

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE SINOP
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS
ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

**USO DOS RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE MILHO
COMO ALTERNATIVA AO CAVACO DE EUCALIPTO
NA INDÚSTRIA DE ETANOL DE MILHO**

VITOR CAMPAGNOLO DOS SANTOS

SINOP
MATO GROSSO – BRASIL
2022

VITOR CAMPAGNOLO DOS SANTOS

**USO DOS RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE MILHO
COMO ALTERNATIVA AO CAVACO DE EUCALIPTO
NA INDÚSTRIA DE ETANOL DE MILHO**

Orientadora: **Prof^a. Dr^a. Roberta Martins Nogueira**

Projeto de Trabalho de Curso apresentado à
Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT
– *Campus* Universitário de Sinop, como parte
das exigências para obtenção do Título de
Engenheiro Agrícola e Ambiental.

SINOP

2022

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	5
2.	OBJETIVOS	6
2.1.	OBJETIVO GERAL.....	6
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
3.	REVISÃO DE LITERATURA.....	7
4.	MATERIAL E MÉTODOS	10
5.	RESULTADOS	16
6.	DISCUSSÃO	18
7.	CONCLUSÃO	20
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	21

USO DOS RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE MILHO COMO ALTERNATIVA AO CAVACO DE EUCALIPTO NA INDÚSTRIA DE ETANOL DE MILHO

RESUMO

Essa avaliação teve como objetivo analisar com uma visão técnica a possibilidade de utilização do resíduo do milho que inicialmente permanece em campo para fins de ciclagem e conservação, em um uso para fins energético em combustão. As amostras foram coletadas em uma fazenda situada a 15 quilômetros do município de Vera MT, e encaminhadas ao Laboratório de Projetos e Processos Agroindustriais (LAPAG), vinculado ao Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Campus Universitário de Sinop, para seu processamento e análise. Por se tratar de uma cultura para fins de produção de grão, apresentou um potencial energético expressivo disponível de até 130mil MJ.ha⁻¹ sendo em uma produção relativamente rápida em 4 meses, acrescido a isso um cenário de carência de biomassa origem madeireira, se tornando uma alternativa a considerar para indústrias.

Palavras-chave: Bioenergia; Milho; Resíduos da agricultura; Poder calorífico;

USE OF WASTE FROM CORN PRODUCTION AS A SUBSTITUTE FOR WOOD DERIVATIVES FOR HEAT GENERATION IN THE ETHANOL INDUSTRY

ABSTRACT

This evaluation aimed to analyze with a technical view the possibility of using corn residue that initially remains in the field for recycling and conservation purposes, in a use for energy purposes in combustion. The samples were collected on a farm located 15 kilometers from the municipality of Vera MT, and sent to the Laboratório de Projetos e Processos Agroindustriais (LAPAG), linked to Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Campus Universitário de Sinop, for processing and analysis. As it is a crop for grain production, it presented an expressive energy potential available of up to $130,000 \text{ MJ}\cdot\text{ha}^{-1}$, being in a relatively fast production in 4 months, added to that a scenario of lack of biomass of wood origin, if making it an alternative to consider for industries.

Keywords: Bioenergy; Corn; Agricultural waste; Calorific value;

1. INTRODUÇÃO

Biomassa é toda matéria-prima de origem biológica e sustentável que pode ser empregada na geração de energia renovável, através de diversos processos de conversão, incluindo a combustão. A planta do milho é uma das mais eficientes na conversão de energia radiante e, conseqüentemente, na produção de biomassa (ANDRADE *et al.*, 1997).

No Brasil, os grãos de milho são usados principalmente como alimento quer seja para humanos ou para animais, contudo o uso para a produção de etanol vem ganhando cada vez mais espaço no centro-oeste brasileiro. Seus resíduos, como: palha, caule, folhas e sabugo normalmente são deixados no solo após a colheita para a ciclagem de seus nutrientes, com enfoque na cultura sucessiva. O Estado de Mato Grosso é o maior produtor de milho do Brasil, respondendo por aproximadamente 5 milhões de hectares plantados com rendimento médio de 6,3 t.ha⁻¹ de grãos (IBGE, 2019); Os resíduos por sua vez representam aproximadamente 9 t.ha⁻¹ em um sistema de plantio direto (COSME *et al.*, 2015), gerando números da ordem de 45 milhões de toneladas de resíduos por ano.

Empresas de produção de etanol de milho recentemente instaladas no Estado de Mato Grosso estão mudando a dinâmica das cadeias de suprimento. A oferta e a demanda pelos grãos de milho sofreram um aumento expressivo, o que alterou de maneira importante os preços praticados. Além da cadeia do próprio milho, a demanda por energia térmica nas caldeiras para atender as etapas de processamento industrial do grão trouxe impacto para a cadeia de combustíveis sólidos, principalmente os derivados de madeira como o cavaco e o pó de serraria. Com o aumento expressivo na demanda e o descompasso entre o tempo de produção da biomassa florestal e o consumo, observa-se o grande desafio de manter uma cadeia sustentável no Estado. Com aptidão para práticas agrícolas extensivas, o Estado de Mato Grosso apresenta poucas práticas voltadas ao florestamento, reflorestamento e manejo florestal para fins energéticos.

