

## **MAXIMIZAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA CANA DE AÇÚCAR PELO BENEFICIAMENTO DA PALHA**

NILBERTO MACHADO DE SÁ<sup>1\*</sup>; FABIO SOEIRO<sup>2</sup>; GILBERTO FRANCISCO MARTHA<sup>3</sup>; CARINA ULSEN<sup>4</sup>;

<sup>1</sup>Eng. Pesquisador / Escola Politécnica – Universidade de São Paulo – USP/SP, nilberto.machado@usp.br;

<sup>2</sup>Eng. Pesquisador / Escola Politécnica – Universidade de São Paulo – USP/SP, fabio.soeiro@usp.br;

<sup>3</sup> Prof. Dr. Dep. Eng. Mecânica Escola Politécnica – Universidade de São Paulo – USP/SP, gfmsouza@usp.br;

<sup>4</sup>Profª. Dra. Dep. de Eng. De Minas e de Petróleo Universidade de São Paulo – USP/SP, carina.ulsen@usp.br

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2018  
21 a 24 de agosto de 2018 – Maceió-AL, Brasil

**RESUMO:** Este trabalho compara a eficácia de técnicas de processamento da palha de cana-de-açúcar, baseadas em processos físicos que visam a remoção do material inorgânico desta biomassa. Durante o cultivo da cana-de-açúcar, a palha é contaminada por partículas de solo que dificultam sua utilização para produção de energia elétrica ou de etanol de segunda geração (E2G). A produção de energia elétrica, por meio da queima da palha, quando contaminada com resíduos inorgânicos, prejudica as partes internas dos equipamentos, com o material inorgânico aderindo às superfícies e diminuindo a troca térmica. Já a produção de etanol de segunda geração (E2G) tem seu rendimento comprometido, com o material inorgânico atuando como barreira física entre a matéria orgânica e as enzimas responsáveis por sua fermentação. Inicialmente, é apresentado o panorama da utilização de biomassa no Brasil e no mundo, seguido pela análise da utilização da biomassa de cana-de-açúcar, com ênfase na palha, antes tratada como rejeito, mas agora visto como uma valiosa matéria orgânica de alto potencial energético.

**PALAVRAS-CHAVE:** palha de cana-de-açúcar, biomassa, processos de separação

## **MAXIMIZATION OF THE ENERGETIC POTENTIAL OF THE SUGAR CANE BY PROCESSING OF THE STRAW**

**ABSTRACT:** This work compares the efficacy of sugarcane straw processing techniques, based on physical processes aimed to remove the inorganic material from this biomass. During the growth of sugarcane, his straw is contaminated by soil particles that make difficult his use for electricity generation or second-generation ethanol (E2G). The production of electric energy, through the burning of straw, who is contaminated with inorganic waste, damages the internal parts of the equipment, with the inorganic material adhering to the surfaces and reducing the thermal exchange. The production of second generation ethanol (E2G) has its yield compromised, with the inorganic material acting as a physical barrier between the biomass and the enzymes responsible for its fermentation. Initially, the scenario of the use of biomass in Brazil and in the world is presented, followed by the analysis of uses of the biomass of sugarcane, with an emphasis on straw, previously treated as residue, but now seen as a valuable high potential energy organic matter.

**KEYWORDS:** sugarcane straw, biomass, separation processes.

## **INTRODUÇÃO**

O papel de biomassa, como fonte de energia, vem aumentando ao longo dos anos como alternativa às fontes fósseis (EPE, 2017, p. 184), substituindo-as com vantagens ambientais e econômicas. A fixação de carbono no solo, em seu ciclo completo, traz menor impacto ao meio ambiente, enquanto a inovação tecnológica reduz seu custo.

De outro lado, o custo da extração de fontes fósseis, mesmo como uso de novas tecnologias, vem gradualmente aumentando em função da complexidade dos novos reservatórios.

Este trabalho contribui para o melhor aproveitamento da cana-de-açúcar, por meio da investigação da efetividade de processos de separação mecânicos, de partículas inorgânicas da palha desta biomassa

A energia armazenada na palha corresponde à 30% do total de energia total armazenada na biomassa de cana-de-açúcar (Augusto et al., 2010; Linero, 2015). Entretanto, o beneficiamento desta biomassa é um gargalo tecnológico para seu aproveitamento energético (Badiei et al., 2014).

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 2016, as atividades humanas consumiram cerca de  $13 \times 10^9$  de toneladas equivalentes de petróleo (tep). O consumo de biomassa no mundo foi de aproximadamente  $1,3 \times 10^9$  tep ou 10% do consumo mundial de energia primária das quais 70% usados na forma de biomassa.

