



ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DO BAGAÇO DA MANDIOCA HIDROLISADO

ALYSON FELIPE DE MEDEIROS DA SILVA; DILCEMARA CRISTINA ZENATTI;
ELIZA TERREZ CAMARGO

RESUMO

A mandioca, *Manihot esculenta* Crantz originária, tem sua origem na América do Sul e é um dos principais alimentos energéticos, especialmente nos países em desenvolvimento, em meio ao seu processamento resíduos são gerados, os quais podem ser extremamente prejudiciais ao ambiente. O bagaço de mandioca é um resíduo do processo de fabricação do polvilho, que contém uma notória taxa de amido (65% a 75%), além de possuir fibras de boa qualidade e ser farto de materiais lignocelulósicos. No Brasil, o balanço de bagaço produzido nas fecularias é de 928,6kg por tonelada de raiz de mandioca processada, tendo um grande percentual de umidade (cerca de 85%). Graças as suas propriedades e importância econômica, o bagaço apresenta grande relevância nas tecnologias renováveis, sendo assim, um desperdício de matéria-prima quando descartado. Uma forma de agregar valor a esse resíduo é com a utilização do bagaço em biodigestores, porém as grandes moléculas dificultam a degradação pelos microrganismos, sendo necessário a pré-hidrólise, em que as moléculas complexas são convertidas em simples compostos, agilizando o processo de biodigestão anaeróbia. Este trabalho tem como objetivo estimar o volume de metano produzido a partir de hidrolisado do bagaço de mandioca pela combinação da concentração de ácido, temperatura e tempo de exposição térmica dos ensaios. Para a hidrólise utilizou-se ácido sulfúrico a 0,92 g/L por 45 minutos em 140°C. Para a destoxificação tratou com a adição de 1g de carbonato de cálcio (CaCO_3) e 5 ml de NaOH sob agitação constante até pH 6, em seguida incluiu 1g de carvão ativado. Quatro reatores foram montados, cada um obteve uma fração de inóculo, hidrolisado e manipueira. Em todos ensaios continha 10% de inóculo mudando apenas as quantidades de hidrolisado e manipueira. No ensaio um havia 90% de manipueira, no ensaio 2, 30% de hidrolisado e 60% de manipueira, no ensaio 3 havia 23% de hidrolisado e 67% de manipueira e no ensaio 4, 45% de hidrolisado e manipueira. Os resultados indicaram que a melhor proporção na geração de biogás foi de 10% de inóculo, 23% de hidrolisado e 67% de manipueira, com 89,15 $\text{CH}_4/\text{g SV}$ removido e 3,46 CH_4/mg açúcar redutor removido.

Palavras-chave: *Manihot esculenta* Crantz; bagaço; biogás; hidrólise; manipueira.

1 INTRODUÇÃO

Para a formação de atividades sustentáveis em países desenvolvidos e em desenvolvimento é inevitável o avanço de tecnologias que utilizem fontes renováveis de energia (COLDEBELLA et al., 2006).

De modo geral, o processamento agroindustrial tem gerado resíduos que podem causar grandes impactos ambientais. Em vista a esse fato, as indústrias responsáveis por esses resíduos procuram torná-los subprodutos, agregando valor e reduzindo o impacto ambiental. Além disso, após a crise do petróleo, viu-se a necessidade de revisar o modelo energético industrial, que juntamente com as ameaças ambientais constituem as principais problemáticas dos últimos anos (JASKO et al., 2011, p.428; CAMACHO E CABELLO, 2012)

A biomassa é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética, tendo um grande potencial para a produção de energia e destacando-se entre as principais fontes energéticas. Desse modo, a utilização da biomassa confronta diretamente a dependência dos combustíveis fósseis (NETO et al., 2010).

A mandioca, *Manihot esculenta* Crantz originária, tem sua origem na América do Sul e é um dos principais alimentos energéticos, especialmente nos países em desenvolvimento (EMBRAPA). No Brasil, segundo os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2016 a produção de raiz de mandioca alcançou a marca de 23,71 milhões de toneladas.