Uma alternativa para essa diferença entre a demanda e a oferta de biomassa é o uso dos resíduos agrícolas e/ou agroindustriais para a combustão em caldeiras, garantindo a sustentabilidade que é característica do uso da biomassa com a vantagem de se adequar à demanda no curto prazo.

Considerando-se que o resíduo do milho está diretamente vinculado à cadeia de produção de etanol, que o aumento na produção do grão para este fim aumentará também a produção deste resíduo, observa-se aqui uma alternativa aos combustíveis derivados de madeira, que deve ser avaliada sob os aspectos energéticos e ambientais.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial dos resíduos da colheita do milho como combustível alternativo a biomassa de madeira para a geração de calor em caldeiras na indústria de produção de etanol de milho.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar as características físicas, químicas e energéticas dos resíduos da colheita do milho: caule, folha, palha e sabugo;

Determinar a viabilidade técnica de cada resíduo caracterizado, inferindo sobre sua adequação ao uso nas caldeiras;

3. REVISÃO DE LITERATURA

A expansão acentuada do consumo de energia, resultante do desenvolvimento econômico e da melhoria da qualidade de vida das últimas décadas, carrega consigo a possibilidade do esgotamento dos recursos energéticos, impactos ao meio ambiente e a necessidade de elevados investimentos em pesquisa e desenvolvimento. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2019), no ano de 2018, cerca de 55% da energia do país foi oriundo de fontes não renováveis, combustíveis fósseis que causam inúmeros danos ambientais principalmente quando queimados.

O petróleo é um dos principais combustíveis utilizados no mundo, contudo, a constante preocupação com o aumento do preço, as perspectivas de esgotamento das reservas, os riscos geopolíticos decorrentes da dependência do petróleo de países politicamente instáveis e os compromissos mais sólidos com a questão ambiental desde a assinatura do Protocolo de Kyoto fizeram renascer a atenção nas fontes alternativas de energia. O biodiesel, a célula combustível de hidrogênio e, principalmente, o etanol passaram a constar de forma definitiva na agenda dos governos e das políticas de praticamente todos os países (BASTOS, 2015). O uso da biomassa vem ganhando cada vez mais espaços nas matrizes energéticas dos países, dada sua versatilidade, capacidade de adequação à demanda em um curto prazo e a possibilidade de aproveitamento em cadeias de produção já estruturadas.

A biomassa vegetal é uma composição estruturada de três famílias de compostos químicos: hemicelulose, celulose e lignina. A hemicelulose e a celulose estão agrupadas formando a holocelulose, a qual compõe as paredes das fibras da madeira, a lignina é um polímero tridimensional com a finalidade de manter as fibras juntas. Para que ocorra a combustão, a biomassa sólida tem que ser convertida em gás, e esse processo possui quatro etapas: secagem, pirólise (volatilização), gasificação e combustão (RENDEIRO *et al.*, 2008).

A primeira fase da combustão aquece a biomassa para a evaporação e eliminação da água. É uma energia praticamente perdida. A segunda fase de combustão se inicia quando a temperatura atinge aproximadamente 260°C quando a madeira começa a ser quimicamente degradada e materiais voláteis começam a ser vaporizados. Quando a temperatura chega aos 600°C e havendo possibilidades de uma correta e adequada mistura com o ar, estes gases passam a se inflamar. Se a temperatura dos gases voláteis não é mantida ao redor dos 600°C e a quantidade de ar não for suficiente a combustão não se completa. O terceiro estágio de combustão é o da queima do carvão que permanece após a liberação dos gases voláteis. O carvão se queima a temperaturas acima dos 600°C. Finalmente, uma pequena quantidade de cinza permanece após a queima do carvão. Todas as três fases da combustão da madeira ocorrem ao mesmo tempo. Contudo, as duas primeiras fases ocorrem preferencialmente quando o fogo está se iniciando. (BRITO; BARRICHELO, 1979).

A energia presente na biomassa pode ser convertida em combustíveis líquidos, sólidos e gasosos. Os resíduos agrícolas (também considerados como biomassa) armazenam grande quantidade de energia que pode ser aproveitada. O Brasil, por apresentar grandes dimensões cultiváveis, solo e condições climáticas adequadas, afigura-se como um dos maiores fornecedores de matérias primas para a produção de bioenergia, ou seja, os resíduos gerados durante o processo de produção agrícola podem ser utilizados para geração de energia (VIEIRA *et al.*, 2013).