O total de cana-de-açúcar colhida no ano de 2017 foi de 651,8 milhões de toneladas de cana, com uma área cultivada total de aproximadamente 10,9 milhões hectares, e colhida de 9,7 milhões de hectares (UNICA, 2017).

A utilização da palha, com fins energéticos, vem se intensificando dado seu potencial energético. Um hectare de plantação de cana-de-açúcar produz cerca de 18,2 ton. de palha com poder calorífico Inferior (PCI) da ordem de 13.000 kJ/kg, o que equivale a 29 barris de petróleo ou 9.600 litros de etanol (Paoliello, 2006).

As grandezas físicas utilizadas nas análises do presente estudo para caracterização da amostra ou controle de processo, estão abaixo descritas.

Umidade – porcentagem em massa de água presente na amostra; determinada pela diferença em massa da amostra na condição inicial e da amostra após secagem em estufa a 60°C por 24h ou até que a massa não apresente mais variação (massa constante), dividida pela massa inicial.

Teor de cinzas – porcentagem em massa de material residual após a calcinação da amostra a 550°C por duas horas, em relação à massa inicial da amostra seca. Assume-se aqui que a perda em massa na calcinação refere-se majoritariamente ao material orgânico e o resíduo corresponde ao material inorgânico (cinzas).

Distribuição – conceito que representa a proporção do elemento analisado ou do teor de cinzas em cada parcela da amostra; definido matematicamente por: (% em massa no produto x teor no produto) / (teor médio na amostra).

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para os estudos de separabilidade, uma amostra com cerca de 100 kg de palha foi cedida por uma usina de processamento no Estado de São Paulo, sendo inicialmente homogeneizada em uma pilha horizontal alongada e amostrada para retirada de alíquotas menores e representativas para os ensaios laboratoriais.

A amostra foi obtida após peneiramento da palha remanescente no campo, tratando-se da fração passante a peneira, considerada rejeito do processo, com teor médio de 48,5% de cinzas.

A atividade experimental deste trabalho é a comparação da eficácia da separação entre as fases que compõe a amostra, ou seja, a palha (material orgânico) e o solo (material inorgânico), por meio de ensaios em escala laboratorial.

Os estudos de separabilidade realizados são apresentados na Tabela 1 e descritos na sequência.

Tabela 1 – Métodos de separação

Meio de separação	Método de Separação
A seco	Peneiramento (com ultrassom)
	Peneiramento
A úmido	Jato de água de alta pressão + peneiramento
	Atrição

### Métodos de separação a seco

Peneiramento – a amostra foi peneirada em intervalos granulométricos estreitos para avaliação da proporção de material inorgânico em cada fração. O peneiramento foi realizado em peneirador automático, modelo EML da Haver & Boecker, com utilização do sistema de ultrassom na tela das peneiras.

### Métodos de separação a úmido

Peneiramento – A amostra foi peneirada em intervalos granulométricos estreitos para avaliação da proporção de material inorgânico em cada fração; para testar maior eficiência na separação do material inorgânico aderido à superfície da palha, o peneiramento foi realizado com utilização de água (peneiramento a úmido) sobre as telas das peneiras; as demais condições operacionais foram idênticas a do peneiramento a seco.

Atrição – experimentos foram conduzidos inicialmente para avaliar a eficiência do atricionamento da superfície da palha impregnada com solo para separação entre ambos. Os ensaios foram realizados em uma célula de atrição, com concentração de sólidos de 5% e 20%, rotação de 1.200 e 1.700 rpm e tempo de atrição de um a dez minutos; foi também avaliado o uso de dispersante na solução – hexametáfosfato de sódio em concentração de 80 g/l.

Lavagem com jato de água de alta pressão – a amostra de palha foi submetida à um sistema de lavagem por jato de água para limpeza das superfícies expostas; o experimento foi conduzido em equipamento Hydroclean da Haver & Boecker, com pressões de água de 45, 95 e 150 bar (pressão máxima) durante 60 segundos (tempo máximo do ciclo de lavagem).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

O peneiramento a seco com ultrassom Tabela 2, apresentou melhor resultado para frações maiores que 1 mm, com o menor teor de cinzas identificado, de 33,5%. Entretanto, a distribuição da amostra, para esta fração, é de 1,3% de cinzas, o que significa uma distribuição de orgânicos de 98,7%, o que seria um excelente resultado se não fosse a pouca quantidade de massa retida, denotando a baixa eficácia do processo.

O experimento com ultrassom identifica uma possível rota tecnológica para o beneficiamento da palha da cana-de-açúcar, devendo-se, entretanto, identificar os parâmetros de potência, frequência, e a utilização de um meio de transporte para as ondas sonoras, podendo ser utilizado água ou outro fluído.

