


**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS PRODUZIDO ATRAVÉS DA
BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DO EFLUENTE DA LIGNINA**

**EVALUATION OF THE ENERGY POTENTIAL OF BIOGAS PRODUCED THROUGH
ANAEROBIC BIODIGESTION OF LIGNIN EFFLUENT**

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL BIOGÁS PRODUCIDO
MEDIANTE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL EFLUENTE DE LIGNINA**

 <https://doi.org/10.56238/arev7n12-090>

Data de submissão: 10/12/2025

Data de publicação: 10/12/2025

Boutros Sarrouh

Doutorado em Biotecnologia Industrial
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7204534064025448>
E-mail: bsarrouh@ufsj.edu.br

Roberto Guimarães da Cunha Filho

Mestre em Engenharia Química
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6540618079264893>
E-mail: betolga.cunha@hotmail.com

Daniel de Freitas Rodrigues

Mestre em Engenharia Química
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3029179678516031>
E-mail: daninhofr@gmail.com

Fabiano Luiz Naves

Doutorado em Engenharia de Produção
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei - campus Alto Paraopeba
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0258894019687841>
E-mail: fabianonavesengenheiro@ufsj.edu.br

Renata Carolina Zanetti Lofrano

Doutorado em Ciências
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei - campus Alto Paraopeba
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5561482457720983>
E-mail: renataczlofrano@gmail.com

RESUMO

Atualmente, não há uma destinação correta para o efluente da lignina gerado no processo de produção de álcool de segunda geração, sendo queimada em caldeiras. Assim, a biodigestão anaeróbica da lignina (licor negro) surge como alternativa de tratamento promissora no que se refere à produção de biogás e seu aproveitamento para produção de energia. Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial energético do biogás produzido por biodigestão anaeróbica da lignina gerada a partir do

processamento de 24 tn/dia de bagaço de cana-de-açúcar, visando à obtenção de energia elétrica por meio de cálculos feitos utilizando balanços de massa e energia. Conforme os resultados obtidos, foi constatado que, o biogás produzido possui energia térmica igual a 84 milhões kcal/dia e uma potência elétrica igual a 1,28 kW. Comparando os resultados com os dados da produção energética da região sudeste é possível observar que o biogás tem potencial para gerar energia para até cinco residências. Conclui-se que, o biogás produzido possui potencial energético competitivo além de ser considerado como uma alternativa sustentável para o tratamento do efluente da lignina.

Palavras-chave: Etanol de Segunda Geração. Lignina. Biodigestor Anaeróbios. Biogás. Energia Elétrica.

ABSTRACT

Currently, there is no correct destination for the lignin effluent generated in the second-generation alcohol production process, which is burned in boilers. Thus, anaerobic biodigestion of lignin (black liquor) emerges as a promising treatment alternative for biogas production and its use for energy production. The objective of this study was to evaluate the energy potential of biogas produced by anaerobic biodigestion of lignin generated from the processing of 24 tons/day of sugarcane bagasse, aiming to obtain electrical energy through calculations made using mass and energy balances. According to the results obtained, it was found that the biogas produced has thermal energy equal to 84 million kcal/day and electrical power equal to 1.28 kW. Comparing the results with energy production data for the southeastern region, it can be seen that biogas has the potential to generate energy for up to five households. It is concluded that the biogas produced has competitive energy potential and is considered a sustainable alternative for the treatment of lignin effluent.

Keywords: Second Generation Ethanol. Lignin. Anaerobic Biodigester. Biogas. Electric Power.

RESUMEN

Actualmente, no existe un destino adecuado para el efluente de lignina generado en el proceso de producción de alcohol de segunda generación, por lo que se quema en calderas. Así, la biodigestión anaeróbica de la lignina (licor negro) surge como una alternativa de tratamiento prometedora en lo que se refiere a la producción de biogás y su aprovechamiento para la producción de energía. El objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial energético del biogás producido por biodigestión anaeróbica de la lignina generada a partir del procesamiento de 24 tn/día de bagazo de caña de azúcar, con el fin de obtener energía eléctrica mediante cálculos realizados utilizando balances de masa y energía. Según los resultados obtenidos, se constató que el biogás producido tiene una energía térmica igual a 84 millones de kcal/día y una potencia eléctrica igual a 1,28 kW. Al comparar los resultados con los datos de producción energética de la región sudeste, se observa que el biogás tiene potencial para generar energía para hasta cinco residencias. Se concluye que el biogás producido tiene un potencial energético competitivo, además de ser considerado una alternativa sostenible para el tratamiento de efluentes de lignina.

Palabras clave: Etanol de Segunda Generación. Lignina. Biodigestor Anaeróbico. Biogás. Energía Elétrica.

1 INTRODUÇÃO

Novas tecnologias no setor energético normalmente competem com tecnologias já bem estabelecidas, com custos baixos e ampla base instalada, de modo que o maior problema a ser enfrentado pelas inovações no setor de álcool de segunda geração é o de atingir a escala necessária. Portanto, além da disponibilização de uma nova tecnologia é preciso também viabilizar a criação de demanda para este tipo de tecnologia.

Os biocombustíveis, no entanto, enfrentam uma limitação fundamental na sua produção: originam-se, em geral, de plantas que exigem áreas de cultivo extensas. Assim, mesmo que no momento não haja conflito no uso da terra para biocombustíveis e alimentos, isso poderá verificar-se no longo prazo, se o volume de petróleo a substituir for significativo. (ROSA e GARCIA, 2009).