Resíduos agroindustriais e florestais, subprodutos das principais atividades industriais e econômicas, também se apresentam como matérias-primas potenciais para a produção de combustíveis renováveis, produtos químicos e energia. O uso de resíduos apresenta inúmeras vantagens, dentre as quais destaca-se a não competição por terras cultiváveis para a produção de alimentos, e a rápida e ampla produção crescente, contudo uma desvantagem para resíduos agrícolas retirados do campo é que contabilizarão para uma menor quantidade de nutrientes consequentemente um aumento de custos com suplementos na safra futura.

No caso de resíduos produzidos em cidades o aproveitamento reduz os impactos de sua disposição inadequada, que é uma grande preocupação ambiental devido ao seu potencial de contaminação de rios e lençóis subterrâneos (FERREIRA-LEITAO *et al.*, 2010).

Um dos usos mais difundidos mundo a fora para a biomassa é a conversão em etanol. Neste caso, utiliza-se o açúcar ou amido presentes na biomassa para a produção deste combustível. O etanol como combustível, produzido a partir de biomassa, é considerado como combustível automotivo adequado para veículos equipados com ignição comandada motores de transmissão (tecnicamente referidos como motores de ciclo Otto, mais conhecido como motores a gasolina). (GOLDEMBERG, 2008).

O Brasil é um tradicional produtor de etanol a partir da biomassa da cana-de-açúcar, com mais de 50 anos de produção desde o lançamento do PROÁLCOOL. Contudo, o milho vem surgindo como uma matéria-prima importante para a cadeia de produção deste combustível, principalmente no Centro-oeste brasileiro, região que apresenta bons desempenhos na produção agrícola, assumindo a posição de liderança na produção de grãos do país. O estado do Mato Grosso ganha destaque, sendo responsável por 28,5% da produção nacional grãos, 33% da produção de milho, 28,4% da produção de soja (IBGE, 2022).

O milho, além de ter em seus grãos uma fonte rica em amido, é uma planta de alto potencial produtivo em biomassa. Para converter o amido presente nos grãos em etanol, inúmeros são os estágios necessários: moagem dos grãos, liquefação a partir da hidrólise, fermentação e destilação com obtenção de etanol hidratado como combustível. Além do etanol, o processamento dos grãos geram outros produtos, como: óleo de milho vinhaça e o DDG (Dried Distillers Grains) (DONKE *et al.*, 2014).

Considerando todas essas etapas para o processamento dos grãos de milho, as indústrias apresentam grande demanda energética, quer seja elétrica ou calorífica, que geralmente é obtida pela

combustão da biomassa. Estima-se que a demanda energética seja de aproximadamente 4.000 MJ.t^{-1} (SALLA, 2008).

Atualmente a demanda energética das indústrias de etanol de milho no Brasil é suprida pela combustão de derivados de madeira, com especial destaque para o cavaco. Em regiões onde há uma grande área destinada ao reflorestamento com eucalipto, o cavaco desta espécie é o mais utilizado. Contudo, o uso de madeira oriundas de áreas de florestas naturais ou ainda os resíduos oriundos do beneficiamento de espécies florestais nativas é uma realidade experimentada por diversas indústrias do segmento.

O uso de resíduos agrícolas ou agroindustriais pode ser uma alternativa à elevada demanda por biomassa para as indústrias de produção de etanol de milho. Os resíduos da lavoura do próprio milho surgem como uma alternativa ao excessivo uso da biomassa por esta cadeia produtiva.

No sistema de produção de milho atualmente empregado no Brasil, apenas os grãos são retirados das lavouras, a palhada (biomassa) é deixada sobre o solo para servir como fonte de nutrientes e como protetor da superfície contra os efeitos da erosão. Desta forma, o desenvolvimento de sistemas de colheita prevendo a recuperação dos resíduos ainda é insipiente, devendo-se avaliar técnica e economicamente o processo para o Brasil (MACEDO, 2001).

O estado do Mato Grosso apresenta uma área plantada de eucalipto em torno de 214 mil ha, comparada com sua área atualmente ocupada com o milho, que é de aproximadamente 5,38 milhões ha (IBGE 2021), é possível observar o desafio de fornecer energia para essa cadeia com o cavaco de eucalipto. Considerando-se toda a área plantada de milho e a geração de resíduos pós colheita da ordem de 9 toneladas de resíduo por hectare (COSME *et al.*, 2015), esse resíduo composto por palha, sabugo, caule e folhas, pode ser uma alternativa em potencial como fonte calorífica em processos industriais.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Amostras de resíduos da produção agrícola do milho utilizados nesta pesquisa foram coletados durante a safreinha do ano 2019/2020, na fazenda Dona Lidací situada no município de Vera-MT. A coleta das amostras foi realizada com o apoio de um gabarito construído com cano de PVC, medindo 1m x 1m, para uma padronização do conteúdo amostral de 1m² que facilita nos cálculos e na comparação. Os pés de milhos foram cortados rente ao chão e armazenados em sacos para serem transportados ao laboratório (figura 1). Foram coletadas 3 amostras aleatoriamente, em 2 talhões diferentes, selecionados a uma distância de 30 metros a partir das estradas para evitar falhas de bordadura.