O peneiramento a úmido, apresenta resultados que indicam que a fração com dimensões maiores ou iguais à 1 mm são as que apresentam a menor teor de cinzas. Entretanto, a distribuição, para este caso é de apenas 0,9% de cinzas, o que inviabiliza uma rota tecnológica nesta direção.

Ambos os casos indicam que, frações de dimensões maiores apresentam melhor desempenho, sugerindo que ensaios futuros sejam precedidos por uma separação por peneiramento da amostra descartando frações menores.

Tabela 2 - Teor e distribuição de cinzas por fração granulométrica

Fração mm	Peneiramento a seco com ultrassom				Peneiramento a úmido			
	% Massa		Cinzas (%)		% Massa		Cinzas (%)	
	retida	acum.	Teor	dist.	retida	acum.	teor	dist.
+1,00	1,9	1,9	33,5	1,3	6,2	6,2	6,8	0,9
1,00-0,30	51,5	53,4	39,9	42,4	31,5	37,6	15,8	10,3
0,30-0,15	23,2	76,7	51,0	24,4	7,7	45,3	30,4	4,8
0,15-0,074	13,3	90,0	63,3	17,4	12,0	57,3	59,6	14,7
-0,074	10,0	100,0	70,2	14,4	42,7	100,0	78,8	69,4
Total	100,0		48,5		100,0		48,5	100,0

A Tabela 3 apresenta os resultados do ensaio de atrição, em duas velocidades de rotação, ambas com 5% de polpa, o melhor resultado, quanto ao teor de cinzas, novamente se refere à frações maiores que 1 mm, com baixos resultados quanto à distribuição, sugerindo que uma separação prévia da amostra pode melhorar o resultado. Verifica-se que a alteração de velocidade de rotação, de 1200 rpm para 1700

rpm, não influenciou significativamente o resultado, passando de um teor de 8,7% para 8,1%, ao passo que a distribuição passou de 3,7% para 3,3%.

Tabela 3 - Teor e distribuição de cinzas por fração granulométrica após atrição

Fração mm	5% em polpa, 1200 rpm, 10 min				5% em polpa, 1700 rpm, 10 min			
	% massa		cinzas (%)		% massa		cinzas (%)	
	retida	acum.	teor	dist.	retida	acum.	teor	dist.
+1,18	19,0	19,0	8,7	3,7	18,9	18,9	8,1	3,3
1,18-0,85	1,2	20,2	20,6	0,5	7,8	26,7	11,6	2,0
0,85-0,42	13,9	34,1	19,7	6,2	8,8	35,5	39,1	7,5
0,42-0,15	22,6	56,7	32,2	16,5	27,0	62,5	42,2	24,7
0,15-0,074	10,4	67,1	60,8	14,4	13,1	75,6	68,7	19,5
0,074-0,044	4,1	71,3	65,6	6,1	6,2	81,8	77,6	10,5
-0,044	28,7	100,0	80,6	52,5	18,2	100,0	82,9	32,6
Total	100		44,1	100	100		46,2	100

A Tabela 4 traz os resultados do ensaio de atrição, com a utilização de dispersante, em duas concentrações de polpa, à mesma velocidade de rotação. O emprego de dispersante não contribuiu para a separação, quando se comparou com os resultados da Tabela 3, aumentando a separação para de 8,7% para 9,7%, ou seja, o teor de orgânico diminuiu, com a distribuição passando de 3,7% para 4,7%, comparando-se os resultados para 5% em polpa.

O aumento da polpa, de 5% para 20% apresentou resultados pouco significativos no teor, mas melhorou a distribuição de 4,5% para 5,7%, ao passo em que diminuiu o teor de 9,7% para 9%, sendo um indicativo que aumentar poupa pode melhorar discretamente o desempenho do processo.

Como também ocorre nos outros experimentos, o melhor resultado em termos de separação, se dá nas frações de maior dimensão.

Tabela 4 - Teor e distribuição de cinzas por fração granulométrica após atrição com uso de dispersante

Fração mm	5% em polpa, 1200 rpm, 5 min, 80 g/l				20% em polpa, 1200 rpm, 5 min, 80 g/l			
	% massa		cinzas (%)		% massa		cinzas (%)	
	retida	acum.	teor	dist.	retida	acum.	teor	dist.
+0,85	20,8	20,8	9,7	4,7	24,1	24,1	9,0	5,7
0,85-0,15	39,9	60,6	30,1	27,8	41,0	65,1	28,5	30,6
-0,15	39,4	100,0	73,9	67,5	34,9	100,0	69,7	63,7
Total	100		43,1	100	100		38,2	100

A Tabela 5 mostra os resultados obtidos com a lavagem com jato de água. Foi o experimento com melhor resultado, apresentando 11,7% em teor, 4,2% em distribuição. O aumento de pressão, por outro lado, não produziu resultados mais promissores, ao contrário, diminuindo sua distribuição para 3,1%.