As raízes da mandioca são submetidas a diversos tipos de processamentos no Brasil, sendo os principais a fabricação de farinha de mandioca e a extração de fécula ou goma. Apesar das unidades fabris responsáveis pelo tratamento industrial da mandioca serem de pequena escala, tais como cascas de farinhas e polvilheiras, as mesmas podem gerar grandes quantidades de resíduos, tanto sólidos quanto líquidos, que provocam sérios problemas ambientais (FIORDA et al., 2013).

Estudos mostram que o processamento de cerca de uma tonelada de raízes de mandioca feitas em uma fecularia, possui o mesmo impacto ambiental que 200 a 300 habitantes proporcionam em um dia. Em casas de farinhas, a mesma quantidade de raízes gera um impacto idêntico a de 150-250 habitantes por dia. (FIORETTO et al. 2001).

O bagaço de mandioca, ou farelo, constitui-se em um resíduo originado nas fecularias, mais precisamente no processo de separação da fécula. É envolvido por um material fibroso, contendo alto teor de amido e rico em materiais lignocelulósicos. Graças as suas propriedades e importância econômica, o bagaço apresenta grande relevância nas tecnologias renováveis, sendo assim, um desperdício de matéria-prima quando descartado (LIMA, 2006; EMBRAPA RONDÔNIA, 2005; JASKO et al., 2011, p. 428).

Uma forma de agregar valor a esse resíduo é a utilização do bagaço em biodigestores, onde os microrganismos degradarão a matéria na ausência de oxigênio (biodigestão anaeróbia) e libertará compostos de interesse. Entretanto, o teor de fibras contido no bagaço torna o processo lento devido à forte associação entre a celulose, hemicelulose e lignina, componentes da lignocelulose, que dificulta a utilização direta desse material como matéria-prima. Nesse caso emprega-se a pré-hidrólise, tratamento físico e/ou químico que trabalha nas ligações das moléculas convertendo-as em compostos mais simples, como açúcares, facilitando a degradação pelos microrganismos durante o processo de biodigestão, aumentando o rendimento da produção de biogás. Desse modo, esse processo se mostra capaz de gerar energia para a indústria, reduzindo os impactos ao meio ambiente (ZENATTI et al., 2015, p. 618).

2 MATERIAL E MÉTODOS

Coleta e armazenagem

O bagaço de mandioca utilizado para realização do experimento foi coletado em uma amidonaria localizada na cidade de Terra Roxa – PR, na PR 364, km 2,9 na latitude -24°11'52.95" e longitude -53°59'13.59". Esta amidonaria processa e modifica o amido para que o mesmo seja usado como suplemento na indústria de papel e celulose.

A coleta do resíduo foi realizada durante o horário de processamento da matéria-prima, em horário de funcionamento dos equipamentos, para que não houvesse alteração na rotina de produção da indústria. A amostragem foi feita durante um dia, em intervalos de hora em hora, a fim de se obter uma amostra homogênea e composta dos resíduos numa quantidade substancial para ser utilizada durante todo o experimento. O bagaço foi coletado após o processo de extração e peneiração, em que sua composição é altamente fibrosa.

Após a coleta, o resíduo foi conduzido ao Laboratório de Química Analítica e Análises

Ambientais da Universidade Federal do Paraná, setor Palotina, onde foi subdividido em porções de aproximadamente 2 Kg (bagaço), em potes de polietileno e armazenado no congelador a temperatura de -18°C até o momento da realização do experimento.

Pré-tratamento das amostras

Secou-se o bagaço na estufa com circulação forçada de ar por 72 horas, em uma temperatura de 60oC. Logo após o bagaço foi triturado em moinho de facas tipo Willye modelo STAR FT 49.

Foram realizadas análises para caracterização do bagaço e da manipueira seguindo os métodos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Protocolos de parâmetros utilizados na caracterização dos resíduos de processamento da Mandioca.

