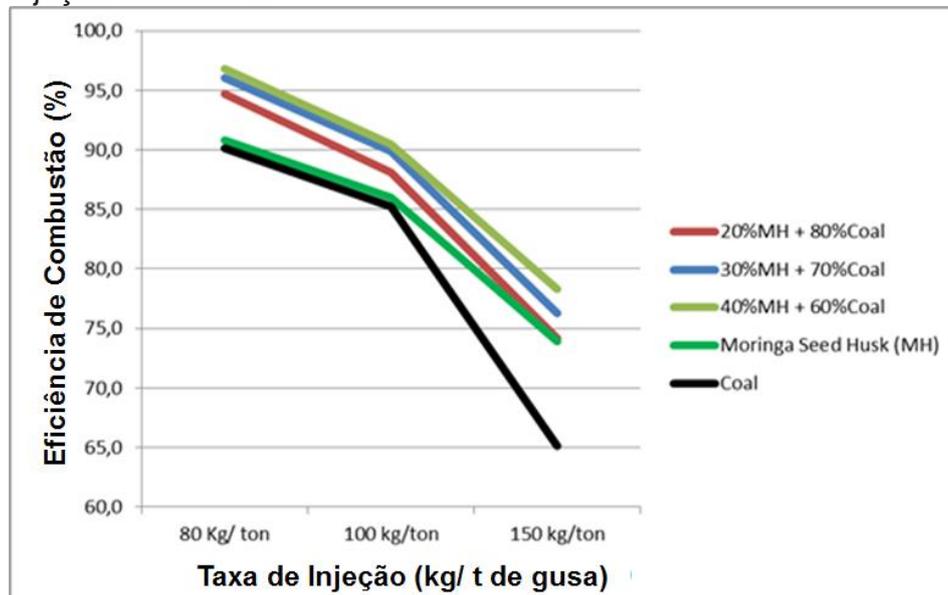


Figura 5. Eficiência de combustão x Taxa de injeção de misturas de carvão mineral e casca da semente da moringa (MH).

Como é percebido para outros materiais, a medida que se aumenta a taxa de injeção a eficiência de combustão, ou taxa de combustão, diminui. Um fato importante a ser notado aqui é que a taxa de combustão da casca da moringa pura é menor que as das misturas sendo que, as misturas tiveram sua taxa de combustão aumentada quando se aumenta o teor da biomassa.

Assim como outras biomassas, a casca da semente da moringa possui uma grande quantidade de voláteis. Materiais com alto teor de voláteis apresentam maior combustibilidade. Este tipo de material é desejado para altas taxas de injeção, devido ao curto tempo de permanência deste material na zona de combustão do alto-forno. No entanto, um alto teor de voláteis aumenta o volume de gases gerados, ampliando a instabilidade da carga e a degradação do coque, além de outros problemas operacionais.

Outra questão que pode ser levantada é a possibilidade de o aumento da quantidade de biomassa na mistura causar uma diminuição na temperatura de chama. Porém se for considerado o ato de a biomassa ter um teor de hidrogênio

maior, o orno pode ser operado com uma temperatura de chama um pouco menor. O hidrogênio pode reduzir os óxidos de ferro de maneira menos endotérmica, ou seja, é necessária uma quantidade menor de energia para que ocorram as reações de redução da carga metálica.

Mesmo com as questões levantadas controladas, é necessário avaliar a quantidade na mistura. A quantidade deve estar ligada a disponibilidade de material a ser injetado e as condições operacionais citadas anteriormente. É possível ver na figura 5 que a mistura contendo 40% de biomassa e 60% de carvão mineral obteve a maior eficiência de combustão.

2.3 Milho

O milho é um grão produzido em quase todos os países do mundo. É a base para inúmeros tipos de alimentos, não só para a vida humana, mas também para alimentar os animais. Em 2017, segundo a FAO, foram produzidas 1,09 bilhão de toneladas de milho e o grande produtor dos Estados Unidos, com 370 milhões de toneladas, em seguida vêm a China, Rússia e Brasil.