O processo do etanol 2G consiste na hidrólise do bagaço, porém a lignina nesse substrato atrapalha a hidrólise, segundo (OGEDA e PETRI, 2010): A lignina restringe a hidrólise, pois esconde a superfície celulósica impedindo o intumescimento das fibras. Logo, torna-se necessária uma etapa de pré-tratamento, tanto a fim de quebrar a estrutura cristalina da lignocelulose quanto a fim de remover a lignina, expondo as moléculas de celulose e hemicelulose à ação enzimática. As principais tecnologias de pré-tratamento estão representadas junto aos pré-tratamentos químicos, incluindo pré-tratamentos ácidos, alcalinos ou oxidativos. Observa-se que durante o processo do etanol de segunda geração gera-se ainda uma porcentagem de resíduos sendo eles a hemicelulose e lignina. Na etapa de hidrólise alcalina o bagaço entra no reator junto com certa quantidade de água e NaOH a uma temperatura onde é aquecido resultando na hidrólise do bagaço cujos produtos são lignina (licor negro), celulose e hemicelulose hidrolisados sendo essa a primeira etapa do processo da obtenção do etanol do 2G. O licor negro obtido passa por um reator juntamente com lodo anaeróbico onde parte da lignina é biodegradada, gerando certa quantidade de biogás. O biogás gerado pode ser utilizado em uma terceira etapa de processo em que é parcialmente convertido em energia elétrica.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial energético do biogás produzido em amostra de bancada a partir de trabalhos experimentais realizadas em nosso grupo de pesquisa e especificamente utilizando dados experimentais obtidos por (FRAGA, 2019) em suas análises qualitativas e quantitativas. E dessa forma, avaliar a viabilidade energética da utilização do biogás produzido por anaeróbico do efluente da indústria de etanol de segunda geração rico em lignina- em escala industrial. A importância do trabalho nesse contexto é a redução da orgânica gerando assim um ganho ambiental e o aproveitamento da energia que gera um ganho financeiro significativo a sua implementação.

1.1 ÁLCOOL DE SEGUNDA GERAÇÃO (2G)

A necessidade de desenvolver combustíveis alternativos ao petróleo e reduzir a emissão de poluentes tem sido cada vez maior. O grande desafio – além da sustentabilidade – é a viabilidade econômica. Produtos alternativos e de origem renovável costumam possuir uma produção onerosa, o que dificulta pesquisas, investimentos e a chegada até o consumidor final. Foi baseado nesse cenário que surgiu o Bioetanol, também conhecido como Etanol de 2ª geração. Um combustível obtido através da fermentação controlada e da destilação de resíduos vegetais, como o bagaço da cana-de-açúcar, a beterraba, trigo ou o milho. A produção de combustíveis líquidos, como o etanol, a partir de biomassa tem sido proposta como uma estratégia para aliviar a dependência de fontes de energia não renováveis (LORA e GLASSER, 2002).

Segundo Aguiar (2017), o Brasil é reconhecido tanto na produção de cana-de-açúcar, quanto na produção de açúcar e etanol. Com relação à produção de cana-de-açúcar e de açúcar, é o maior produtor do mundo. Na safra de 2021/2022 obteve 568,4 milhões de toneladas de cana e 33,9 milhões de toneladas de açúcar (CONAB, 2021). No caso do etanol, o país é o segundo maior produtor (o primeiro lugar é ocupado pelos Estados Unidos). Na safra de 2021/2022, atingiu uma produção de 24,8 bilhões de litros, sendo 9,7 bilhões de litros de etanol anidro e 15,11 bilhões de litros de etanol hidratado (CONAB, 2021).

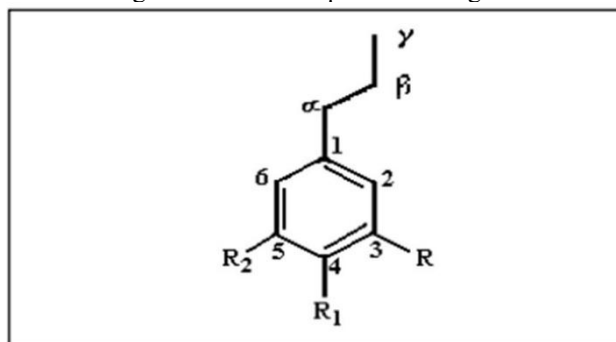
Em geral, o processo biológico de converter a biomassa de lignocelulose para combustível de etanol envolve: (1) pré-tratamento para remover a lignina ou a hemicelulose para liberar celulose; (2) despolimerização de polímeros de carboidratos para produzir açúcares livres por ação mediada por celulase; (3) fermentação de açúcares de hexose e / ou pentose para produzir etanol; (4) destilação de etanol (CANILHA, CHANDEL, et al., 2012).

1.2 LIGNINA

A remoção da lignina da biomassa da planta é um processo caro; portanto, os esforços de pesquisa agora visam projetar plantas que depositam menos lignina ou produzem ligninas mais suscetíveis à degradação química (VANHOLME, DEMEDTS, et al., 2010).