Parâmetros	Unidade	Método Protocolo APHA (1995)	
pH		Potenciométrico	4500-H ⁺ - B
Sólidos Totais (ST)	g.L ⁻¹	Gravimétrico	2540-B
Sólidos Fixos (SF)	g.L ⁻¹	Gravimétrico	2540-B
Sólidos Voláteis (SV)	g.L ⁻¹	Gravimétrico	2540-E
Nitrogênio amoniacal	mgN L ⁻¹	Volumétrico	4500-NORG-B
Demanda Química Oxigênio (DQO)	demgO2L ⁻¹	Colorimétrico	5220 – D
Açúcares redutores	mg L ⁻¹	Somogyi-Nelson	5120 –A

Fonte: Adaptado do Standart Methods for Examination of Water and Wastewater (1995)

Hidrólise ácida do bagaço

Para a hidrólise ácida do bagaço adicionou-se em frascos de PE (polietileno) bagaço de mandioca e solução 0,1mol/L de ácido sulfúrico, em razão de 5:50 (m/v), com as tampas em meia rosca foram levados para a autoclave sobre temperatura constate de 121°C por 40 minutos, após este período filtrou-se o material obtendo-se duas fases, o resíduo sólido do bagaço e o líquido (hidrolisado).

O material hidrolisado foi submetido a análise de açúcares redutores totais com base no protocolo da Embrapa (2013), método de Somogy e Nelson. A partir deste resultado estimou-se a produção de metano.

Hidrólise e destoxificação do bagaço

Em um frasco de vidro de 500 mL inseriu-se 10g de massa seca do bagaço e 200 mL da solução ácido sulfúrico a 0.92g/L para o tratamento hidrotérmico do bagaço de mandioca. De acordo com Zenatti *et. Al* (2015), a hidrólise seguiu em estufa a 140°C por 45 minutos.

Em seguida, foi realizada a separação da parte sólida e líquida do hidrolisado na filtração em boba a vácuo. Na fração líquida determinou-se a concentração de açúcares redutores totais em pH.

Para o processo de destoxificação do hidrolisado, tratou com a adição de 1g de carbonato de cálcio (CaCO3) e 5 ml de NaOH sob agitação constante até pH 6, em seguida incluiu 1g de carvão ativado e manteve durante 30 minutos em aquecimento à 60oC com agitação em intervalos seguido de centrifugação a 5000 rpm por 3 minutos e filtração a vácuo com filtro qualitativo (ZENATTI et al., 2015).

Co-digestão anaeróbia

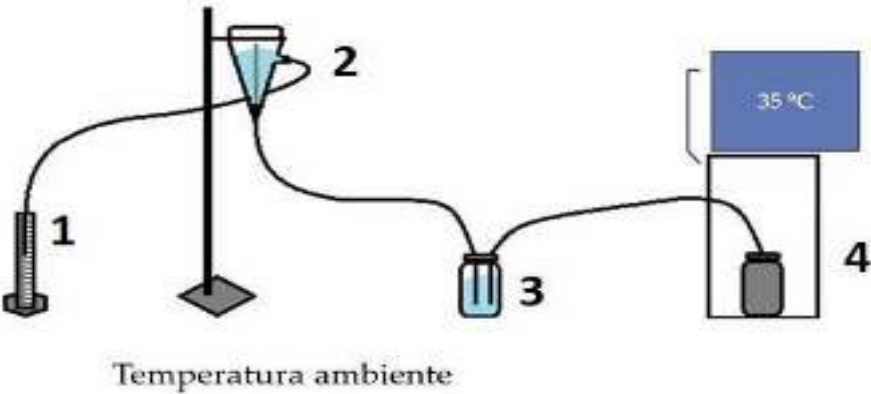
Quatro reatores em vidro de borosilicato com volume de 1 L foram montados, onde foram incubadas frações de manipueira/hidrolisado em inóculo, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Frações de inóculo, hidrolisado e manipueira.

Ensaio	Inóculo	Hidrolisado	Manipueira
1	10%	-	90%
2	10%	30%	60%
3	10%	23%	67%
4	10%	45%	45%

Os reatores foram mantidos em anaerobiose à 35°C com Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) de 13 dias. O volume de biogás gerado foi medido pela técnica de deslocamento de líquido.

Figura 1 – esquema de montagem dos reatores.



