

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

TALLES JOSÉ BERNARDO TOLÊDO

**POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS PRODUZIDO A PARTIR DE ESTERCO  
BOVINO E BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE ALAGOAS**

RIO LARGO - AL

2023

TALLES JOSÉ BERNARDO TOLÊDO

**POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS PRODUZIDO A PARTIR DE ESTERCO  
BOVINO E BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE ALAGOAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharelado em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Amanda Santana Peiter

Coorientador: Me. Marcílio Ferreira de Melo Neto

RIO LARGO – AL

2023

**Catálogo na Fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias**  
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

T649p Tolêdo, Talles José Bernardo.

Potencial energético do biogás produzido a partir de esterco bovino e bagaço da cana-de-açúcar no estado de Alagoas / Talles José Bernardo Tolêdo. – 2023.

48f.: il.

Orientadora: Amanda Santana Peiter.

Co-orientador(a): Marcílio Ferreira de Melo Neto.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Graduação em Engenharia de Energia, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2023.

Inclui bibliografia

1. Cana-de-açúcar. 2. Bovinocultura. 3. Biomassa. 4. Energia renovável.  
5. Potencial energético. I. Título.

CDU: 636.2: 620.9

## Folha de Aprovação

TALLES JOSÉ BERNARDO TOLÊDO

Potencial energético do biogás produzido a partir de esterco bovino e bagaço da cana-de-açúcar no estado de Alagoas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Energia pela Universidade Federal de Alagoas. Aprovado em 13 de fevereiro de 2023.

Documento assinado digitalmente  
 AMANDA SANTANA PEITER  
Data: 16/02/2023 11:07:51-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Profa. Dra. Amanda Santana Peiter, CECA/UFAL (Orientadora)

Documento assinado digitalmente  
 MARCILIO FERREIRA DE MELO NETO  
Data: 16/02/2023 15:21:26-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Prof. Me. Marcílio Ferreira de Melo Neto, SEMARH/AL (Coorientador)

### Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 ANDREA DE VASCONCELOS FREITAS PINTO  
Data: 16/02/2023 14:38:08-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Profa. Dra. Andrea de Vasconcelos Freitas Pinto, CECA/UFAL (1ª Avaliadora)

Documento assinado digitalmente  
 CELSO FIDELIS DE MOURA JUNIOR  
Data: 16/02/2023 16:00:29-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Prof. Dr. Celso Fidelis de Moura Junior, UNICAMP (2º Avaliador)

Dedico este trabalho ao meu pai, Nilson Tolêdo dos Santos (*in memoriam*), que foi o meu maior exemplo de homem e incentivador da concretização dos meus sonhos e, ao meu irmão, Nilson Tolêdo dos Santos Júnior (*in memoriam*), que com o seu jeito de ser, sempre torceu pelo meu sucesso.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde, força e por me sustentar para superar todas as minhas perdas e dificuldades que até aqui enfrentei.

Aos meus amados pais, Nilson Tolêdo (*In Memoriam*) e Quitéria Tolêdo, meus maiores exemplos de vida, por todo amor, apoio e dedicação para que eu pudesse conquistar os meus objetivos. Vocês que me educaram e me tornaram o que sou hoje. Obrigado por não me deixarem desistir quando eu muitas vezes duvidei da minha capacidade. Amo vocês e terão sempre minha eterna gratidão.

Aos meus irmãos, Nilson Júnior (*In Memoriam*), Lucas e Mateus que sempre torceram por mim e acreditaram no meu sonho. Sei que estão felizes e orgulhosos por essa conquista.

Aos meus familiares, por todas as palavras de encorajamento. Meus sinceros agradecimentos.

Agradeço a minha professora que na reta final da minha trajetória na universidade, se sensibilizou e como sempre compreensível aceitou o meu convite e se tornou minha orientadora me guiando da melhor forma possível para que este trabalho pudesse ser realizado, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Amanda Santana Peiter. De todo o meu coração, muito obrigado por tudo!

Agradeço ao meu coorientador e amigo, Marcílio Ferreira de Melo Neto, por todo suporte, incentivo, paciência e colaboração na elaboração deste trabalho. Você foi fundamental para que eu conseguisse finalizar este ciclo da minha vida. Gratidão sempre amigo.

Agradeço aos meus professores, em especial a professora Andrea de Vasconcelos, que nesta jornada acadêmica me acompanhou, me orientou, compartilhou seus conhecimentos me ajudando no profissional que estou me tornando. Obrigado a todos, por não somente terem me ensinado, mas por terem me feito aprender.

Agradeço aos meus amigos e colegas que conquistei na minha vida acadêmica, pelas longas horas de estudos, pelos momentos de alegrias, pelos momentos de anseios que passamos juntos neste período. À minha grande amiga Miryam Cunha, parceira desde sempre, que esteve comigo em todos os momentos, por compartilhar seus conhecimentos, por dedicar seu tempo para me ajudar mesmo tendo seus compromissos, pela paciência e orientações. Você foi essencial na minha formação, obrigado pela sua amizade.

À minha amiga Luana Freire, por se fazer presente de maneira tão constante em minha vida, por sempre me ouvir, me aconselhar, torcer pelas minhas conquistas e felicidades, por ser esse ser humano cheio de luz que me contagia sempre. Amo você!

Aos meus queridos amigos que fiz na graduação e que me acompanharão para a vida, Mardônio, Ana Carolina, Thailys, Simone, Guido e outros que fizeram a minha árdua rotina acadêmica mais leve com suas companhias. Meu muito obrigado!

Aos meus amigos que a minha vida me deu, Rafaela, Marcell, Sibelle, Elline, Nayana, Nathan, Camila, Gillyard grato por todo apoio, incentivo e a torcida de sempre. Sei que com vocês posso contar. Amo cada um!

Meu muito obrigado à cada pessoa que passou pela minha vida nessa fase, todos aqueles que acreditaram quando nem eu mesmo acreditava. Eu consegui, e vocês fizeram parte dessa conquista!

Minha eterna gratidão.

*“Que os vossos esforços  
desafiem as impossibilidades,  
lembrai-vos de que as  
grandes coisas do homem  
foram conquistadas  
do que parecia impossível.”*

*(Charles Chaplin)*

## RESUMO

A preocupação com a crise energética nas últimas décadas tem levado o mundo a buscar novas fontes alternativas de energia, preferencialmente fontes renováveis. Dentre as diversas fontes alternativas de energia, o biogás vem ganhando destaque por ser facilmente produzido a partir da digestão anaeróbia de substratos orgânicos que possuem diferentes potenciais energéticos. O bagaço de cana-de-açúcar e o esterco bovino se mostram como potenciais substratos fermentativos para produção de biogás devido à abundância dessas matérias-primas no Brasil, em especial no estado de Alagoas. Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo realizar uma análise comparativa do potencial energético de dois extratos fermentativos (esterco bovino e bagaço da cana-de-açúcar) no Estado de Alagoas. Para obtenção dos dados de produção de esterco e bagaço, foi realizado um levantamento da literatura em plataformas de busca científica como Science Direct, Google Acadêmico, PubMed e Periódico Capes, IBGE, EMBRAPA e Única, e estimado o potencial de geração de biogás a partir de modelos matemáticos previamente disponíveis na literatura. Para obtenção dos resultados houve auxílio dos softwares Excel e Origin 8.0, gerando gráficos e figuras com análises dos dados obtidos. Os resultados indicaram que o esterco bovino seria capaz de gerar, em média, 12,4 MW de energia, quando utilizando um motor para geração de energia com rendimento de 29%, sendo inferior ao apresentado pelo bagaço da cana-de-açúcar que foi de 390,4 MW. Além disso, toda energia gerada pelo bagaço seria suficiente para fazer o abastecimento das usinas do estado e ainda fornecer para a população de todo o estado. Mediante ao exposto foi possível concluir que o Estado de Alagoas possui um grande potencial para produção de energia limpa proveniente da biomassa, principalmente daquela advinda do bagaço da cana-de-açúcar.

**Palavras-chave:** cana-de-açúcar; bovinocultura; biomassa; energia renovável; potencial energético.

## ABSTRACT

The concern with the energy crisis in recent decades has led the world to seek new alternative sources of energy, preferably renewable sources. Among the various alternative sources of energy, biogas has been gaining prominence because it is easily produced from the anaerobic digestion of organic substrates that have different energy potentials. Sugarcane bagasse and cattle manure are potential fermentation substrates for biogas production due to the abundance of these raw materials in Brazil, especially in the state of Alagoas. Given the above, the present work aimed to carry out a comparative analysis of the energy potential of two fermentative extracts (bovine manure and sugarcane bagasse) in the State of Alagoas. To obtain manure and bagasse production data, a literature on scientific search platforms such as Science Direct, Google Scholar, PubMed, Periodical Capes, IBGE, EMBRAPA and Única, survey was carried out and the potential for biogas generation was estimated based on mathematical models previously available in the literature. Excel and Origin 8.0 software were used to obtain the results, generating graphs and figures with analysis of the data obtained. The results indicated that cattle manure would be capable of generating, on average, 12,4 MW of energy, when using an engine for energy generation with a yield of 29%, being lower than that presented by the sugarcane bagasse which was 390.4 MW. In addition, all the energy generated by the bagasse would be enough to supply the state's plants and supply the population of the entire state. Based on the above, it was possible to conclude that the State of Alagoas has great potential to produce clean energy from biomass, mainly from sugarcane bagasse.