O sistema mais comum de nomenclatura na química da lignina é o que se fundamenta na unidade básica fenilpropanóide, C₆C₃, designando os carbonos da cadeia alifática, C₃, como α , no caso do carbono benzílico, e β e γ , sequencialmente, para os demais átomos. O anel aromático é numerado, iniciando-se a contagem pelo carbono ligado à cadeia alifática¹, C₃ (SALIBA, RODRIGUEZ e MORAIS, 2001), conforme Figura 1.

Figura 1- Estrutura química da Lignina



Fonte: Saliba, Rodriguez e Morais (2001)

A desconstrução da lignina é uma etapa fundamental no processamento da biomassa para monômeros úteis, mas permanece desafiadora. Os sistemas microbianos podem fornecer informações moleculares sobre a despolimerização da lignina, à medida que evoluíram para decompor a lignina usando vias radicais dependentes de metaloenzimas. Observou-se que fungos e bactérias metabolizam a lignina; no entanto, sua reatividade diferencial com esse substrato indica que eles podem utilizar estratégias químicas diferentes para sua decomposição (BROWN e CHANG, 2014).

Historicamente, os lignossulfonatos e outros produtos à base de lignina têm sido vistos como resíduos de utilidade industrial limitada. Os avanços na tecnologia da lignina, no entanto, levaram ao desenvolvimento de produtos especiais que podem competir com produtos sintéticos de maior custo. O desempenho aprimorado desses produtos, juntamente com o fato de serem essencialmente não-tóxicos e derivados de um recurso renovável, os tornam produtos químicos versáteis e econômicos para o consumidor ambientalmente consciente (GARGULAK e LEBO, 1999).

Tradicionalmente, a lignina tem sido vista como um material residual ou um subproduto de baixo valor da celulose, com sua utilização predominantemente limitada ao uso como combustível para acionar as caldeiras da celulose. De fato, foi estimado que apenas 1% a 2% da lignina é isolada dos licores de celulose e usada para produtos especiais (LORA E GLASSER, 2002). Essa mentalidade está presente nas abordagens da geração de combustível, como a conversão de biomassa em etanol, onde a lignina residual é usada como combustível para a geração de energia para impulsionar a etapa fermentativa da produção de etanol (STEWART, 2008). Conforme Mulat, Dibdiakova e Horn (2018) a produção de 79 bilhões de litros de biocombustíveis de segunda geração anualmente até 2022 nos EUA geraria cerca de 62 milhões de toneladas de lignina, excedendo dessa forma o atual mercado mundial de lignina usada em produtos especiais. Sendo assim, esforços consideráveis estão em andamento para gerar produtos químicos e outras formas de energia a partir de licores de lignina.

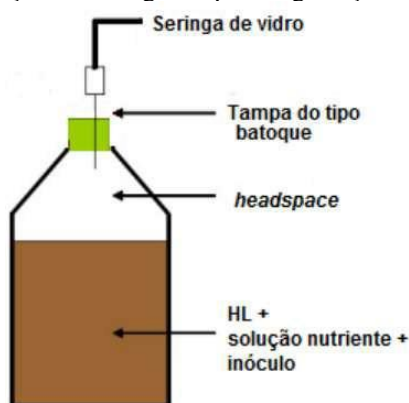
A digestão anaeróbica (DA) é uma tecnologia bem estabelecida para gerenciamento de resíduos e produção de energia renovável, na qual o material orgânico é convertido em biogás. O biogás consiste

principalmente em metano (50-75%) e dióxido de carbono, suas quantidades relativas dependendo do tipo de matéria-prima e das condições operacionais. O biogás melhorado com maior teor de metano pode ser usado como substituto do gás natural para geração combinada de calor e eletricidade, como combustível de veículo, e pode ser armazenado para uso posterior (MULAT, DIBDIAKOVA e HORN, 2018). A fração de carboidrato da biomassa lignocelulósica é degradável na digestão anaeróbica, enquanto a fração de lignina é geralmente considerada difícil de degradar. Normalmente, o digerido coletado dos digestores de biogás é rico em lignina devido à degradação dos outros componentes. No entanto, a digestão anaeróbica da lignina foi observada em vários ambientes naturais, mas os estudos sobre o destino da degradação da lignina em sistemas de biogás projetados são muito limitados. Com uma melhor compreensão das frações degradáveis e recalcitrantes da lignina durante a digestão anaeróbica, poderiam ser desenvolvidas aplicações potenciais além da combustão (MULAT, DIBDIAKOVA e HORN, 2018).

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os dados foram coletados a partir dos ensaios de biodigestão realizados em trabalhos anteriores. O biorreator anaeróbico utilizado por nosso grupo de pesquisa (Figura 2), leva em conta o método desenvolvido por Fraga (2019) que gera um gás com aproximadamente 47% de metano com uma eficiência de remoção de dco de 67% com um valor de DQO igual a 55g/l, uma eficiência de remoção de lignina de 98% e de fenóis totais de 51%.