- 1- Frasco para recolha do volume da água correspondente ao volume de metano
- 2- Gasômetro receptor do metano
- Frasco lavador de gases
- Biorreator em estufa com temperatura comtrolada

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o seguinte trabalho, realizou-se a caracterização dos resíduos lançados nos reatores, tabelando o pH, açúcares redutores, nitrogênio amoniacal, nitrogênio total, Demanda Química de Oxigênio (DQO), sólidos totais, sólidos voláteis e sólidos fixos (Tabela 3).

Tabela 3 - Caracterização do inóculo, hidrolisado e manipueira.

Parâmetro	Inóculo	Hidrolisado	Manipueira
pH	7,7	7,75	3,53
Açúcares Redutores (mg L ⁻¹)	151,2	186,6	177,75
Nitrogênio amoniacal (mg N L ⁻¹)	470,81	8,99	17,99
Nitrogênio total (mg N L ⁻¹)	1255,1	46,2	138,6
DQO (mg O ₂ L ⁻¹)	434,14	2836,58	16621,95
ST (%)	0,295	2,85	0,523
SV (%)	0,132	61,559	0,309

SF (%)	0,163	-58,8	0,214
--------	-------	-------	-------

Segundo Cereda (2001), na composição média da manipueira obtida em dados experimentais em indústrias, o pH encontrado em seu trabalho foi de 5,50, sendo um valor maior. Porém, os valores de sólidos totais foram próximos, encontrado o valor de 0,54 contra 0,52 do presente trabalho.

A eficiência dos reatores pode ser vista na tabela seguinte (Tabela 4), onde observou-se uma produção de 82,85 mg/L no ensaio 4, entretanto, comparado ao ensaio 2 nota-se um desaproveitamento dos açúcares na produção de metano. Por fim, o ensaio 2, mesmo apresentando a menor eficiência de remoção de açúcares, destacou-se em produção de metano.

Tabela 4 - Eficiências dos reatores.

Eficiência de Remoção					Produção
ENSAIO	NT (%)	ST (%)	SV (%)	AÇUCARES (%)	CH4(ml)
1	0	3,59	1,64	54,53	0
2	64,52	6,26	2,78	53,93	337
3	53,57	5,67	2,16	64,94	180
4	39,47	12,88	4,45	82,85	271

O ensaio 1 que possuía apenas manipueira e inóculo em sua composição, apresentou menor teor de sólidos. Também, observou-se um aumento gradativamente nos teores de sólidos, divergindo apenas no teor de sólidos voláteis do ensaio 3 onde era composto por 23% de hidrolisado e 60% de manipueira contra os 30% e 67% do ensaio 2.

Em seu trabalho, Jasko et al. (2011) tabelaram um rendimento de 52% de açúcar solúveis através do tratamento com ácido sulfúrico, que junto aos valores do presente estudo demonstra a eficiência do tratamento do bagaço e da sua conversão. Dados da literatura também apontaram o menor rendimento da hidrólise enzimática se confrontado com a hidrólise ácida.

Devido ao tipo de reator utilizado, o substrato e as condições do processo de digestão anaeróbia a produção de biogás é oscilante (tabela 5).

Tabela 5 – Produção de metano por substrato removido.

ENSAIO	V CH4/g SV removido (ml)	V CH4/mg açúcar redutor removido (ml)
1	0	0
2	89,15	3,46
3	56,78	1,5
4	10,44	1,45

O ensaio dois apresentou maior volume de metano tanto por sólidos voláteis removidos quanto por açúcar redutor, seguido pelo ensaio três. Para o primeiro ensaio não se obteve produção de metano.

Encontrou-se uma variação na produção de metano nos 13 dias, conforme da porcentagem de hidrolisado e manipueira. Neste trabalho constatou-se que a melhor proporção na geração de biogás foi de 10% de inóculo, 23% de hidrolisado e 67% de manipueira, finalizando com 337 ml de metano. O volume de CH4 por grama de SV removido foi de 89,15 mL, inferior ao encontrado por Passos *et. al.* (2018) na co-digestão de resíduo de casca de café, pré-tratado hidrotermicamente, com biomassa de microalgas, que foi de 196 mL de CH4 por grama de SV.