Figura 1. Gabarito em utilização no campo para retirada das amostras.

As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Projetos e Processos Agroindustriais (LAPAG), vinculado ao Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, da Universidade Federal de Mato Grosso, Campus Universitário de Sinop, foram pesadas integralmente e segregadas em três grupos: palha que envolve os grãos da espiga, planta (contendo caule e folhas), e sabugo (Figura 2) e pesados novamente.

Então seguiram para análise imediata conforme a norma ASMT 1762-84(2021). Seguindo preparação do material, Umidade, teor de voláteis, teor de cinzas e carbono fixo.



Figura 2. Amostras segregadas e selecionadas para boa representatividade. (a)Palha (parte que envolve os grãos na espiga), (b)Sabugo, (c)Folhas, (d) caule.

As amostras segregadas foram fracionadas em partes menores (figura 3) para facilitar o processo de tritura no moinho de facas tipo willey (figura 4). Durante a etapa de trituração, tomou-se o cuidado de evitar a permanência da amostra por longo período no moinho, em virtude do aquecimento excessivo, gerando perda de material volátil da amostra. Posteriormente as amostras foram peneiradas com auxílio de um peneirador eletromecânico (figura 5a), amostras entre a peneira mesh 20 e mesh 100 foram armazenados em recipientes hermético e então foi levado para a análise química imediata. As amostras foram separadas em triplicas de 1g em cadinhos (figura 6) os mesmos estavam previamente secos na mufla a 750°C 10 min.



Figura 3. Preparo.



Figura 4. Moinho de facas tipo willey.



Figura 5. (a) Peneirador eletromecânico; (b) os potes com amostra após trituração no moinho.



Figura 6. Amostras separadas.

A umidade foi determinada por diferença de massa em estufa (SOLAB, SL-02) a 105°C durante 2 horas, após resfriamento do cadinho em dessecador. As massas iniciais e finais foram determinadas e a umidade calculada empregando-se a equação 1. (ASMT INTERNATIONAL 2021)

$$U = \frac{m1 - m2}{m1} * 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Sendo:

U: Teor de Umidade (% b.u.)

m1: massa inicial da amostra (g);

m2: massa da amostra após secagem 105 °C (g).

Após a determinação do teor de umidade, a mesma matéria de biomassa, agora com cadinhos tampados foram levadas à mufla pré-aquecida à 950 °C seguindo os seguintes passos: dois minutos na porta da mufla com a porta da mufla aberta, depois 3 minutos na borda interna da mufla mas ainda com a porta aberta, em seguida com a porta fechada por mais seis minutos. posteriormente a amostra

foi colocada em um dessecador para resfriamento e pesagem. O teor de voláteis foi determinado conforme a equação 2. (ASMT INTERNATIONAL 2021)

$$T_v = \frac{m_2 - m_3}{m_2} * 100 \quad \text{Eq. 2}$$

Sendo:

Tv: teor de voláteis (%);

m2: massa da amostra após secagem 105 °C (g);

m3: massa da amostra após secagem 950 °C (g).

As amostras ainda em sequência porem sem tampa seguiram novamente para a mufla pré aquecida a uma temperatura de 750 °C por seis horas. O teor de cinzas foi calculado de acordo com a equação 3. (ASMT INTERNATIONAL 2021)

$$T_c = \frac{m_4}{m_3} * 100 \quad \text{Eq. 3}$$

Onde

Tc: teor de cinzas (%);

m3: massa da amostra após secagem 950 °C (g).

m4: massa residual (g).

O teor de carbono fixo foi a última análise a ser realizada, sendo foi obtido por diferença através da equação 4. (ASMT INTERNATIONAL 2021)

$$T_{cf} = 100 - (T_v + T_c) \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

Tcf: teor de carbono fixo;

Tv: teor de voláteis (%)

Tc: teor de cinzas (%).

Para a determinação do poder calorífico, as amostras previamente secas na estufa, cerca de meia grama e levadas a bomba calorimétrica isotérmica IKA-C200, para quantificar o calor a ser liberado pela amostra, ou seja, seu Poder Calorífico Superior (PCS). (ASMT INTERNATIONAL 2013)

Foi obtida a média simples e desvio padrão para quantificar a dispersão dos resultados amostrais para posterior análise e comparação entre outras literaturas. Dados como poder calorífico por hectare, massa seca por hectare, porcentagens disponíveis para ciclagem e aproveitamento teórico foram pressupostos a partir de dados anteriores encontrados cruzados com informações médias de produção.

5. RESULTADOS

Na tabela 1 pode-se observar os resultados de rendimento para os resíduos em campo, total e por frações.