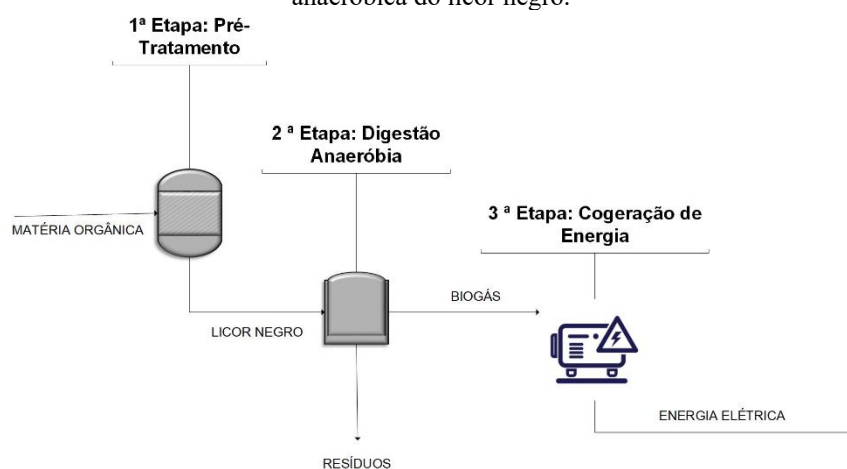
Figura 2- Ilustração do biodigestor para degradação anaeróbica da lignina.



Fonte: (FRAGA, 2019)

Foi considerada como base de cálculo para os balanços de massa uma quantidade de 24 toneladas de bagaço. Segundo Martins et al., (2014) com o bagaço é possível produzir de 30 a 40% a mais de álcool. Considerando que o bagaço possui aproximadamente 44 a 50% de celulose, 24 a 30% de hemicelulose e 10 a 20% de lignina. O processo produtivo será dividido em três etapas principais: 1ª etapa- pré- tratamento, 2ª etapa - biodigestão da lignina e 3ª etapa - geração de energia. Os cálculos dos balanços de massa e energia serão aplicados em cada uma destas etapas.

Figura 3- Fluxograma simplificado das etapas do processo para a avaliação do potencial energético da biodegradação anaeróbica do licor negro.



Fonte: Elaborada pelos autores

3 BALANÇO DE MASSA

3.1 1ª ETAPA- PRÉ-TRATAMENTO

Para o balanço de massa serão coletados dados de diferentes trabalhos da literatura e utilizados conforme a metodologia adotada por Felder e Rousseau, (2008) para processos contínuos em estado estacionário, dados pelas equações (1 e 2):

$$entrada + geração = saída + consumo \quad (1)$$

Considerando que não ocorre reação o processo se simplifica a:

$$entrada = saída \quad (2)$$

3.2 2ª ETAPA - BIODIGESTÃO DA LIGNINA

Com os dados de lignina obtidos após pré-tratamento e os dados de (FRAGA, 2019) será realizado o balanço da biodigestão. Para essa etapa devemos conhecer o lodo para degradar a quantidade gerada. Segundo Fraga (2019) para determinação do lodo a ser utilizado para degradação da lignina deve-se determinar a relação substrato microrganismo dada pela equação (3):

$$S/M = \frac{DQO_{hidrolisado} \times Vol_{HL}}{STV_{lodo} \times Vol_{lodo}} \quad (3)$$

Sendo: DQO_{HL} : Demanda química de oxigênio do hidrolisado (g/L);

Vol_{HL} : Volume de Hidrolisado de lignina (mL);

STV_{lodo} : Sólidos totais voláteis do lodo (g/L);

Vol_{lodo} : volume de lodo (mL).

Da mesma forma, será utilizado o modelo matemático para a determinação da carga biológica, conforme proposto por Szymanski, Balbinot e Schirmer (2010), dada pela equação (4):

$$C_B = \frac{Q \times S_0}{M} \quad (4)$$

S_0 : Carga orgânica inicial (KgDQO.m⁻³)

C_B : Carga Biológica (KgDQO/KgSTV);

M : KgSTV presente no lodo do reator (20 kg.m⁻³).

3.3 BALANÇO DE ENERGIA

A energia disponível no biogás gerado no reator UASB é equivalente à energia produzida pelo gás metano. No cálculo da energia gerada utiliza-se a vazão do metano (obtida através do produto da vazão do biogás multiplicado pelo teor de metano) e o poder calorífico inferior do metano (LIMA e PASSAMANI, 2012), conforme mostrado na equação (5):

$$E_t = (Q_{biogás} \cdot t_{CH_4}) \cdot PCI_{CH_4} \quad (5)$$

Sendo: $Q_{biogás}$: Quantidade de biogás produzido na biodegradação;

E : Energia térmica disponível no biogás (Kcal/dia);

t_H : Teor de metano na composição do biogás;

PCI_H : Poder calorífico inferior do metano;

O poder calorífico pode ser encontrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Comparativo do Poder Calorífico do biogás com outros gases adaptado de Lima e Passamani (2012) apud Cribari (2004)

Gás	Poder Calorífico (Kcal/Nm³)
Biogás	5500
Butano	28000
Gás de cozinha - GLP	25775
Gás natural	7600
Metano	8500
Propano	22000

Fonte: Elaborada pelos autores

Dessa forma a potência elétrica e a energia contida no biogás pode ser calculada segundo Lima e Passamani (2012) pela equação (6):

$$PE_{biogás} = \frac{E_t \cdot 4,1848 \times n_{tec} \times n_{gerador}}{86400} \quad (6)$$

Sendo: PE : Potência elétrica biogás(kW) 4,1848: Fator de conversão de kcal para kJ;

n_{ec} : Eficiência da tecnologia de conversão (turbina, microturbina ou motor de combustão interna);

$n_{g\ gerador}$: Rendimento do gerador; 86.400: Fator de conversão de dias para segundos.