**Keywords:** sugar cane; cattle breeding; biomass; renewable energy; energy potential.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Oferta Interna de Energia Elétrica .....	13
<b>Figura 2</b> - Oferta Interna de Energia 2022.....	14
<b>Figura 3</b> - Esquema das etapas de produção do biogás por digestão anaeróbia .....	17
<b>Figura 4</b> - Representação esquemática do funcionamento de um reator do tipo UASB. ....	21
<b>Figura 5</b> - Representação esquemática de um biodigestor do tipo CSTR. ....	22
<b>Figura 6</b> - Representação esquemática do biodigestor do tipo lagoa coberta.....	23
<b>Figura 7</b> - Número anual e cumulativo de estudos disponíveis na plataforma Science Direct na última década, utilizando as palavras-chave "biogás" AND "biomass" AND "fermentation" .....	30
<b>Figura 8</b> - Cartograma da bovinocultura do Estado de Alagoas no ano de 2021. ....	32
<b>Figura 9</b> - Capacidade instalada de produção de energia elétrica proveniente da queima de biogás em diferentes equipamentos de geração de energia .....	33
<b>Figura 10</b> - Série temporal da produção de cana-de-açúcar nos últimos 10 anos no Estado de Alagoas segundo dados da Unica (2022).....	35
<b>Figura 11</b> - Dados de produção de bagaço no Estado de Alagoas.....	36
<b>Figura 12</b> - Capacidade instalada para geração de energia do bagaço da cana-de-açúcar no Estado de Alagoas .....	37

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Poder calorífico do biogás relacionado à sua composição. ....	16
<b>Tabela 2</b> - Pontos importantes para escolha do sistema de biodigestão.....	20
<b>Tabela 3</b> - Resumo da produção de biogás a partir do bagaço da cana-de-açúcar. ....	25
<b>Tabela 4</b> - Produção diária de esterco por animais de raças leiteiras com 87,3% de umidade, 933,0 kg/m <sup>3</sup> de densidade e conteúdo em nutrientes .....	31
<b>Tabela 5</b> - Balanço energético da produção de biogás a partir de esterco bovino em Alagoas. ....	31
<b>Tabela 6</b> - Composição química média da análise elemental do bagaço da cana-de-açúcar. ....	34

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Matriz Energética Brasileira .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Biogás .....</b>	<b>14</b>
2.2.1 Digestão anaeróbia .....	16
<b>2.3 Biodigestores.....</b>	<b>19</b>
<b>2.4 Biomassa .....</b>	<b>23</b>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1 Coleta e Análise dos Dados.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2 Potencial Energético do Esterco Bovino .....</b>	<b>26</b>
3.2.1 Estimativa da produção de esterco bovino .....	26
3.2.2 Produção diária de biogás .....	27
3.2.3 Valor energético do biogás.....	27
3.2.4 Produção de energia elétrica .....	27
<b>3.3 Potencial Energético do Bagaço da Cana-de-Açúcar .....</b>	<b>28</b>
3.3.1. Determinação do poder calorífico inferior e o poder calorífico útil do bagaço da cana-de-açúcar.....	28
3.3.2. Geração de energia .....	28
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>30</b>
<b>4.1 Potencial Energético do Esterco Bovino .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2 Potencial Energético do Bagaço da Cana-de-Açúcar .....</b>	<b>33</b>
<b>4.3 Análise Comparativa .....</b>	<b>37</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>39</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>40</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas uma maior preocupação acerca da crise energética mundial tem sido pauta de discussões, como o retardamento do efeito estufa pela redução da emissão de gases nocivos à atmosfera proposto pelo Acordo de Paris (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2015). Os danos causados à atmosfera pela emissão de gases proveniente da queima dos combustíveis fósseis, principal fonte de energia, ocasionaram ao longo dos anos mudanças climáticas, o que acendeu um alerta na sociedade e levou à necessidade da elaboração de políticas de desenvolvimento de pesquisas e estudos técnicos, econômicos e de impactos ambientais para o emprego de energias alternativas, seja a partir de matriz orgânica (como exemplo, a biomassa), a força dos ventos (energia eólica), captação da luz solar (energia solar) ou a partir de pequenas centrais hidrelétricas (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2018).

Dentre as inúmeras fontes de energia alternativa, o biogás, que produzido a partir da digestão anaeróbia da matéria orgânica presente em efluentes e resíduos domésticos, industriais e agropecuários, representa uma fonte alternativa e renovável de energia cada vez mais utilizada. Em 2021, a capacidade mundial de geração de energia elétrica foi de 21.574 MW, um aumento de 188,4% comparado ao ano de 2011 (IRENA, 2021).

No Brasil, a elevada população e sua concentração em grandes centros urbanos e a expressiva produção agropecuária e agroindustrial indicam um potencial significativo de produção de biogás, cuja capacidade instalada correspondente a 2,1% da capacidade mundial (IRENA, 2020). Entretanto, dados da ANEEL (2021) demonstraram que a capacidade instalada no Brasil equivale a 1,5%, sugerindo que o atual aproveitamento do biogás no Brasil encontra-se muito aquém do seu potencial, mesmo com as variáveis propícias à produção. Em Alagoas, a principal fonte de matéria orgânica animal é o esterco bovino, produzidos por cerca de 1,2 milhão de cabeças (IBGE, 2020), seguido pelo bagaço de cana-de-açúcar - resíduo oriundo do processamento da cana-de-açúcar pelas usinas para a produção de etanol e açúcar – que também é produzido em larga escala (SINDAÇUCAR, 2022).

Mediante ao exposto, é sabido que existem diferenças de potencial energético entre matérias-primas de biomassa para a produção de biogás, e dada importância da utilização da energia renovável como alternativa para geração de energia e minimização de taxas de poluição e contaminação do meio ambiente por uso de fontes não renováveis, o presente estudo buscou avaliar comparativamente através de uma revisão de literatura o potencial de

substratos fermentativos para a produção de biogás abundantes em Alagoas, o que poderá contribuir para um melhor aproveitamento, manejo, viabilidade e conhecimento da biomassa disponível, como também possíveis benefícios na produção (ex.: redução de custos e emissão de gases nocivos à atmosfera). E, a partir dos dados disponíveis na literatura especializada, identificar o substrato fermentativo com melhor potencial energético para produção de biogás

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

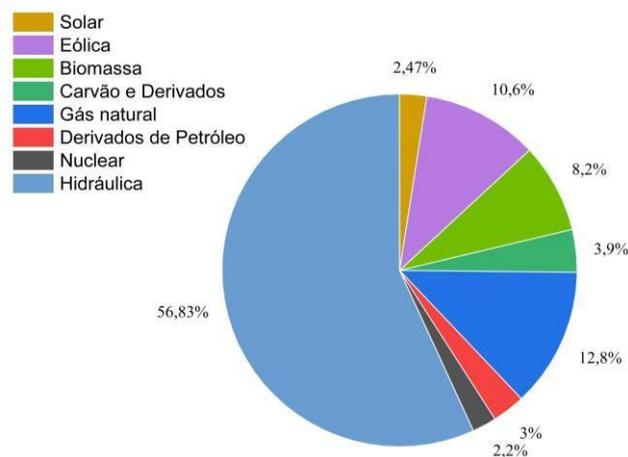
### 2.1 Matriz Energética Brasileira

A energia é um componente necessário para a evolução do sistema de vida, a qual acompanha o desenvolvimento e progresso da própria humanidade. Basta pensar que a energia, inicialmente, era extraída do uso da madeira, passando ao carvão e posteriormente para o óleo, de forma que em cada progresso, gradativamente, passou a vir de fontes mais eficientes e sustentáveis, como as energias renováveis disponíveis na atualidade (LEPOIRE; CHANDRANKUNNEL, 2020).

Historicamente, a energia hidrotérmica é o modelo de geração de energia elétrica brasileira. Essa fonte de energia renovável se sobressai na produção de eletricidade, sendo as termoelétricas uma espécie de *backup* para situações de instabilidade do recurso, como no caso de períodos de estiagem. O Brasil encontra-se em uma transição energética em virtude da imprevisibilidade do recurso hídrico, além dos aspectos relacionados a construção e o impacto causado por esse tipo de usina, que acabam impulsionando a diversificação da matriz energética nacional (CAVADOS, 2015).