Segundo Paul e Dutta (2017), a biomassa lignocelulósica é uma matéria-prima de alta potência para produzir metano, entretanto sua complexidade estrutural e valor de relação C/N inibi seu potencial quando usada na monodigestão. A co-digestão anaeróbica de biomassa lignocelulósica com outra biomassa rica em nitrogênio, tem elevada tendência a manter a relação C/N ótima e assim aumentar a produção do biogás.

4 CONCLUSÃO

Os resultados apresentados indicam avanços significativos na compreensão dos processos de digestão anaeróbia e produção de biogás a partir de resíduos. A caracterização detalhada dos resíduos e a análise da eficiência dos reatores revelam que, apesar das oscilações inerentes ao tipo de reator e substrato utilizado, é possível otimizar a produção de metano. O ensaio 2, em particular, demonstrou ser mais eficaz na conversão de açúcares redutores em metano, apesar de sua menor eficiência na remoção de açúcares, o que sugere uma rota metabólica mais direcionada para a geração de biogás. A comparação com dados da literatura, como o estudo de Jasko et al. (2011), corrobora a eficiência do tratamento ácido na preparação do substrato para a digestão anaeróbia. Este estudo contribui para o campo com evidências de que a manipulação das proporções de inóculo, hidrolisado e manipueira pode resultar em uma produção otimizada de biogás, sendo a combinação de 10% de inóculo, 23% de hidrolisado e 67% de manipueira a mais eficiente, conforme demonstrado pelo volume final de 337 ml de biogás. Essas descobertas são fundamentais para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis de energia renovável e para a gestão eficiente de resíduos agrícolas

REFERÊNCIAS

CAMACHO, I. CABELLO, C. Caracterização dos resíduos do processamento de mandioca para produção de bio-etanol. **Revista Energia na Agricultura.**, Botucatu. v. 27, n. 1, p. 82-88, 2012.

COLDEBELLA, A. SOUZA, S. N. M. SOUZA J. KOHELER, A. C. Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bovinocultura de leite. **AGRENER**, 2006.

EMBRAPA **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Centro de Pesquisa Agroflorestal de Rondônia**. Disponível em:
<<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/24804/1/folder-mandioca.pdf>>.
Acesso em: maio/2024.

EMBRAPA **Mandioca e Fruticultura**. Mandioca. Disponível em:
<<https://www.embrapa.br/mandioca-e-fruticultura/cultivos/mandioca>>. Acesso em:
maio/2024.

FIORDA, F. A.; JUNIOR, M. S. S.; SILVA, F. A.; SOUTO, L. R. F.; GROSSMANN, M. V. E. Farinha de bagaço de mandioca: Aproveitamento de subproduto e comparação com fécula de mandioca. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v.3, n.4, p.408-416, 2013.

FIORETTO, R. A. Manejo, uso e tratamento de subprodutos da industrialização da mandioca. São Paulo: **Fundação Cargill**, 2001. v. 4, 320p. cap. 4

IBGE- **Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. Estatística da Produção Agrícola**. Dezembro de 2016. Disponível em:
<ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agrico

la_ [mensal]/Fasciculo/2016/lspa_201612_20170222_133000.pdf>. Acesso em: maio/2024.

JASKO, A. C.; de ANDRADE, J.; de CAMPOS, P. F.; PADILHA, L.; de PAULI, R. B.; QUAST L. B.; SCHNITZER E.; DEMIATE I. M. Caracterização Físico-química de bagaço de mandioca *IN NATURA* e após tratamento hidrolítico. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**. v. 05, p. 427- 441, 2011.

NETO, E.D.D. ALVARENGA, L.H. et al. Implementação e Avaliação de um Biodigestor de Produção Descontínua. **Revista eletrônica E-xacta**, v.3, n.2. 2010.

PAUL, S. DUTTA, A. Challenges and opportunities of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. **Cience of the Total Environment**, v. 645, p. 164-174, 2017.

ZENATTI, D. COSTA, A. HERMES, E. VILVERT, R. DIAS, L. quantificação de açúcares redutores em hidrolisados do bagaço de mandioca para uso na produção de metano. **Revista gestão e Sustentabilidade Ambiental**., Florianópolis. V. 4, p. 616-627, 2015.