O Cinturão do Milho nos EUA produz cerca de 500 milhões de toneladas de resíduos deste cultivo, sendo que nem todo volume é reutilizado de forma satisfatória. Para ser usado como material pulverizado a ser injetado no alto-forno é necessário moer, peneirar e secar esse material. Alguns tratamentos como a torrefação podem ser feitos para melhorar as propriedades do material.

A substituição do carvão mineral por resíduos do cultivo do milho pode diminuir as emissões de CO₂ se a captura, na fotossíntese, for considerada. Além disso, a substituição do carvão por biomassa pode gerar crédito de carbono. Em outras palavras, pode ajudar a preservar o planeta e economizar dinheiro.

As propriedades e o comportamento desses materiais no alto-forno devem ser considerados para começar a avaliar os aspectos econômicos e ambientais. Como pode ser visto na tabela 2, a espiga e a palha, ambos resíduos do processamento de milho, possuem algumas propriedades que podem ser interessantes para os usos do alto-forno.

Tabela2. Propriedades dos resíduos do milho (RAMOS e PAULA, 2011).

Propriedades	Resíduos do cultivo do Milho		
	Sabugo	Palha	Caule e Folha
% Carbono	45,5	44,8	45,6
%Hidrogênio	6,7	6,8	6,5
%Enxofre	0,3	0,1	0,3
%Oxigênio	47	47,9	46,5
%Cinzas	1,16	1,58	3,43
%Voláteis	81,31	81,68	78,30
%Carbono Fixo	18,32	17,05	20,47
Poder calorífico Superior (cal/g)	4615,26	4443,38	4462,54

Em primeiro lugar, o baixo teor de cinzas deve ser considerado, pois é importante devido ao menor tempo de permanência do material na zona de combustão quando este é injetado. Segundo, a alta quantidade de voláteis pode ser desejada quando a alta taxa de injeção está sendo praticada. Por último, o teor de enxofre é muito inferior ao do carvão, o que é importante para o próximo passo no processo de produção de aço.

2.3 Aspectos econômicos e ambientais

Para alguns países, como o Brasil, a disponibilidade de carvão é limitada. Isso significa que os custos desse combustível representam 40% do valor do aço. O preço do carvão metalúrgico para as siderúrgicas brasileiras é de cerca de US \$ 250 por tonelada. Considerando um alto-forno produzindo 8.000 toneladas de gusa e injetando 180 kg por tonelada de gusa, o custo do carvão na injeção seria de 360.000 dólares por dia, o que equivale a cerca de 132 milhões por ano. Suopajärvi (2017) cita o custo de algumas biomassas em torno de 120 dólares por tonelada, valores considerando apenas logística e pré-tratamento. Considerando a substituição de 80kg de carvão injetado por essas biomassas, o custo anual com material de injeção seria de aproximadamente 101 milhões de dólares. Nesse caso, a economia anual em material de injeção seria de 20%, ou US \$ 30 milhões, se uma taxa de substituição de 1 for considerada para essas biomassas. Se considerarmos que uma taxa de substituição teórica para a mistura contendo 40% de biomassa é 0,68, o custo da biomassa não pode ser superior a 65 dólares por tonelada para que esta economia seja válida.

Quanto ao aspecto ambiental. Leva-se em consideração que todo o CO₂ liberado na queima da biomassa é consumido durante o crescimento das culturas pelo processo de fotossíntese. Considerando assim, que uma empresa produz 10 mil toneladas de gusa por dia e injeta 150 kg de carvão por tonelada de gusa, pode-se dizer que, ao final do dia, 4400 toneladas de CO₂ são emitidas no processo de injeção. Se 40% desse carvão for substituído por biomassa, a emissão diária de CO₂ será de 1320 toneladas. Este resultado representa uma redução de 30% nas emissões de CO₂ no processo de injeção de materiais pulverizados no alto-forno.

3 CONCLUSÃO

Primeiro, pode-se concluir que, ao substituir o carvão por biomassa, há um efeito positivo no balanço de emissões de CO₂ e existe um potencial para economizar dinheiro com essa substituição.

Em segundo lugar, as biomassas apresentadas têm algumas propriedades diferentes do carvão, como menor teor de carbono, teor de cinzas, teor de enxofre e poder calorífico, mas possuem maior conteúdo volátil, hidrogênio e oxigênio do que este combustível fóssil.