Segundo Balanço Energético Nacional (2022), ano base 2021, o Brasil dispõe de uma matriz elétrica predominantemente renovável, sendo o destaque para a fonte hídrica que corresponde a 53,4% da oferta interna de energia elétrica (Figura 1), sendo que quase a totalidade das importações são oriundas da usina de Itaipu, a qual atinge em torno de 57%.

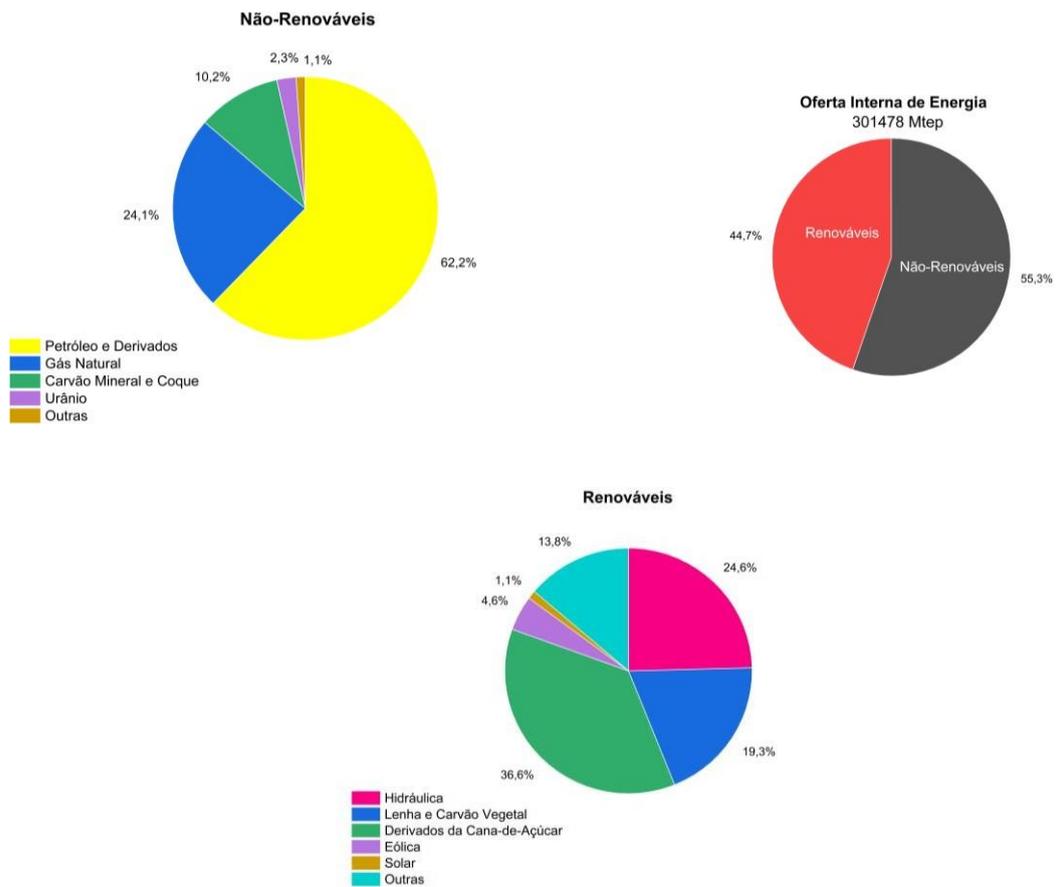
**Figura 1** - Oferta Interna de Energia Elétrica.



Fonte: Adaptado de EPE (2022).

Ainda de acordo com o balanço energético nacional de 2022, a matriz energética brasileira é formada, principalmente, por fontes de energia não renováveis (correspondendo a 55,3% do total), enquanto as fontes renováveis correspondem a 44,7% da oferta, como ilustrado na Figura 2. O petróleo e seus derivados representam a principal fonte não renovável, enquanto os derivados da cana-de-açúcar das renováveis.

**Figura 2** - Oferta Interna de Energia 2022.



Fonte: Adaptado de EPE (2022).

## 2.2 Biogás

Gás do pântano ou fogo fátuo, como era conhecido o biogás, foi descoberto pelo cientista inglês Thomas Shirley em 1667. No entanto, só foi identificado que se tratava de gás metano um tempo mais tarde, em 1770, mas só em 1895 foi feito o primeiro experimento na Inglaterra para utilização do biogás na iluminação de algumas ruas (ICLEI, 2009).

No Brasil, o interesse mais forte pelo biogás se deu nas décadas de 70 e 80, particularmente, entre os suinocultores, impulsionado por programas oficiais do governo que estimularam a implementação de diversos biodigestores realizado, sobretudo, na produção de fertilizantes, geração de energia e na redução do impacto ambiental (ICLEI, 2009). Nos anos 2000, o interesse por matrizes, em especial as alternativas (ventos, energia solar e biomassa), ganhou um grande destaque, impulsionando o estudo e o desenvolvimento de biogás a partir de biomassas diversas (SILVA; CAVALIERO, 2004). Entretanto, a participação do biogás na matriz elétrica brasileira ainda é um pouco expressiva - apenas 0,08% - quando comparado, por exemplo, com países da União Europeia (UDAETA et al., 2019).

De acordo com Milanez et al. (2018), a diferença entre o biogás e as outras fontes de energia renovável, como solar e eólica, é o fato dele ser produzido continuamente, além do baixo custo para estocá-lo tanto com matéria-prima como também na forma de gás comprimido. Quando oriundo da agropecuária, a produção de biogás é também fonte de garantia energética, pois reduz os empecilhos de atendimento da necessidade por energia elétrica em áreas sem energia elétrica. Além disso, a purificação desse material o faz um substituto ideal do gás natural em todas as suas aplicações, sendo uma fonte de energia com grande potencial de utilização.

A produção de biogás é resultado da degradação natural da matéria orgânica por microrganismos em condições anaeróbias. A digestão anaeróbia converte matéria orgânica em biogás, que é um combustível renovável e pode ser aplicado na produção de eletricidade, calor ou como combustível para veículos, além de reduzir os riscos ambientais que estão associados ao manejo de resíduos (JIANG; SOMMER; CHRISTENSEN, 2011; SCARLAT; DALLEMAND; FAHL, 2018). O biogás é composto, em sua grande proporção, de metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), além de apresentar quantidades menores de amônia ( $\text{NH}_3$ ), ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), vestígios de hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), nitrogênio ( $\text{O}_2$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), oxigênio ( $\text{O}_2$ ) e carboidratos. A quantidade de metano produzido, verificado pelo medidor do potencial energético do biogás, varia entre 40 e 80% de metano a depender da eficiência do processo, a qual sofre influência de parâmetros físicos, químicos e biológicos, como pressão, temperatura da fermentação e a carga orgânica (SOLOMON; LORA, 2005; COELHO *i.*, 2006; DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

De acordo Cribari (2004), o biogás possui densidade menor que o ar e, portanto, apresenta menor risco de explosão, pois seu acúmulo se torna mais difícil. Em condições normais de produção, não é considerado tóxico, pois contém entre 0% e 0,1% de monóxido de

carbono, no entanto as impurezas do biogás o tornam muito corrosivo, principalmente devido à presença de sulfeto de hidrogênio que, entre outros materiais, provoca oxidação do cobre, latão e aço.

A capacidade energética do biogás é avaliada a partir da sua quantidade de metano, sendo seu poder calorífico diretamente proporcional a concentração de metano presente na mistura gasosa. A Tabela 1, elaborada por Avellar (2001), apresenta os dados da variação do poder calorífico do biogás em relação à sua composição.

**Tabela 1** - Poder calorífico do biogás relacionado à sua composição.

<b>Composição Química do Biogás</b>	<b>Peso Específico (Kg/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)</b>	<b>Poder Calorífico Inferior (kcal/Nm<sup>3</sup>)</b>
<b>10% CH<sub>4</sub>, 90% CO<sub>2</sub></b>	1,8393	465,43	856,06
<b>40% CH<sub>4</sub>, 60% CO<sub>2</sub></b>	1,4643	2338,52	3424,29
<b>60% CH<sub>4</sub>, 40% CO<sub>2</sub></b>	1,2143	4229,98	5136,46
<b>65% CH<sub>4</sub>, 35% CO<sub>2</sub></b>	1,1518	4831,14	5564,50
<b>75% CH<sub>4</sub>, 25% CO<sub>2</sub></b>	1,0268	6253,01	6420,59
<b>95% CH<sub>4</sub>, 5% CO<sub>2</sub></b>	0,7768	10469,6	8132,78
<b>99% CH<sub>4</sub>, 1% CO<sub>2</sub></b>	0,7268	11661,02	8475,23

Fonte: Adaptado de Avellar (2001).