Tabela 1. Rendimento das amostras coletadas em campo

Coletas realizadas em dois diferentes talhões.				
AMOSTRA	QUANTIDADES g/m ²			
	PLANTA	PALHA	SABUGO	GRÃO
Média	501,67	105,00	105,00	776,67
Composição (%)	33,71	7,05	7,05	52,18
Média total t/ha	5,02	1,05	1,05	7,77
Literatura t/ha	7,85*	1,22*	1,44*	6,4**

Referências : (VALE; DANTAS; ZAMBRZYCKI, 2013)* ; (CONAB, 2021)**

As frações de resíduos obtidas nos talhões apresentaram rendimento próximo aos descritos pela literatura para o produto em questão. As amostras de resíduo, fracionadas por tipo apresentam diferentes características químicas, que podem ser observadas na tabela 02. De modo a avaliar o potencial de substituição da madeira como combustível pelos resíduos da lavoura do milho, na tabela 2 pode-se observar a comparação dos resultados obtidos nesta pesquisa com aqueles descritos na literatura científica para os derivados de madeira.

Tabela 2. Médias \pm desvio padrão para os resultados das análises químicas imediatas para os resíduos de milho em comparação com dados de literatura para os resíduos de milho e combustíveis derivados de madeira

Amostra	PLANTA	PALHA		SABUGO		EUCALIPTO
Umidade (%)	5,25 \pm 0,657	10,00 \pm 0,145	10,33*	8,90 \pm 0,01	9,62*	26,28**
Umidade b.s. (%)	5,54 \pm 0,73	11,12 \pm 0,17		9,76 \pm 0,01		
Voláteis (%)	70,24 \pm 2,22	77,12 \pm 2,79	86,33*	79,83 \pm 5,52	87,47*	88,01**
Cinzas (%)	9,79 \pm 0,45	5,13 \pm 1,08	2,3*	2,15 \pm 0,06	2,51*	1,13**
Carbono fixo(%)	19,96 \pm 2,58	17,73 \pm 1,71	11,38*	18,00 \pm 5,56	10,02*	10,86**
PCS (MJ.t ⁻¹)	17552	18010	18667***	18096	18927***	17730**

Referências:*(SALLA, 2008);

** (VISSOTTO *et al.*, 2012);

***(VALE; DANTAS; ZAMBRZYCKI, 2013); (ORELLANA *et al.*, 2020); (ALVES, 2014); (PAULA *et al.*, 2011).

Com base nos dados de umidade e de rendimento, foi possível calcular o rendimento em matéria seca para os resíduos do milho (Figura 7).

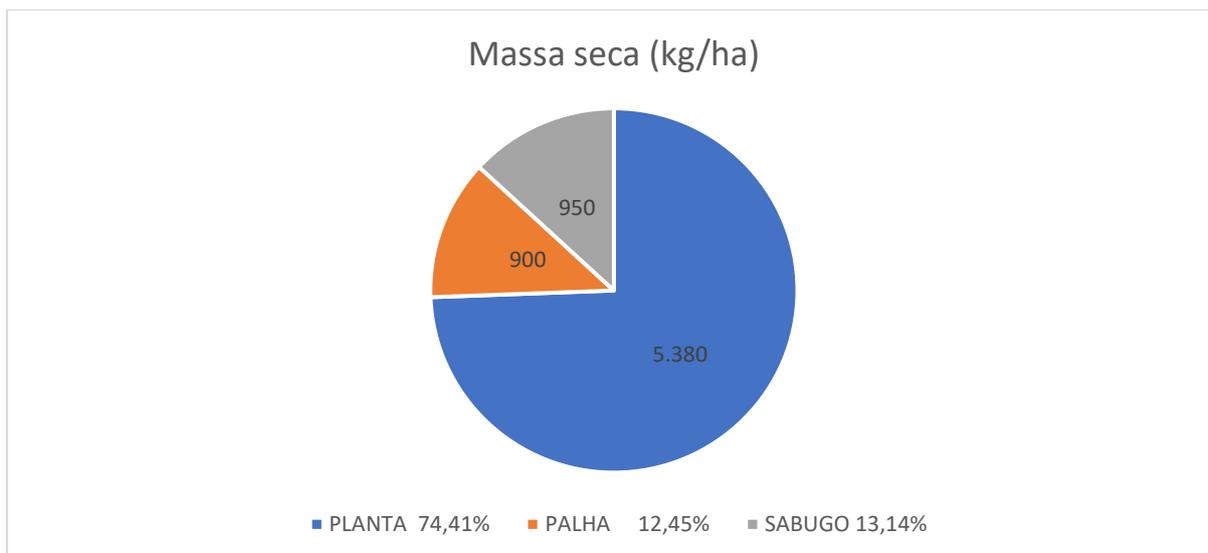


Figura 7. Rendimento em matéria seca para as frações dos resíduos agrícolas de milho.