Por fim, todos os países podem explorar seus resíduos para usá-los no processo de fabricação de aço para gerar economia e contribuir para o desenvolvimento sustentável. No entanto, para ser economicamente viável, a localização e o espaço disponível para a produção de biomassas para esse uso devem ser analisados, assim como o custo de logística e pré-tratamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, a REDEMAT, a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), EcoEnvirox e todos aqueles que contribuíram para esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 Assis, C.F.C., Tenório, J.A.S., Assis, P.S., Nath, N.K., 2014a. Experimental simulation and analysis of agricultural waste injection as an alternative fuel for blast furnace. *ACS Energy&Fuels*, v.28, p. 7268-7273.
- 2 Campos, A.M.A, Novack, K.M., Assis, P.S. Uses Of The Husk From Moringa Oleifera Seed For Blast Furnace Injection, *ABMWeek 2018*, São Paulo-SP, Brazil.
- 3 FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018. Production of crops. Available at: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>.
- 4 Fragoso, Hector Alejandro Picarte; Pohlmann, Juliana Gonçalves; Machado, Janaína Gonçalves Maria da Silva; Vilela, Antônio Cezar Faria; Osório, Eduardo. **INFLUÊNCIA DOS VOLÁTEIS E DO TAMANHO DE PARTÍCULAS DE CARVÕES NA COMBUSTÃO EM SIMULADOR DE PCI**, p. 383-394. In: *48º Seminário de Redução* Machado, L.A.; Habib, M. Perspectivas e impactos da cultura de cana-de-açúcar no Brasil. 2009. Available at: <http://www.infobibos.com/Artigos/2009_2/Cana/index.htm>.
- 5 Gums, Alessandro; Flores, Bruno Deves; Agra, Anderson Azevedo; Silva, Guilherme L. R. da; Vilela, Antônio C. F.; Osório, Eduardo. **ESTUDO DAS INTERAÇÕES ENTRE CARVÕES NO DESENVOLVIMENTO PLÁSTICO DE MISTURAS CONTENDO CARVAO NACIONAL**, p. 953-965. In: *48º Seminário de Redução de Minérios e Matérias-primas*, São Paulo, 2018.
- 6 Oliveira, R.S., Assis P.S., Assis, C.F.C. Estudo da Injeção de Casca de Eucalipto com Carvão Mineral em Alto-Forno. *TMM: Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, São Paulo, vol.13, no.2, p. 130-135, abr. jun. 2016.
- 7 Orth, A., Anastasijevic, N., Eichberger, H., Low CO2 emission technologies for iron and steelmaking as well as titania slag production, *Minerals Engineering*, 2007, volume 20, issued 9, pp. 854-861.
- 8 Prunderground. The 2015 Global Moringa Meet updates Moringa Export Market Trend, Upward Integration & Opportunities, 2015. Available at: <<http://www.prunderground.com/the-2015-global-moringa-meet-updates-moringa-export-market-trend-upward-integration-opportunities/0064082/>>.
- 9 RAMOS e PAULA, L. E. , de et al . Characterization of Residues from Plant Biomass for Use in energy Generation. *Cerne, Lavras* , v. 17, n. 2, p. 237-246, abr./jun. 2011.
- 10 Suopajarvi, H., Pongrácz, E., Fabritius, T., 2013. The potential of using biomass-based reducing agents in blast furnace: A review of Thermochemical conversion Technologies and assessments related to sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25, 511-528p.
- 11 Suopajarvi, H., Kemppainen, A., Haapakangas, J., Fabritius, T., 2017. Extensive review of the opportunities to use biomass-based fuels in iron and steelmaking processes. *Journal of Cleaner Production*, v.148, p.709-734.
- 12 Wang, C., Mellin,P., Lövgren,J., Nilsson,L., Yang,W., Salman,H., Hultgren,A., Larsson,M.,2015. Biomass as blast furnace injectant-Considering availability, pretreatment and deployment in the Swedish steel industry. *Energy Conversion and Management*,v.102,p.217-226.