### 2.2.1 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia tem ganhado bastante atenção nos últimos anos, tanto como uma solução para as preocupações ambientais quanto como um recurso energético para o estilo de vida que exige energia elétrica no qual estamos inseridos (ASAM et al., 2011). A digestão anaeróbica tem sido aplicada com sucesso no tratamento de efluentes industriais e domésticos, estabilização de lodo de efluentes, manejo de aterros e reciclagem de resíduos biológicos e agrícolas, como fertilizantes orgânicos. Além disso, cada vez mais os processos de digestão anaeróbica estão sendo usados para degradação de poluentes orgânicos pesados, como os organoclorados ou materiais resistentes ao tratamento aeróbico (YADVIKA et al., 2004).

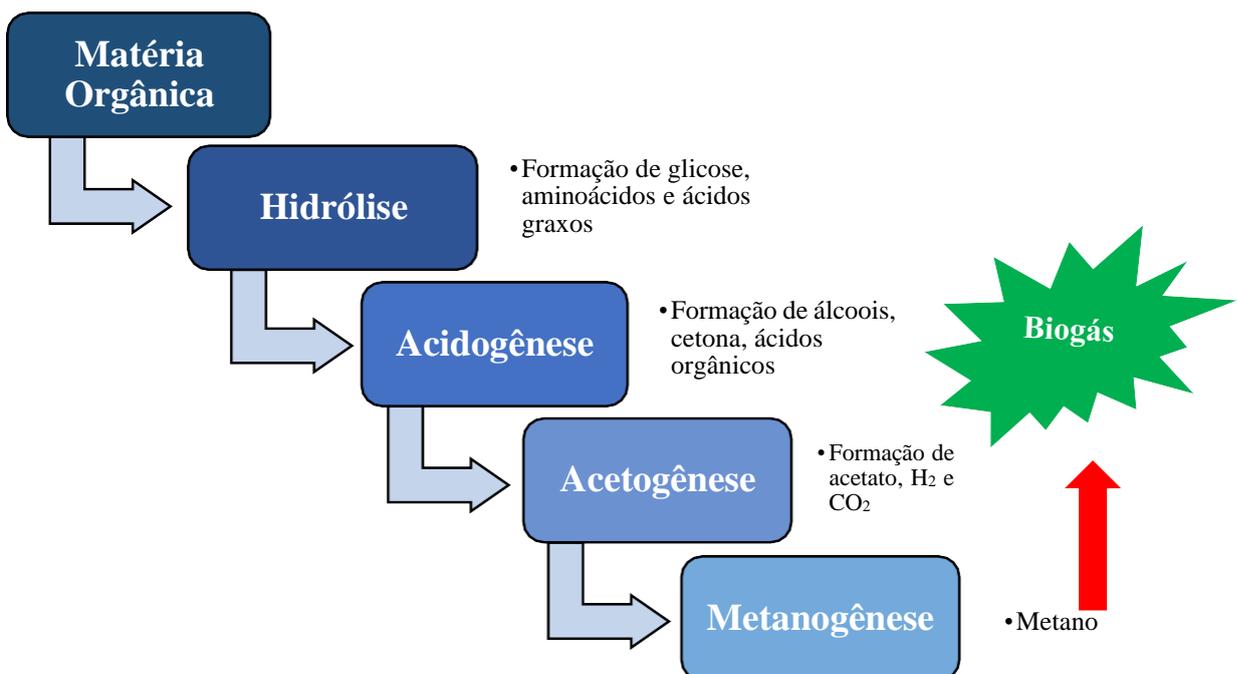
Nos sistemas de biodigestão anaeróbica ou nos processos anaeróbios, a degradação da matéria orgânica envolve a atuação de microrganismos anaeróbios pertencentes ao grupo de bactérias hidrológicas-fermentativas, acetogênicas produtoras de hidrogênio e metanogênicas

(SALOMON; LORA, 2005). De acordo com Deublein e Steinhäuser (2008), esses processos ocorrem, indispensavelmente, através de quatro fases a nível bacteriano. Essas fases são (ADEKUNLE; ARREDORES, 2015):

- **Hidrólise:** envolve a transformação mediada por enzimas de materiais orgânicos insolúveis, além de lipídios, polissacarídeos, proteínas, gorduras etc.;
- **Acidogênese:** ocorre a absorção dos monômeros produzidos na fase hidrolítica por diferentes bactérias anaeróbias facultativas e são, posteriormente, degradados em ácidos orgânicos de cadeia curta;
- **Acetogênese:** os produtos da fase acidogênica são consumidos como substratos para os demais microrganismos. Nessa etapa é realizada a oxidação anaeróbia;
- **Metanogênese:** é a etapa crítica do processo de digestão anaeróbia, pois é a reação bioquímica mais lenta do processo. Nela, bactérias metanogênicas anaeróbias produzem metano e dióxido de carbono a partir de produtos intermediários.

Os processos bioquímicos envolvidos na degradação anaeróbia estão apresentados na Figura 3.

**Figura 3** - Esquema das etapas de produção do biogás por digestão anaeróbia.



Fonte: Adaptado de Bitton (2005).

Para um ótimo desempenho, a digestão anaeróbia depende de vários parâmetros diferentes. Como grupos distintos de microrganismos estão envolvidos no processo de produção de metanol, condições adequadas precisam ser estabelecidas para que todos os microrganismos sejam mantidos em equilíbrio (ASLANZADEH, 2014). De acordo Yadvika *et al.* (2004), o desempenho da usina de biogás pode ser controlado pelo estudo e monitoramento da variação de parâmetros como pH, temperatura de retenção hidráulica, taxa de carregamento orgânico, agitação e relação C:N, sendo a produção de biogás afetada adversamente pela mudança drástica nesses parâmetros. Alguns desses fatores básicos são discutidos a seguir.

**a) Temperatura:** é o fator mais importante que influencia o processo de digestão anaeróbia, pois vários metanogênicos são sensíveis às flutuações de temperatura. Mesmo uma pequena variação na temperatura operacional da digestão anaeróbia pode alterar as atividades biológicas, especialmente bactérias formadoras de metano (LIU *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2018).

**b) Tempo de retenção:** é um parâmetro importante e deve ser mantido por um período adequado para eliminar zonas mortas e obter uma sintrofia eficiente para a geração de microrganismos ativos. Geralmente, o crescimento de microrganismos anaeróbios e a atividade metabólica são lentos e em virtude disso, é recomendado para operação estável da digestão anaeróbia manter o tempo de retenção duas vezes maior que o tempo de geração de metanogênicos de crescimento lento (XU *et al.*, 2018; ZIELS *et al.*, 2018).

**c) pH:** é um parâmetro básico para o crescimento de diferentes microrganismos em vários estágios, o qual tem um papel significativo no desempenho da digestão anaeróbia. Em pHs ácidos o CO<sub>2</sub> se dissolve no substrato e permanece na forma de moléculas neutras, enquanto seu aumento converte o carbono dissolvido em ácido carbônico (STRAUBER *et al.*, 2018).

**d) Relação C/N:** é necessária uma relação equilibrada de C/N para um processo de digestão anaeróbia eficiente, pois ambos os componentes são essenciais para o crescimento bacteriano. Em geral, os microrganismos consomem carbono de 25 a 30x mais rápido que o nitrogênio durante a digestão anaeróbia, logo para atender essa necessidade os

microrganismos precisam de uma proporção de 20 a 30:1 de C para N, com a maior porcentagem de carbono sendo facilmente degradável (FRIEHE et al., 2010).

### 2.3 Biodigestores

A produção de biogás na prática é possível com a utilização de biodigestores. Esses equipamentos são constituídos por uma câmara fechada, onde o material orgânico é colocado em solução aquosa e decomposto, gerando o biogás que será acumulado na parte superior do biodigestor (DEGANUTTI et al., 2022). O biodigestor pode ser classificado de acordo com a forma que é abastecido, podendo ser em batelada ou contínuo. No primeiro tipo, o carregamento da biomassa é realizado diariamente com descarga proporcional após o período adequado à digestão de toda matéria orgânica, enquanto nos modelos contínuos é utilizada a capacidade total de armazenamento de biomassa, fazendo com que tenha a entrada de substrato orgânico para ser processado e a saída do material já tratado (OLIVER, 2008; ARAÚJO, 2017). Ademais, eles podem ser classificados de acordo a forma de alimentação (ascendente ou laminar), pela concentração de sólidos no reator (digestão sólida > 20%, semissólida 10 a 15% e úmida < 10%) ou ainda pelo sistema de agitação (mistura completa, parcial ou sem mistura) (AMARAL; STEINMETZ; AIRTON, 2019).