Segundo o rendimento do gerador para turbinas e motores varia de 85 a 90% (LIMA e PASSAMANI, 2012). A produção de energia elétrica é dada pela equação (7):

$$E_e = PE_{biogás} \times T_{operação} \quad (7)$$

Sendo: E_e : Energia elétrica gerada (kWh/dia);

$T_{operação}$: Tempo de operação do motor (h/dia).

As eficiências de algumas turbinas e motores podem ser encontradas na Tabela 2.

Tabela 2- Métodos de conversão energética: Potência de operação, eficiência e emissão de NOx adaptado de Pecora (2006)

Tecnologia de conversão	Potência de Operação	Rendimento	Emissões de NOx
Motores a gás	30 kW-20MW	30 a 34%	< 3000 ppm < 250 ppm
Motores a Diesel: Biogás + Diesel	-	30 a 35% (Necessidade de diesel com baixo teor de enxofre)	~27 ppm
Turbinas a Gás para Biogás de Pequeno-Médio Porte	500 kW-150 MW	20 a 30%	~35 a 50 ppm
Microturbinas	30 kW-100kW	24 a 28%	< 9 ppm

Fonte: Elaborada pelos autores

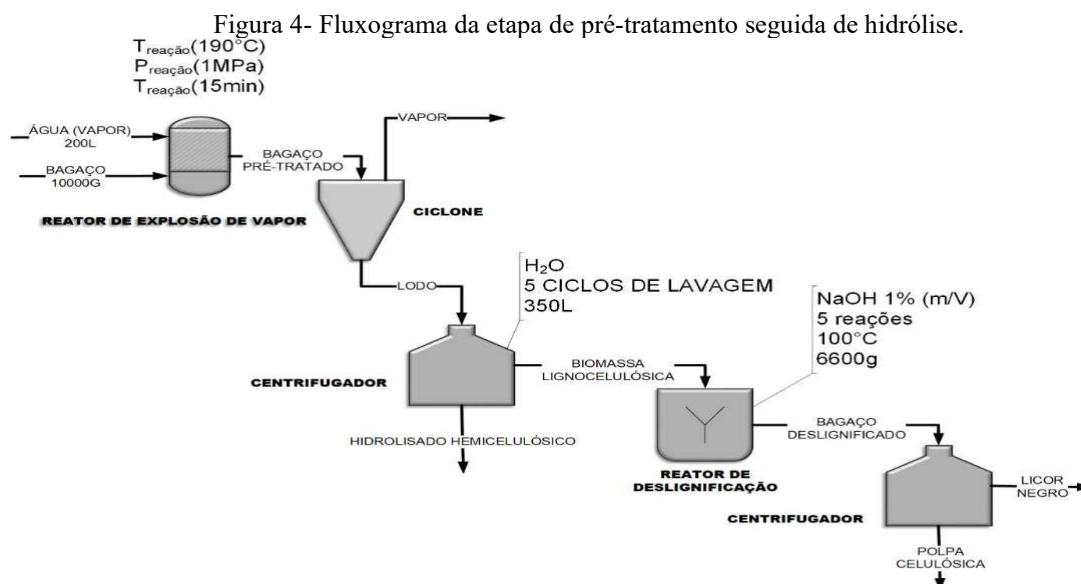
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 1ª ETAPA- PRÉ-TRATAMENTO

No trabalho de Rocha, Martins *et al.* (2012), os autores descreveram todo o balanço de massa de 10 kg de bagaço após pré-tratamento seguido de deslignificação, parte dos dados encontrados serão usados nesse trabalho para determinação do balanço de massa. Segundo dados de Nova Cana uma indústria de etanol de segunda geração utiliza-se uma faixa de 850 a 2000 kg de bagaço por hora, assim adotando uma quantidade de 1 tonelada por hora, temos uma quantidade de substrato de 24 toneladas por dia, em regime contínuo.

Rocha, Martins *et al.* (2012) trataram 10 kg de bagaço em um reator de 200 L hermeticamente fechado, onde foi introduzido vapor a 190 °C e com pressão de 1,3Mpa. Após 15 minutos de reação, o reator foi despressurizado e em seguida descarregado em um ciclone de 500L. O lodo resultante do pré-tratamento por explosão a vapor foi centrifugado em uma centrífuga semi-industrial de 100 L durante 10 minutos, onde foi separada a biomassa lignocelulósica da parte líquida ou hidrolisado hemicelulósico. A biomassa foi novamente centrifugada por 10 minutos e passou por 5 ciclos de lavagem. A biomassa lignocelulósica passou por um processo chamado de deslignificação alcalina. O processo consistiu em reagir o total de biomassa pré-tratada (6,6 kg) em um reator de 350 L ferro fundido revestido de aço inoxidável, equipado com um agitador e aquecido através de uma camisa com óleo térmico com água aquecida a 95 °C e uma solução de NaOH 1% (m/V), em uma taxa de 20:1 (m/V). A mistura reacional foi aquecida até 100°C com desvio de 2°C e em seguida em agitação contínua de 80 rpm durante 1 hora. Após descarregada a mistura foi centrifugada por 10 minutos separando a porção líquida, licor negro, foi separada da porção sólida, polpa celulósica. A polpa celulósica passou ainda por 7 ciclos de lavagem para remoção completa da lignina e submetida a

caracterização química e estocada a uma temperatura de 4°C. conforme fluxograma representado pela Figura 4. Segundo Rocha, Martín, *et al.* (2012), após o processo de explosão de vapor apenas 66% da biomassa é recuperada, e após deslignificação apenas 53% do material pré-tratado.