É possível observar que a planta (colmo e folhas) é a responsável pela maior fração de matéria seca por hectare e a planta e sabugo, juntas respondem por 25,59% de toda a biomassa produzida, enquanto a planta responde pelos 74,41% restante.

O poder calorífico superior para a planta foi de 17552,33 MJ.t⁻¹ para a palha foi de 18010,67 MJ.t⁻¹ e para o sabugo foi de 18096,33 MJ.t⁻¹. Com base nestes dados e no rendimento obtido é possível observar na figura 8 o rendimento energético de cada fração.

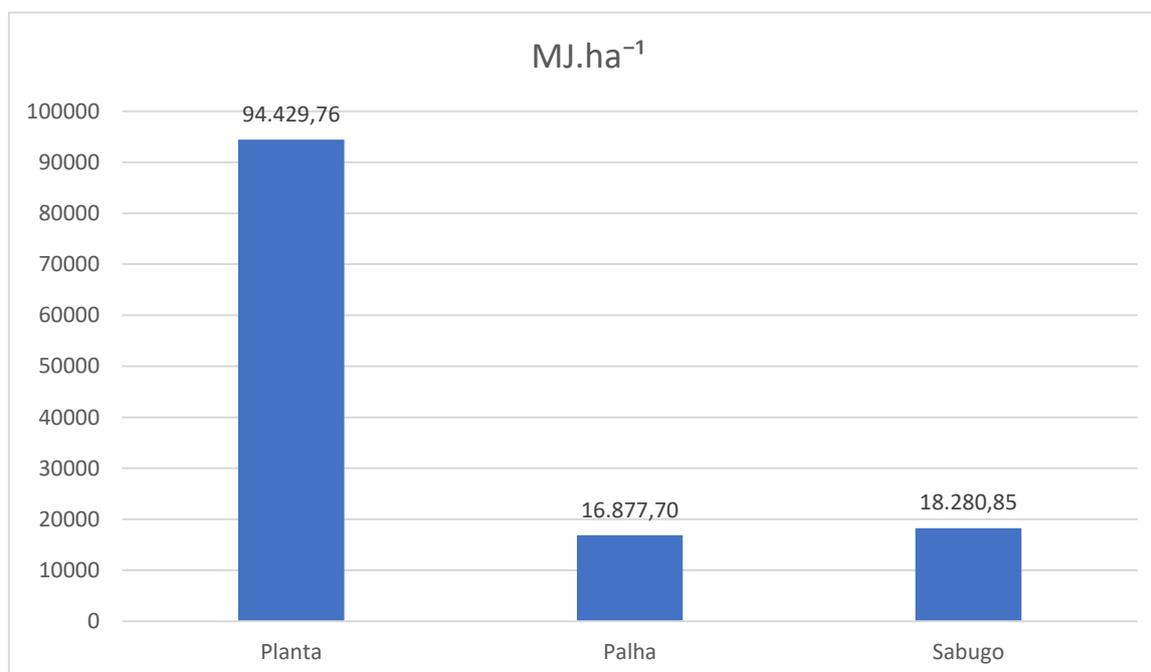


Figura 8 – Rendimento energético (MJ.ha⁻¹) dos resíduos fracionados.

6. DISCUSSÃO

Os rendimentos encontrados em literatura para comparação de $1,22t.ha^{-1}$, $1,44t.ha^{-1}$ e $7,85t.ha^{-1}$ respectivamente para palha, sabugo e planta (VALE; DANTAS; ZAMBRZYCKI, 2013) foram maiores aos encontrados nesse trabalho (tabela 1), isso provavelmente se dá primeiramente tipo do milho cultivado pois no trabalho referido destaca-se um milho de variedade para produção de biomassa e para silagem, no qual são colhidos com máquina ensiladora, também em ponto de colheita que faz se previamente a sua maturação fisiológica para aproveitamento da silagem aonde a umidade está bem alta. Nos dados apresentados (tabela 1) a época de retirada das amostras foi na época de colheita do milho na qual a planta já se encontra praticamente seca, diferente da silagem. Portanto rendimentos menores podem ser já acarretados por queda ou degradação da matéria seca da cultura.

O aproveitamento energético da biomassa é altamente influenciado por suas características químicas. O teor de umidade do combustível influencia na energia efetivamente disponível durante a combustão, já que parte da energia desprendida pelo combustível é utilizada para evaporar a água presente na biomassa. Assim, baixos teores de umidade são desejáveis para um potencial combustível. No caso dos resíduos da lavoura de milho produzido na safrinha na região Centro-oeste, este parâmetro é tradicionalmente baixo, já que a colheita do grão é feita durante a época seca do ano. Teores abaixo de 15% são considerados ótimos para o uso da biomassa (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008). Os valores encontrados neste trabalho corroboram a vantagem da biomassa residual do milho com relação à umidade, apresentando níveis ótimos para o uso deste como combustível em equipamentos como fornalhas e caldeiras.