Segundo Samulak et al. (2010), o baixo custo operacional e de implementação dos biodigestores são as vantagens mais atraentes na utilização desses equipamentos. Além disso, outras vantagens apresentadas são sua excelente eficiência na remoção de diversos poluentes, a fácil operação, controle e manutenção, área operacional baixa e uma elevada vida útil.

Atualmente, existem uma diversa gama de modelos de biodigestores que podem ser utilizados, sendo possível adaptar cada um a realidade e necessidade de biogás. Mas como escolher o biodigestor ideal? O biodigestor adequado, para uma biomassa específica, deve atender os princípios de operação dos biodigestores para que seja realizada a seleção e o planejamento do modelo ideal. A Tabela 2 apresenta os principais pontos para escolha do sistema de biodigestão.

**Tabela 2** - Pontos importantes para escolha do sistema de biodigestão.

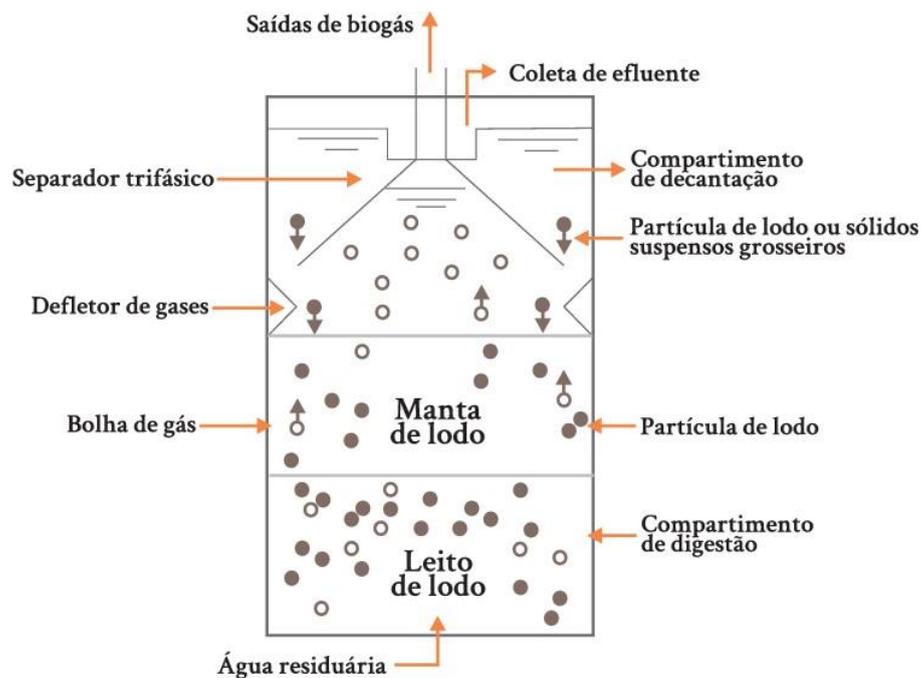
Tecnologia	Pontos-chave	Opções
Sistema de alimentação	Tipo de biodigestor e de matéria-prima para alimentação	Alimentação descontínua para biodigestores batelada; Alimentação contínua ou semicontínua para fluxo em pistão; Sistema de alimentação sólido ou líquido, dependendo do conteúdo da matéria seca do substrato;
Temperatura do reator	Risco para patógenos	Temperaturas mesofílicas quando não há risco de patógenos; Temperaturas termofílicas quando houver risco de patógenos
Número de fases	Composição de substratos, risco de acidificação	Sistema de uma fase quando não há risco de acidificação; Sistema de duas fases para substratos com um elevado teor de açúcar, amido, proteínas ou de difícil degradação;
Sistema de agitação	Matéria-prima seca para alimentação	Agitadores mecânicos para alta concentração de sólidos no biodigestor; Sistemas de agitação mecânica, hidráulica ou pneumática para baixa concentração de sólidos no biodigestor;

Fonte: Amaral; Steinmetz; Airton (2019).

Ainda de acordo Amaral, Steinmetz e Airton (2019), os biodigestores de lagoa coberta, do tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) e CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactors*) são os principais e mais utilizados biodigestores no Brasil.

O reator anaeróbio UASB (Figura 4) é uma tecnologia comum, simples, compacta e barata usada extensivamente no tratamento de efluentes. A estrutura principal desse biodigestor é um leito de lodo denso localizado no fundo, o que garante um bom contato efluente-biomassa. Esse tipo de biodigestor requer menor volume e espaço do reator, apresenta uma maior velocidade de fluxo e produção de biogás, além de acomodar taxas de carga orgânica significativamente mais altas em comparação aos reatores de leito de lodo floculento (MAO et al., 2015).

**Figura 4** - Representação esquemática do funcionamento de um reator do tipo UASB.

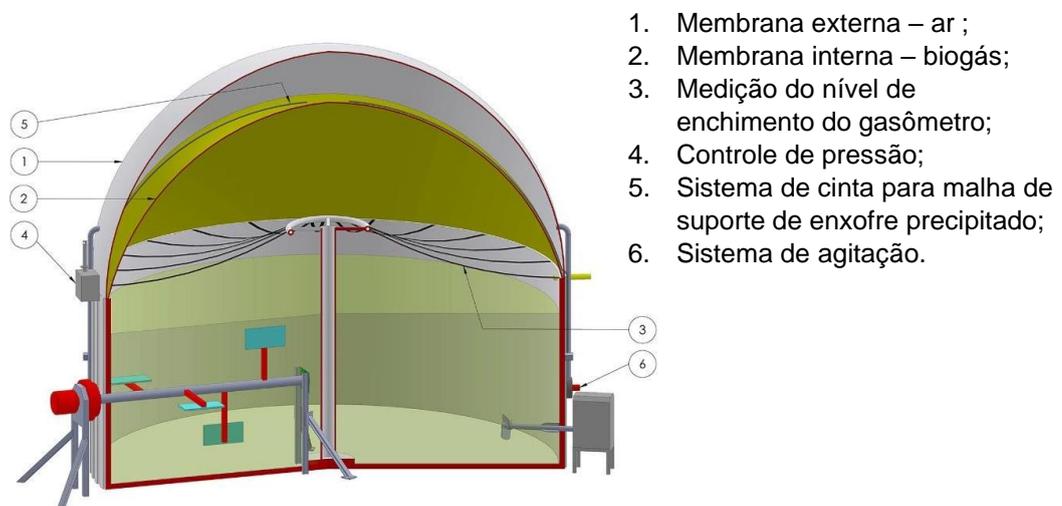


Fonte: Amaral, Steinmetz e Airton (2019)

Um dos reatores anaeróbios de alta taxa mais antigo (primeira geração) é o reator de tranque agitado contínuo (CSTR), representado na Figura 5. Esses reatores são conhecidos por sua fidelidade e é largamente utilizado no tratamento de águas residuais contendo altos níveis de sólidos suspensos durante um processo de digestão anaeróbia, em particular para o tratamento de estrume líquido animal de alta resistência e resíduos industriais orgânicos. Nesses sistemas, os microrganismos são suspensos no digestor por meio de mistura

intermitente ou contínua. O bom contato substrato-lodo é promovida pela mistura completa, além de uma leve resistência a transferência de massa, mas com um consumo significativo de energia e trabalho (HU, 2013). Para uma operação mais eficiente, em termos de qualidade do efluente, esses reatores são operados em sistemas de duas fases. Esses sistemas são mais populares devido à simplicidade do sistema em projeto e operação em comparação com CSTR de único estágio (BOE; ANGELIDAKI, 2009).

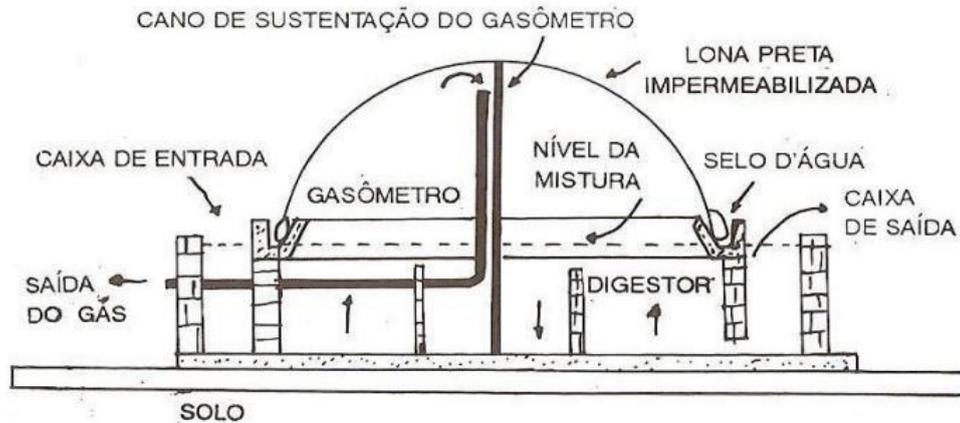
**Figura 5** - Representação esquemática de um biodigestor do tipo CSTR.