Tabela 5 - Teor e distribuição de cinzas por fração granulométrica após lavagem com jato de água de alta pressão

Fração mm	45 bar, 60 seg.				150 bar, 60 seg.			
	% massa		cinzas (%)		% massa		cinzas (%)	
	retida	acum.	teor	dist.	retida	acum.	teor	dist.
Retido	17,4	17,4	11,7	4,2	12,7	12,7	11,7	3,1
0,85	6,1	23,5	17,4	2,2	11,9	24,6	13,7	3,3
0,15	35,9	59,3	42,2	31,0	32,3	56,9	40,0	26,6
Passante	40,7	100,0	75,1	62,6	43,1	100,0	75,4	67,0
Total	100		48,8	100	100		48,6	100

## CONCLUSÕES

Os resultados indicam que a separação física em escala laboratorial, o processo mais eficaz foi o peneiramento a úmido com ultrassom, atingindo 6,8% de cinzas, ou 93,2% de biomassa, na fração

retida +1mm (Tabela 2). Dadas as características da amostra, esta fração apresenta 0,9% de distribuição, o que indica que o processo de separação é mais eficiente em frações maiores.

Neste caso, como a amostra inicial foi caracterizada como 48,8% de cinzas, ou 51,2% de matéria orgânica, temos uma eficácia de 82,03% no processo.

A separação se dá somente após a liberação das fases (inorgânico/orgânico) e pudermos verificar que as fases estão fortemente aderidas, dificultando a sua liberação

Novos estudos podem ser realizados, partindo de amostras obtidas logo após o processo de colheita, impedindo que sejam desidratadas e impregnadas com solo.

A alteração do processo de colheita, transportando tanto a palha como o colmo da cana-de-açúcar pode ser uma alternativa para a obtenção de uma palha com menor teor de inorgânicos, mas representa um custo adicional de transporte dado a menor densidade da palha em relação ao colmo.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica de São Paulo.

## **REFERÊNCIAS**

- Augusto, Luis; Cortez, B.; Lima, Manoel Regis; Leal, Verde. Uso da palha da cana vs emissões de GEE. In: Oficina de Trabalho Sustentabilidade do Bioetanol 2010, Anais... [s.l: s.n.] Disponível em: <[http://www.cgee.org.br/arquivos/pdf/of\\_bioetanol/Usado\\_palha\\_da\\_cana\\_vs\\_emissoes\\_de\\_GEE\\_CGEE\\_02\\_2010\\_Final\\_1.pdf](http://www.cgee.org.br/arquivos/pdf/of_bioetanol/Usado_palha_da_cana_vs_emissoes_de_GEE_CGEE_02_2010_Final_1.pdf)>. Acesso em: 7 de janeiro de 2018
- Badiei, Marzieh; Asim, Nilofar; Jahim, Jamilah M.; Sopian, Kamaruzzaman. Comparison of chemical pretreatment methods for cellulosic biomass. APCBEE Procedia, [s. l.], v. 9, n. Ictee 2013, p. 170–174, 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212670814000311>>
- EPE. Balanço energético nacional. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2017. Disponível em: <[www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br)>
- Linero, Francisco. Aproveitamento da palha da cana-de-açúcar: Planta CTC – Palha Flex. Ribeirão Preto: 16º Seminário Brasileiro Agroindustrial. 2015. Disponível em: <[http://www.stab.org.br/16sba/palestras/francisco\\_linero.pdf](http://www.stab.org.br/16sba/palestras/francisco_linero.pdf)>. Acesso em: 23 de janeiro de 2017.
- Paoliello, José Maria Morandini. Aspectos ambientais e potencial energético no aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira. 2006. Universidade Estadual Paulista, Bauru - SP, [s. l.], 2006. Disponível em: <[http://www.udop.com.br/ebiblio/pagina/arquivos/tese\\_mestrado\\_jose\\_maria.pdf](http://www.udop.com.br/ebiblio/pagina/arquivos/tese_mestrado_jose_maria.pdf)>. Acesso em: 18 de janeiro de 2017
- UNICA. Área Cultivada Com Cana-De-Açúcar: Total Por Estado. 2017. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-area-ibge.php?idMn=33&tipoHistorico=5>>. Acesso em: 23 de janeiro de 2017.