O teor de materiais voláteis representa a porção da biomassa que evapora com o aquecimento (excluindo a umidade). Ele influencia positivamente na ignição do combustível, já que quanto maior o teor de voláteis maior será a reatividade dele no processo de combustão (MCKENDRY, 2002). Desta forma, altos teores de materiais voláteis é desejável para um combustível alternativo. Os resultados encontrados neste trabalho demonstram que o sabugo é a fração com maior reatividade no processo de ignição, maior inclusive do que os combustíveis derivados de madeira. O baixo teor de materiais voláteis na fração planta, corroboram a decisão de manutenção desta fração no campo como elemento de preservação do solo.

O teor de carbono fixo representa a massa restante do combustível depois da liberação dos materiais voláteis, excluindo-se ainda o teor de cinzas (MCKENDRY, 2002). Sendo este parâmetro obtido por diferença, ele indica a fração da biomassa de liberação lenta durante a conversão térmica pela combustão. Os valores obtidos neste trabalho indicam que a biomassa residual do milho apresenta para a palha e planta valores próximos aos derivados de madeira, contudo o sabugo apresenta valor muito inferior, indicando uma combustão mais rápida do que as outras frações.

O material residual da combustão, quer seja da fração orgânica e da inorgânica, representam o teor de cinzas. Elas resultam da combustão completa e podem se originar de elementos minerais já presentes no combustível; de argila, areia e sais que possam estar presentes na biomassa, como

aquele aderido durante a colheita ou manuseio. São constituídas essencialmente por silício (Si), potássio (K), sódio (Na), enxofre (S), cálcio (Ca), fósforo (P), magnésio (Mg) e ferro (Fe) (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008). Baixos teores de cinzas são desejáveis no processo de combustão, já que reduzem a necessidade de manutenção dos equipamentos e facilitam a operação. Os resultados obtidos neste trabalho mostram que o sabugo e a palha são muito promissores para o uso em caldeiras ou fornalhas em substituição aos derivados de madeira.

Considerando-se o aproveitamento apenas da palha e do sabugo do milho para fornecimento de calor em caldeiras, é importante que a energia disponível seja elevada o que é determinado pela conexão entre o poder calorífico e o rendimento. Considerando-se os dados obtidos neste trabalho, a palha e o sabugo apresentam-se bastante competitivos quando comparados com as demais biomassas utilizadas atualmente na geração de calor. Os referidos resíduos apresentam por safra um potencial energético de aproximadamente de 35000 MJ por hectare, mantendo-se no campo cerca de 70% da matéria seca com o caule e folhas, para ciclagem de nutrientes e cobertura de solo que é importante na região para evitar desagregação por impacto direto das gotas de chuva com o solo, aumentar teor de matéria orgânica no solo, manter estrutura e estabilidade do solo, retenção de água dentre outros. O *Eucaliptus* por sua vez com quatro anos quando normalmente inicia seu corte fornece cerca de 3,4 milhões de MJ por hectare (CIARAMELLO, 2018).

Em termos industriais, o consumo energético para processar 1 ha de milho para a produção de etanol é de 23.294 MJ(SALLA *et al.*, 2010), portanto se tratando de um área destinada para processamento em etanol será necessário o uso de 60% do resíduo (palha e sabugo) dessa área para suprimento energético industrial considerando as etapas de Desintegração/moagem; Hidrólise/sacarificação/Tratamento do caldo; Fermentação; Destilação e Manutenção industrial. Em uma relação de quatro safras de milho para uma de *Eucaliptus*, seria necessário em torno de 3% da biomassa do hectare do *Eucaliptus* para processar o milho equivalente produzido por um hectare em safras na região norte do Mato Grosso.

7. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos é possível concluir que os resíduos agrícolas da lavoura do milho possuem rendimento, características químicas e energéticas que o habilitam como biomassa alternativa ao cavaco de eucalipto como combustível nas indústrias de etanol de milho.

A palha e o sabugo devem ser considerados para a complementação proposta, já que sua retirada não representa a quantidade total dos resíduos portanto possui impacto limitado na ciclagem de nutrientes e na conservação do solo.

É necessária uma análise de viabilidade econômica quanto à logística de retirada dos referidos resíduos da lavoura, comparando-se a estrutura atualmente empregada na colheita, beneficiamento e transporte do cavaco de eucalipto.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF, Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Anuário estatístico abraf 2013. p. 142, 2013. Disponível em: <www.abraflor.org.br>.

ALVES, Darline Albuquerque de Holanda. Avaliação do potencial energético de resíduos de produção agrícola provenientes do beneficiamento da mandioca e do milho. p. 80, 2014. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/riufal/1193>>.