Fonte: Adaptado de Barchmann et al. (2016).

Dentre as tecnologias de digestão anaeróbia para o tratamento de dejetos animais, o biodigestor de lagoa coberta (Figura 6), também chamado de “biodigestor canadense”, é o mais amplamente utilizado no Brasil. Esse biodigestor, desenvolvido pela Marinha Brasileira nos anos 70, é reconhecido por ser de fácil instalação e apresentar o menor custo de investimento em comparação com outros reatores, no entanto ainda está em crescimento o entendimento da cinética, das rotas de conversão e dos processos biológicos demonstrados nesses biodigestores (YANG et al., 2016; ARAÚJO, 2017; LOPES et al., 2021).

**Figura 6** - Representação esquemática do biodigestor do tipo lagoa coberta.



Fonte: Araújo (2017).

Após a escolha do tipo ideal de biodigestor, o próximo passo é analisar a quantidade de biomassa disponível para utilização. Somente após isso será possível determinar a capacidade real de produção de biogás de um biodigestor após sua instalação (SEIXAS et al., 1980).

## 2.4 Biomassa

Devido suas características edafoclimáticas, o Brasil possui diversas fontes de biomassa em seu território que prosperam de forma global e competitiva. Com isso, a produção de biomassa no país é vista como um dos caminhos mais prósperos para um futuro energético sustentável (EPE, 2018).

A biomassa é um material orgânico não fóssil e de ocorrência natural (madeira, resíduo vegetal, animal, industrial e urbano), a qual contém energia química intrínseca em que é possível produzir a chamada energia renovável (VIEIRA et al., 2015). Os recursos de biomassa da agricultura, silvicultura e resíduos urbanos são compostos por uma variedade de materiais distintos, que inclui madeira, resíduos de colheitas, serragem, palha, estrume, resíduos de papel, resíduos domésticos e águas residuais. Os resíduos de colheita de biomassa, quando utilizados como fonte alternativa de energia, têm um poder calorífico de cerca de  $3 \times 10^6$  kcal/mg, sendo superior quando comparado com os combustíveis, carvão e óleo diesel (MAO et al., 2018; BROSOWSKI et al., 2019)

De acordo o estudo elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2018), a utilização da biomassa pode ser realizada por rotas tecnológicas distintas, onde o estado físico

dos insumos utilizados é de fundamental importância. De acordo com as vias tecnológicas que permitem maior aproveitamento na conversão para eletricidade, existem os seguintes agrupamentos das biomassas listados abaixo:

- Resíduos da cana-de-açúcar;
- Resíduos da indústria madeireira;
- Palhas das culturas de soja e milho;
- Cascas de arroz e café;
- Resíduos de coco, feijão, amendoim, mandioca e cacau;
- Lodo de estação de tratamento de esgoto;
- Resíduos sólidos urbanos;
- Resíduos das vinícolas.

Obtido como subproduto nas usinas de açúcar e álcool, o bagaço de cana-de-açúcar é um resíduo fibroso lignocelulósico que é gerado durante o processo de esmagamento dos colmos de cana para extração do seu caldo (SANCHEZ et al., 2010). Segundo Zamboni (2022), estima-se que o Brasil produziu 161 milhões de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar durante a safra de 2019/2020. Esse bagaço, em sua maioria é utilizado no processo de cogeração de energia elétrica utilizada na usina elétrica a partir de sua combustão. O restante pode ser aplicado na alimentação de ruminantes, na produção de papel, na produção de etanol e na produção de biogás por digestão anaeróbia. No entanto, como já abordado anteriormente, a digestão anaeróbia é um processo bioquímico complexo e sofre a influência de uma variedade de fatores. Dados da literatura sobre a produção de biogás a partir do bagaço da cana-de-açúcar encontram-se resumidos na Tabela 3.

Devido a seu clima quente e úmido, favorável a plantação e cultivo de cana-de-açúcar, Alagoas se consolidou como um dos principais produtores de cana-de-açúcar do país, ficando atrás apenas dos estados de Minas Gerais e São Paulo. Correspondendo a 45% do PIB alagoano, a indústria canavieira no estado tem grande influência no setor agropecuário, na indústria e no setor de serviços, sendo 60% da indústria e 30% do setor de serviços correlacionados ao setor canavieiro (SANTOS, 2011).

**Tabela 3** - Resumo dos principais parâmetros utilizados na produção de biogás utilizando o bagaço da cana-de-açúcar como substrato fermentativo.

<b>Pré-tratamento</b>	<b>V<sub>reator</sub> (mL)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>Modo fermentativo</b>	<b>Co-substrato</b>	<b>Rendimento de metano (mL/g SV)</b>	<b>Referência</b>
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + hidrotermal</b>	500	37	Lote	-	160,2	Ahmad et al. (2021)
-	210	35	Lote	Palha de trigo e palha de arroz	337,9	Meraj et al. (2021)
<b>Termoquímico + NaOH</b>	2000	37	Lote	Lodo oleoso-biológico	63,5	Ghaleb et al. (2020)
<b>Hidrotermal + enzima</b>	250	37	Digestão anaeróbia de dois estágios	-	141,1	Braga et al. (2018)
<b>NaOH</b>	1000	37	Lote	Lama do filtro	322	Talha et al. (2016)

Fonte: Autor (2022).

Uma outra fonte alternativa de biomassa é o esterco bovino. O Brasil possui o segundo maior rebanho bovino, além de ser o segundo maior produtor de carne bovina do planeta, ficando atrás apenas dos Estados Unidos (SANTOS; NOGUEIRA, 2012). Segundo Bertoncini (2008), a pecuária leiteira responde por 33% da energia eliminada pelo esterco, do qual, quando não geridos de forma adequada, tornam-se uma fonte de poluição dos solos e dos recursos hídricos.

No ano de 2015, o rebanho bovino de Alagoas totalizou 1.255.696, dos quais 38,4% se encontravam na Mesorregião Leste, 27,2% Sertão e 34,4% no Agreste, segundo o IBGE (2016). Sendo os bovinos existentes no semiárido destinados, especialmente, a cadeia produtiva do leite. Nesse mesmo ano, o estado foi o sexto maior produtor de leite da região nordeste, correspondendo a 8,5% da produção da região e 1,0% do total produzido no país.

## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Coleta e Análise dos Dados**

O presente trabalho tratou-se de uma revisão de literatura que englobou análises comparativas entre substratos fermentativos utilizados na produção de biogás. A busca e o desenvolvimento do trabalho se deu por meio de artigos, livros, monografias e dissertações realizados no período compreendido de outubro de 2022 a janeiro de 2023, a partir de periódicos indexados disponíveis em plataformas de busca científica como *Science Direct*, Google Acadêmico, PubMed e Periódico Capes, sendo utilizadas as palavras-chave “*biogas*”, “*biomass*”, “*fermentation*”. Os dados referentes à bovinocultura e produção de cana-de-açúcar no estado de Alagoas foram obtidos principalmente de dados da literatura dos últimos 10 anos. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA e União da Indústria de Cana-de-Açúcar, Etanol, Açúcar e Energia – Única foram as principais fontes utilizadas na aquisição dos dados.

A análise e interpretação dos dados adquiridos e compilados através das buscas na literatura foram organizadas em planilhas eletrônicas por meio do software Excel, onde foram realizadas as avaliações e as devidas interpretações dos dados para a elaboração do estudo comparativo e desenvolvimento de gráficos, via software Origin 8.0, para melhor entendimento dos resultados obtidos.

### **3.2 Potencial Energético do Esterco Bovino**

A estimativa do potencial energético do biogás proveniente de esterco bovino oriundos da bovinocultura do Estado de Alagoas foi determinada conforme as equações reportadas por Santos e Nogueira (2012), descritas nos próximos tópicos. Para o cálculo da produção de biogás e conseqüentemente da geração de energia elétrica a partir do esterco bovino, foi considerado o número total de animais destinados a ordenha no Estado de Alagoas.

#### **3.2.1 Estimativa da produção de esterco bovino**

A estimativa da produção diária de esterco bovino foi determinada utilizada a Equação 1:

$$P_{est} = P_V \cdot V_M \quad (1)$$

onde,  $P_{est}$  = produção diária de esterco (kg/dia);  $P_V$  = peso vivo do animal (kg);  $V_M$  = valor médio de produção de esterco (0,07 kg).

### 3.2.2 Produção diária de biogás

A produção diária de biogás foi determinada a partir da equação 2:

$$P_{biogás} = Product_{biogás} \cdot P_{est} \quad (2)$$

onde,  $P_{biogás}$  = produção diária de biogás (m<sup>3</sup>/dia);  $Product_{biogás}$  = produtividade diária do biogás (m<sup>3</sup>/kg).