Fonte: adaptado de Rocha, Martin *et. al.* (2012).

Pode-se calcular as quantidades de água e NaOH que serão utilizados por regra de três levando as quantidades usadas por Rocha, Nascimento *et al.*, (2014) sendo para 1,0 kg de bagaço ele utilizou-se 20L de água. Segundo ROCHA, MARTÍN, *et al.* (2012), para 6,6 kg de bagaço bruto é possível obter aproximadamente 513 L de licor negro com uma concentração de 6,7 g/L de lignina após pré-tratamento e deslignificação, e um percentual em massa de 35% do total de bagaço bruto, dessa maneira podemos obter a quantidade de licor obtido no nosso processo bem como a quantidade de biomassa. Após a hidrólise alcalina apenas 32% do total utilizado na entrada é recuperado.

4.2 1ª ETAPA - HIDRÓLISE ALCALINA

Sendo assim, para calcular as correntes de entrada e saída no processo estudado, será considerado um total de 24 toneladas de bagaço, porém parte dessa biomassa (66%) é recuperada durante o pré-tratamento.

Após a deslignificação apenas 35% do bagaço é recuperado e um equivalente a 53% da massa pré-tratada por explosão a vapor (ROCHA, MARTÍN, *et al.*, 2012). Para as correntes de entrada e saída da água e NaOH, estima-se que para 1 kg de bagaço temos de usar 20 L e para a mesma quantidade 200g de NaOH para que haja a degradação eficiente da biomassa (ROCHA, MARTÍN, *et al.*, 2012).

As composições de entrada e saída dos componentes da etapa de hidrólise alcalina podem ser encontradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Entradas, saídas e composição das substâncias na etapa de hidrólise alcalina

Componentes	Entradas	Saídas
Água	316800 L	316800 L
NaOH	3,17 ton	3,17 ton
Bagaço	15840 kg	8395 kg
Celulose	9108 kg (57,5%)	7521 kg (89,6%)
Pentoses	1045,44 kg (66%)	285,43 kg (3,4%)
Lignina	5148 kg (32,5 %)	453,33 kg (5,4%)
Cinzas	443,52 (2,8%)	134,32 kg (1,6%)

Fonte: Elaborada pelos autores

Na etapa de hidrólise obtemos o licor negro que apresenta diferentes composições da polpa celulósica. As quantidades obtidas após a hidrólise estão indicadas na Tabela 4. Segundo Rocha, Martín, et al., (2012), uma corrente composta por 91% de lignina, 17% de celulose, 72,5% de pentoses e 69,6% de cinzas da biomassa lignocelulósica que adentra o reator encontram-se solubilizada no licor. Conforme os resultados obtidos pelos autores, a quantidade de licor obtida no processo foi de 6.625 kg de bagaço pré-tratado e 513 L de licor negro. Dessa maneira podemos calcular a quantidade de licor de lignina produzido a partir de 15840 kg de bagaço de cana, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4- Entradas, saídas e composição das substâncias presentes no efluente

Componentes	Entradas	Saídas
Licor (m ³)	-	1226,6
Celulose (kg)	9108	1548,36
Pentoses (kg)	1045,44	757,94
Lignina (kg)	5148	4684,68
Cinzas (kg)	443,52	308,69

Fonte: Elaborada pelos autores

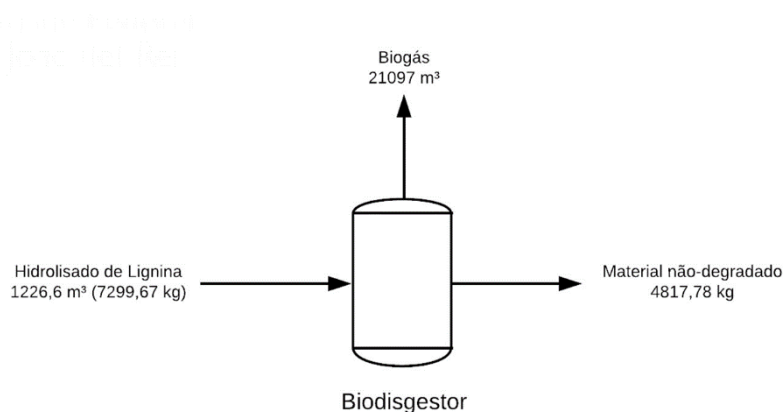
4.3 2ª ETAPA - BIODIGESTÃO DA LIGNINA

Com os dados de lignina obtidos após pré-tratamento e os dados de (FRAGA, 2019) foi possível obter uma relação de substrato microrganismo igual a 0,27 g/g. O valor do relatado foi de 55 g/L o que para um volume de 20ml indica 1,1 g de carga orgânica na solução. Dessa forma o volume do lodo necessário foi calculado conforme equação 3. O valor do volume do lodo obtido era de $V_{lodo} = 6124 \text{ m}^3$. Após a biodigestão apenas parte do substrato é degradado, do total degradado apenas uma fração do licor é de lignina, assim para a biodigestão anaeróbica temos uma eficiência de degradação de lignina insolúvel de 98%, redução de 67% da DQO indicando a degradação de parte do substrato e 51% de fenóis totais segundo dados de (FRAGA, 2019). Da quantidade utilizada, que foi de 20mL para primeira fase de análise produziu-se 344mL de biogás, dessa quantidade de gás gerado aproximadamente 47% (161,5mL) é de metano com um desvio padrão de quase 4% para mais ou para menos.