ANDRADE, R.V. *et al.* Efeito da forma e do tamanho da sementes no desempenho no campo de dois genótipos de milho. *Revista Brasileira de Sementes*. [S.l.: s.n.], 1997

BASTOS, Valéria Delgado. *Etanol, álcoolquímica e biorrefinarias*. MDIC, Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comércio Exterior. [S.l.: s.n.], 2015

BRITO, J O; BARRICHELO, L E G. Usos Diretos e Propriedades Da Madeira Para Geração De Energia. *CIRCULAR TÉCNICA No 52*, n. 1, p. 7, 1979. Disponível em: <<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/3681/ipef-circular-tecnica-1979-julho-n-52.pdf?sequence=1>>.

CIARAMELLO, Sandro. *Potencial energético e econômico de cinco biomassas*. 2018. universidade do sagrado coração, 2018. Disponível em: <<https://tede2.unisagrado.edu.br:8443/handle/tede/390>>.

CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira. *Boletim da Safra 2021*, 2021. , v. 8, n. Terceiro levantamento, p. 59 Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/>>.

COSME, Raimundo *et al.* Quantificação de restos culturais e concentração de nutrientes na cultura do milho no Município de Belterra/PA. *Cep*, n. 1, p. 1–5, 2015. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/116927/1/v14n1p60.pdf>>.

DONKE, A C G. MARSUURA, M I S F. KULAY, L. MATAI, P H L S. Avaliação do desempenho ambiental do etanol de milho para o Brasil. p. 487–492, 2014. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1007477/1/2014AA57.pdf>>.

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Relatório Síntese. BEN 2019 Ano Base 2018*. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relatório Síntese BEN 2019 Ano Base 2018.pdf>>.

FERREIRA-LEITAO, Viridiana *et al.* Resíduos de biomassa no Brasil: disponibilidade e usos potenciais. *Valorização de Resíduos e Biomassa*, v. 1, n. 1, p. 65–76, 2010.

GOLDEMBERG, José. A indústria brasileira de biocombustíveis. *Biotecnologia para biocombustíveis*, v. 1, p. 1–7, 2008.

IBGE. Indicadores IBGE - Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (Janeiro/2019). p. 85, 2019. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=72415>>.

IBGE. Indicadores IBGE - Levantamento Sistemático da Produção Agrícola, Estatística da Produção Agrícola. *Ibge*, p. 148, 2022. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=72415>>.

IBGE. Produção da Extração Vegetal e Silvicultura 2020. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mt/pesquisa/16/0>

MACEDO, Isaias C. *Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil : situação atual , oportunidades e desenvolvimento* Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Disponível em: <https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/estudo_biomassa_1012.pdf/21e2f32d-d3a3-474b-b505-e9cb11d8cf78?version=1.0>. Acesso em: 13 dez. 2019.

Norma ASTM D1762-84R21, "Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal" (Método de teste padrão para análise química de carvão vegetal de madeira), ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, 2021, DOI: 10.1520/D1762-84R21, www.astm.org.

Norma ASTM D5865-13, " Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke" (Método de teste padrão para valor calórico bruto de carvão e coque), ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, 2013, DOI: 10.1520/D5865-13, www.astm.org.

ORELLANA, BRUNA BARBARA MACIEL AMORAS *et al.* Caracterização de resíduos agroindustriais da região do distrito federal para fins energéticos. *energia na agricultura*, v. 35, n. 1, p. 46–61, 20 mar. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2020v35n1p46-61>>.

PAULA, Luana Elis de Ramos *et al.* Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. *Cerne*, v. 497, n. May, p. 1–5, 2011.

RENDEIRO, Gonçalo *et al.* *Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida*. [S.l.: s.n.], 2008.

SALLA, Diones Assis. *Análise energética de sistemas de produção de etanol de mandioca, cana-de-açúcar e milho*. 2008. 1–185 f. 2008.

SALLA, Diones Assis *et al.* Energetic study of ethanol production from the corn crops. *Ciencia Rural*, v. 40, n. 9, p. 2017–2022, 2010.

VALE, Ailton Teixeira Do; DANTAS, Vandui Francisco de Siqueira; ZAMBRZYCKI, Geraldo Cesar. POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS DA CULTURA DO MILHO (*Zea mays*). *Evidência - Ciência e Biotecnologia*, v. 13, n. 2, p. 153–154, 2013. Disponível em: <<http://editora.unoesc.edu.br/index.php/evidencia/article/view/4075>>.

VIEIRA, Ana Carla *et al.* Caracterização Da Casca De Arroz Para Geração De Energia. *Varia Scientia Agrárias*, v. 3, n. 1, p. 51–57, 2013.

VISSOTTO, João Paulo *et al.* Caracterização de Pinus , Eucaliptus , Casca de Eucaliptus e Resíduos Florestais e de Destoca para fins energéticos. *VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, p. 10, 2012. Disponível em: <www.abcm.org.br/conem2012>.