### 3.2.3 Valor energético do biogás

O conteúdo energético do biogás foi estimado utilizando-se como parâmetro os valores do poder calorífico inferior (PCI), que para este estudo foi considerado 22.230 kJ/kg, e a produção diária. Sendo o PCI, o poder calorífico quando a água é liberada sob a forma de vapor, e o poder calorífico superior (PCS), quando a água dos gases de combustão é completamente condensada e, portanto, o calor da vaporização também é recuperado (ÇENGEL; BOLES, 2013). O cálculo do conteúdo energético do biogás, então, foi determinado de acordo com a equação 3.

$$V_{ener} = PCI \cdot P_{biogás} \quad (3)$$

onde,  $V_{ener}$  = valor energético estimado do biogás (kJ/kg).

### 3.2.4 Produção de energia elétrica

Utilizando a metodologia proposta pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental CETESB (2002), foi determinada a energia elétrica gerada através do biogás

proveniente do esterco bovino em Alagoas, de acordo a Equação (4), considerando microturbinas de rendimento 27% e um motor gerador de rendimento 30%.

$$E_{elétrica} = E \cdot \eta_{gerador} \cdot PCI \quad (4)$$

onde,  $E_{elétrica}$  = energia elétrica gerada (MJ/dia);  $\eta_{gerador}$  = rendimento do grupo gerador.

### 3.3 Potencial Energético do Bagaço da Cana-de-Açúcar

Para determinar a potência gerada pelo bagaço, foi levado em consideração um bagaço com 50% de umidade, poder calorífico superior (PCS) de 2130 kcal/kg (CORTEZ et al., 2008) e a porcentagem de hidrogênio presente no bagaço como sendo o valor médio (5,6%), visto que a composição química de resíduos lignocelulósicos apresentam esse percentual médio em sua composição.

#### 3.3.1. Determinação do poder calorífico inferior e o poder calorífico útil do bagaço da cana-de-açúcar

O poder calorífico inferior (PCI) foi determinado conforme reportado por Brito (1993), a partir da Equação 5.

$$PCI = PCS - 600(9H/100) \quad (5)$$

Onde, PCS é o poder calorífico superior (cal/g) e H é a porcentagem de hidrogênio presente na composição do bagaço.

O poder calorífico útil (PCU) é o que mais se aproxima da realidade, visto que grande parte dos sistemas de utilização da biomassa para produção de energia não seca o material abaixo de 10% de umidade (Oliveira et al., 2014). Esse parâmetro utiliza o dado de teor da umidade (U) e foi determinado através da Equação 6.

$$PCU = PCI \left[ \frac{100-U}{100} \right] - 6U \quad (6)$$

#### 3.3.2. Geração de energia

Para a estimativa do potencial energético do biogás oriundo do bagaço da cana-de-açúcar, foi levado em consideração que a cada tonelada de cana produzida são produzidos 250 kg de bagaço, de acordo com Torquato e Ramos (2013). Cada 1kg de bagaço produzido gera 2 kg de vapor que, por sua vez produz 0,1 kW de potência elétrica (BALBO, 2013). Além disso, foi considerado que o bagaço apresenta 50% de umidade, sendo seu poder calorífico de 2130 kcal/ kg (CORTEZ et al., 2008).

Por fim, a potência elétrica gerada foi determinada pela Equação 7:

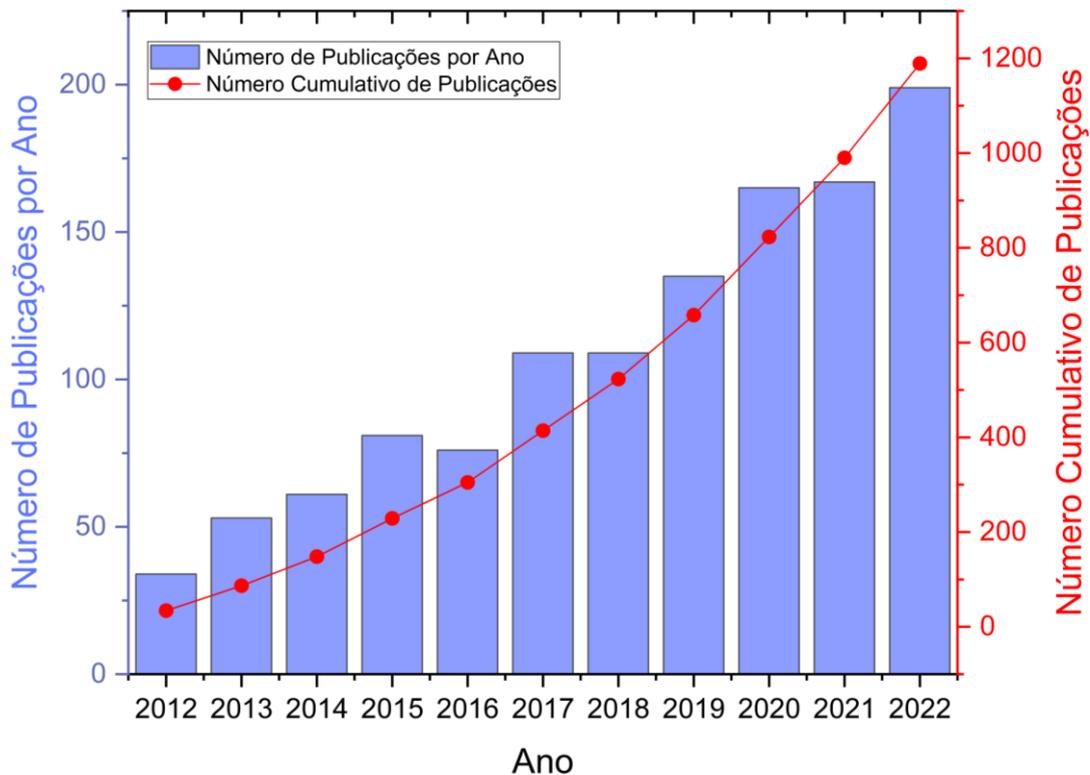
$$P_{elétrica} = E \cdot \eta_{gerador} \cdot PCU \quad (7)$$

Onde, E = produção diária de bagaço (kg/dia).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na última década, o número de publicações envolvendo a produção de biogás a partir de diversos tipos de biomassa vem crescendo, conforme pode ser observado na Figura 7. Essa visualização mostra que o assunto vem chamando grande atenção ao longo dos anos, o que pode ajudar a superar limitações da produção de biogás e aumentar a viabilidade técnica e econômica em sua variada gama de aplicações.

**Figura 7** - Número anual e cumulativo de estudos disponíveis na plataforma Science Direct na última década, utilizando as palavras-chave "biogas" AND "biomass" AND "fermentation".



Fonte: Autor (2022).

### 4.1 Potencial Energético do Esterco Bovino

A Tabela 4 apresenta os dados de quantificação e composição química do esterco bovino produzido, sendo os dados variáveis e influenciados por parâmetros como espécie e raça do animal, idade, tipo de alimentação, material utilizado como cama e o tratamento dado ao esterco (SANTOS; NOGUEIRA, 2012). Avaliando a Tabela 4 é possível observar que

tanto a produção diária de esterco, como o percentual de nutrientes presentes nele é diretamente proporcional ao peso do animal. Segundo Salomon e Lora (2009), a quantidade de esterco produzido varia de acordo com o peso dos animais vivos. Por outro lado, a água ingerida influenciará na produção de urina, variando, assim, a quantidade de excreta líquida.

**Tabela 4** - Produção diária de esterco por animais de raças leiteiras com 87,3% de umidade, 933,0 kg/m<sup>3</sup> de densidade e conteúdo em nutrientes.

Peso do animal (kg)	Produção total de esterco (m <sup>3</sup> /dia)	Conteúdo em nutrientes (g/dia)		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
68	0,005	27,2	10,4	21,8
113	0,009	45,4	20,8	38,2
227	0,019	90,7	37,4	76,5
454	0,037	186,0	75,9	147,5
635	0,052	258,5	106,0	207,6

Fonte: Campos (1997).

A Figura 8 indica que a maior parte do rebanho bovino do estado encontra-se localizado, principalmente, nas regiões do agreste, médio sertão e planalto da Borborema. Segundo dados do IBGE, no ano de 2021, o Estado de Alagoas possuía 1.321.236 cabeças de gado (IBGE, 2022), sendo o efetivo de vacas ordenhadas correspondentes a 15,2%, ou seja, 200.828 cabeças.

A média de peso do gado bovino considerada é de 300 kg e produção diária de 21 kg/cabeça de esterco, o que totaliza de 4.217.388 kg/dia de esterco bovino leiteiro produzido no Estado de Alagoas. Esse resultado, bem como a produção diária de biogás encontram-se sumarizados na Tabela 5.