Como a produção média acumulada de metano foi de 161,5 mL e sabendo que 434mL de metano formado equivale a 1g de DQO destruída então a DQO degradada nesse período foi de aproximadamente de 0,4g. Como a massa de DQO inicial inoculada foi de 1,1g (7,33gDQOL-1 x 0,15L volume útil do biorreator) calculou-se, portanto, que a biodegradabilidade anaeróbia do hidrolisado de lignina foi em média de 34% (FRAGA, 2019). Com base nesses dados podemos encontrar a quantidade de gás gerado e a quantidade não degradada que são as saídas do nosso processo. Considera-se que todo o lodo utilizado é totalmente recuperado no processo. Segundo os dados obtidos por Fraga (2019) para 20 mL de hidrolisado de lignina (HL) é possível obter 344 mL de biogás, dessa maneira consegue-se calcular o volume do biogás para 1226,6 m³ de licor de lignina e considerando a composição do

gás em metano é de 47 %, conforme os resultados apresentados na Tabela 5. Dessa forma, foi observada uma eficiência de degradação a partir da DQO de apenas 34 % do hidrolisado temos 7299,67 kg em massa no hidrolisado somando os seus componentes, assim 4817,78 kg em massa solubilizado no hidrolisado não se degrada no processo de biodigestão anaeróbica. Os dados das correntes de entrada e saída da etapa de biodigestão estão apresentados na Tabela 5 e Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma da etapa de biodigestão com as correntes de entrada e saída.



Fonte: Elaborada pelos autores

Tabela 5. Correntes de entradas e saídas na etapa de biodigestão anaeróbica

Componentes	Entrada	Saída
Hidrolisado	7299,67 kg	4817,78 kg
Lodo	6,12 m³	6,12 m³
Metano	-	9915,6 m³
Biogás	-	21097 m³

Fonte: Elaborada pelos autores

4.4 3ª ETAPA - GERAÇÃO DE ENERGIA E CÁLCULO ENERGÉTICO

O biogás retirado da etapa dois pode então ser queimado para girar as turbinas que irão gerar energia elétrica. A quantidade de gás usada nessa etapa é a mesma obtida na 2ª etapa. E ainda se considera que todo o biogás obtido será queimado para a geração de energia. A composição típica do biogás é cerca de 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de hidrogênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, aminas voláteis e oxigênio. Dependendo da eficiência do processo, influenciado por fatores como pressão e temperatura durante a fermentação, o biogás pode conter entre 40% e 80% de metano (PECORA, 2006). Existem diversas tecnologias para efetuar a conversão energética do biogás. Entende-se por conversão energética o processo que transforma um tipo de energia em outro.

No caso do biogás, a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada (relação da mistura entre ar e combustível). Essa energia mecânica ativa um alternador que a converte em energia elétrica. Ainda é possível mencionar a queima direta do biogás em caldeiras para co-geração ou energia térmica e do surgimento de novas tecnologias, porém não comerciais atualmente, como a da célula combustível, mas as turbinas a gás e os motores de combustão interna do tipo “Ciclo – Otto” são as tecnologias mais utilizadas para esse tipo de conversão energética. (COSTA, 2006).

O poder calorífico inferior do biogás, varia de acordo com o percentual de metano e CO₂, sendo que quanto maior o teor de metano presente no biogás, maior será o poder calorífico deste último. No entanto, a adoção de um valor de poder calorífico do biogás, pode não gerar um resultado muito confiável, uma vez que existem outros componentes, além do CO₂ e metano, presentes no biogás lavado, como os gases oxigênio e nitrogênio. Visto isso, propõe-se calcular a energia térmica do biogás por meio do cálculo da energia gerada pelo gás metano presente na composição do biogás lavado, uma vez que o metano é a substância responsável pela geração de energia.

No trabalho de Fraga (2019), o biogás gerado pela biodigestão anaeróbica do licor da lignina continha um percentual de 47% metano. Conforme os cálculos de balanço de massa uma vazão de biogás igual a 9915,6 m³ foi obtida, conforme Tabela 6, e considerando um teor de metano de 47% (FRAGA, 2019). Sendo assim, foi possível calcular os dados de produção de energia elétrica produzida pela queima do biogás, utilizando as equações 5, 6 e 7. Dessa forma a Energia térmica disponível no biogás produzido (Et) foi de 84.282,515 kcal/dia, e a sua potência elétrica (PE_{biogás}) foi de 1,286 kW. Sendo assim, a energia elétrica produzida foi de 925,8 kW/mês.

Considerando o valor calculado de energia elétrica (925,8 kW/mês), produzida a partir do biogás proveniente da biodigestão da lignina, é possível gerar energia suficiente para alimentar 5 residências da região sudeste do país, tomando como base o consumo médio de 173 kW/mês, conforme fornecido pelo Ministério de Minas e Energia (Tabela 6).

Os dados obtidos possibilitaram observar a viabilidade da produção de energia do biogás de acordo com o método desenvolvido por (FRAGA, 2019) visando assim à eliminação da lignina do meio ambiente e a geração de retorno financeiro ao processo.

Tabela 6- Dados de população e consumo energético da região Sudeste do país adaptado do Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2020

Região Sudeste	Ano/2019
População	88371 mil
Consumo da rede	238.451 GWh
Consumo per capta	2,7 kWh/hab
Consumidores	37,238 mil
Consumidores Residenciais	32.957 mil
Consumo médio	534 kWh/mês
Consumo Residencial médio	173 kWh/mês

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2020)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O biogás gerado a partir da biodigestão anaeróbia do efluente da lignina, levando em conta uma quantidade processada de 24 tn/dia de bagaço de cana, apresentou um potencial energético de 925,8 kWh/mês. Portanto além das vantagens na redução da geração de efluentes de lignina no processo de produção de álcool de segunda geração, ressalta-se a importância da avaliação econômica desse processo que possa ser realizada em estudos posteriores, levando-se em conta os custos de produção e implementação do sistema de tratamento até a venda da energia gerada pela queima do biogás.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG, CNPq e UFSJ pelo apoio financeiro na execução do projeto trabalho de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, H. R. R. D. Produção de Etanol de Segunda Geração. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 85. 2017.
- BROWN, M. E.; CHANG, M. C. Exploring Bacterial Lignin Degradation. *Current Opinion Chemical Biology*, Berkeley, v. 19, p. 1-7, 2014.
- CANILHA, L. CHANDEL, A. K. et al. Bioconversion of Sugarcane Biomass into Ethanol: An Overview about Composition, Pretreatment Methods, Detoxification of Hydrolysates, Enzymatic Saccharification, and Ethanol Fermentation. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, v. 7, 2012(7).
- CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, Brasília, v. 8 – Safra 2021-22, n. 3- Terceiro levantamento, p. 1-63 Novembro 2021.
- COSTA, D. F. Geração de Energia Elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto. Dissertação (Mestrado em Energia). São Paulo: [s.n.]. 2006.
- DA ROSA S. E. S., GARCIA, J. L. F. O etanol de segunda geração: limites e oportunidades. *Revista do BNDES* v. 32, p. 117 – 156, dezembro 2009.
- FELDER, R. M.; ROUSSEAU, R. W. Fundamentos de Balanço de Massa. In: FELDER, R. M.; ROUSSEAU, R. W. *Princípios Elementares de Processos Químicos*. 3ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. Cap. 4, p. 604.
- FRAGA, M. B. F. Biodigestão Anaeróbica do Efluente da Lignina Proveniente do Processo de Produção do Etanol de Segunda Geração. Universidade Federal de São João del-Rei. Ouro Branco, p. 63. 2019.
- GARGUIAK, J. D.; LEBO, S. E. Commercial Use of Lignin-Based Materials. In: _____ *Lignin: Historical, Biological, and Materials Perspectives*. Washington,DC: American Chemical Society, v. 742, 1999. Cap. 15, p. 304-320.
- LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C. Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 106. 2012.
- LORA, J. H.; GLASSER, W. G. Recent Industrial Applications of Lignin: A Sustainable Alternative to Nonrenewable Materials. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 10, p. 39-48, Abril 2002.
- MARTINS F. A, MARTIM, T. CORRÊA, A. M. DE OLIVEIRA F. F. A produção do etanol de segunda geração a partir do bagaço da cana-de-açúcar. *Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção*, v. 2, n. 3, 2014.
- Ministério de Minas e Energia. Anuário estatístico de energia elétrica 2020. Disponível em :<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/EPEFactSheetAnuario.pdf>.
- MULAT, D. G.; DIBDIAKOVA, J.; HORN, S. J. Microbial biogas production from hydrolysis lignin: insight into lignin structural changes. *Biotechnol for Biofuels*. [S.l.], p. 61. 2018.

OGEDA, T.; PETRI, F. S. HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DE BIOMASSA. *Quim. Nova*, v. XXXIII, n. 7, p. 1549-1558, 2010.

PECORA, V. Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 156. 2006.

ROCHA, G. J. M. MARTINS, C. et al. Mass balance of pilot-scale pretreatment of sugarcane bagasse by steam explosion followed by alkaline delignification. *Bioresource Technology*, v. 111, p. 447-452, 2012.

ROCHA, G. J. M. Nascimento, V. M. et al. Contributing to the environmental sustainability of the second generation ethanol production: Delignification of sugarcane bagasse with sodium hydroxide recycling. *Industrial Crops and Products*, v. 59, p. 63-68, 2014.

SALIBA, E. D. O. S.; RODRIGUEZ, N. M.; MORAIS, S. A. L. Ligninas – métodos de obtenção e caracterização química. *Ciência Rural*, Santa Maria, 2001. 917-928.

STEWART, D. Lignin as a base material for materials applications: Chemistry, application and economics. *Industrial crops and products*, Dundee, v. 27, n. 2, p. 202-207, 2008.

SZYMANSKI, M. S. E.; BALBINOT, SCHIRMER, W. N. Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono-estudo de caso. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 31, n. 4, p. 901-912, 2010.

VANHOLME, R. DEMEDTS. D; et al. Lignin Biosynthesis and Structure. *Plant Physiology*, v. 153, n. 3, p. 895-905, 2010.