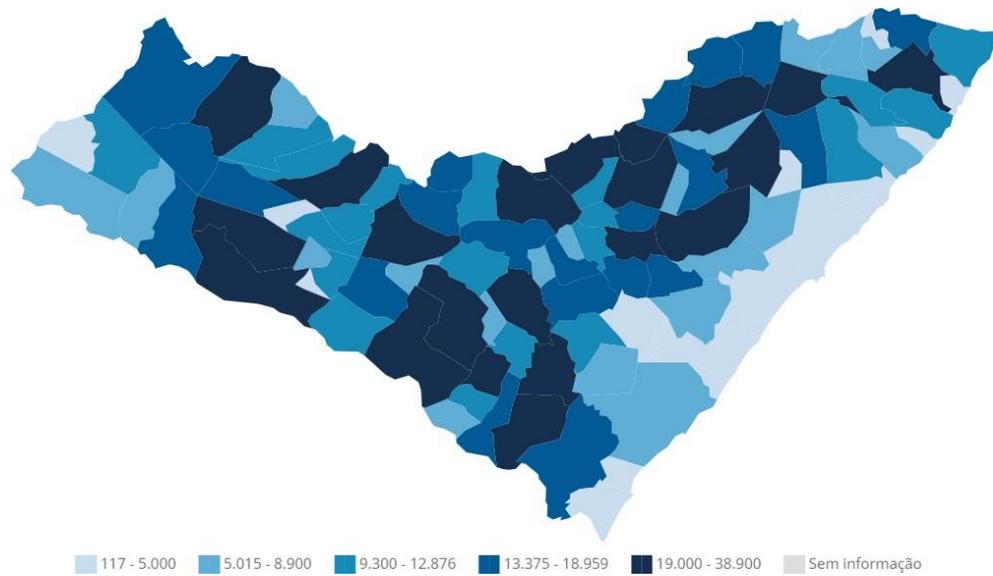
**Tabela 5** - Balanço energético da produção de biogás a partir de esterco bovino em Alagoas.

Produção diária de esterco (kg/dia)	Produtividade do biogás (m <sup>3</sup> /kg)	Produção diária de biogás (m <sup>3</sup> /dia)
4.217.388	0,04*	168.695,52

\*Com base em Santos e Nogueira (2012).

Fonte: Autor (2022).

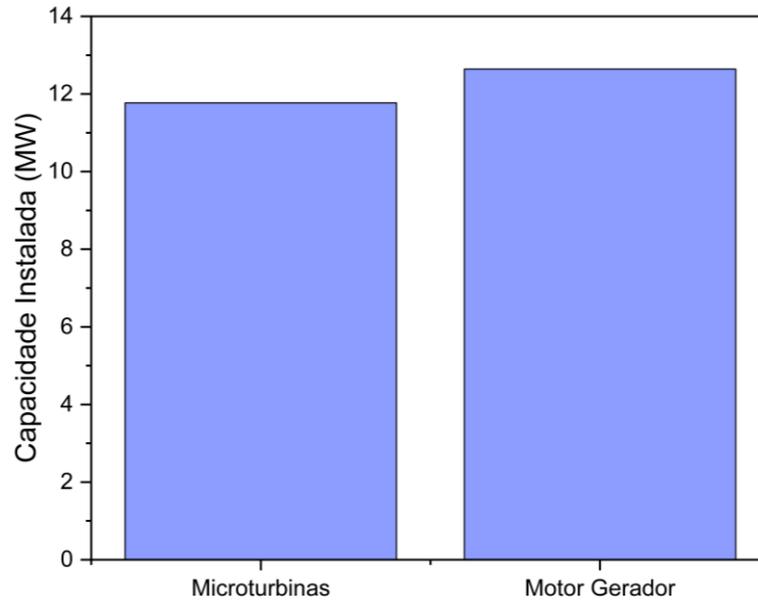
**Figura 8** - Cartograma da bovinocultura do Estado de Alagoas no ano de 2021.



Fonte: IBGE (2022).

Considerando o poder calorífico inferior do biogás proveniente do esterco bovino como sendo 16.235 kJ/kg (SANTOS; NOGUEIRA, 2012), o valor energético do biogás proveniente de biodigestão do esterco bovino leiteiro é de 2.738.849.169,40 kJ/kg. Segundo Salomon e Lora (2009), o potencial de geração de eletricidade a partir da digestão anaeróbia do esterco bovino tem uma geração anual de eletricidade (MW) de 16,68 MW utilizando microturbinas de 30 kW ( $\eta = 27\%$ ) e 21,13 MW quando utilizado um motor gerador de 80 kW ( $\eta = 29\%$ ). No Estado de Alagoas, no ano de 2021, seria possível produzir, utilizando-se as mesmas máquinas avaliadas por Solomon e Lora, 11,7 MW e 12,4 MW de capacidade instalada (Figura 9). Considerando que cada m<sup>3</sup> de biogás gera aproximadamente 1,43 kWh de eletricidade (SGANZERLA, 1983), a energia gerada a partir da transformação do biogás será de 241 MWh/dia.

**Figura 9** - Capacidade instalada de produção de energia elétrica proveniente da queima de biogás em diferentes equipamentos de geração de energia.



Fonte: Autor (2022).

## 4.2 Potencial Energético do Bagaço da Cana-de-Açúcar

Os dados do cultivo de cana-de-açúcar de 2019 mostram cultivo global de 1.949,3 milhões de toneladas, sendo a contribuição do Brasil de 38,6% da produção total (FAO, 2021). Durante o processo de extração do caldo da cana-de-açúcar, o bagaço é gerado como um resíduo com 45 a 50% de umidade. A composição química média revelada pela análise elementar desse bagaço é apresentada na Tabela 6, sendo o percentual de hidrogênio presente no bagaço importante para a determinação de seu potencial energético na geração do biogás (MOHAMMADI et al., 2020; SHARMA et al., 2018).

**Tabela 6** - Composição química média da análise elemental do bagaço da cana-de-açúcar.

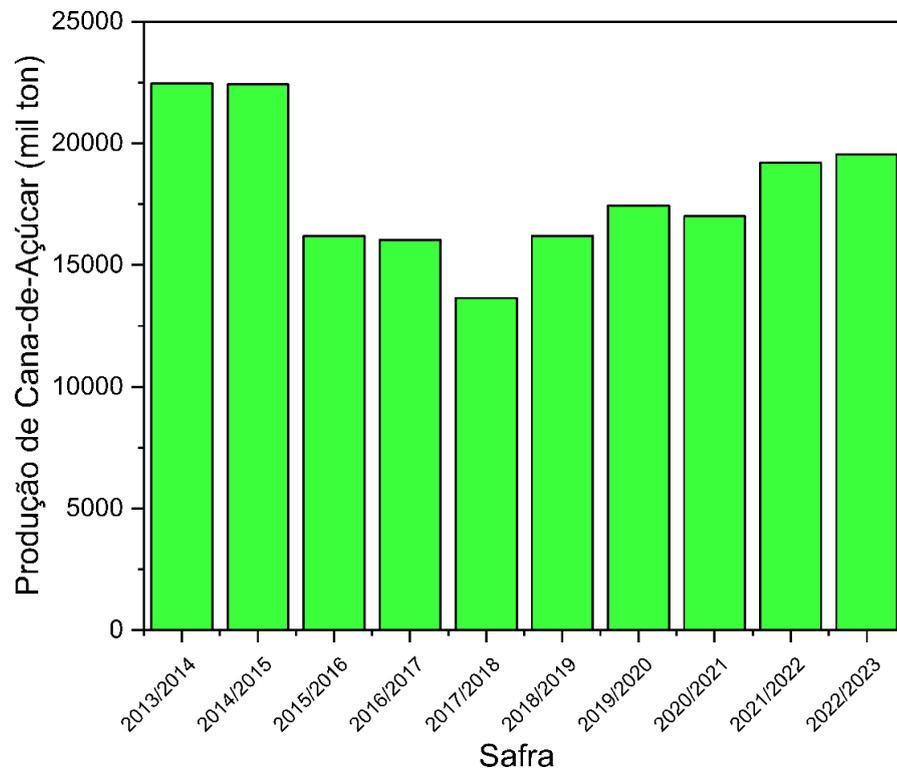
<b>Composição química</b>	
Carbono	44-49,2%
Oxigênio	43-44,7%
Hidrogênio	4,7-6,5%
Nitrogênio	0,2-0,4%
Enxofre	0,1-0,4%
Cinzas	2,7-3,1%

Fonte: Autor (2022).

Com mais de 578 milhões de toneladas de cana-de-açúcar colhidas na safra 2021/2022 (CONAB, 2022), o Brasil é o maior produtor mundial dessa gramínea. Dentre todos os produtos agrícolas produzidos no Brasil, a biomassa da cana-de-açúcar é a quarta mais rentável internacionalmente em um mercado altamente competitivo (OMETTO; HAUSCHILD; ROMA, 2009). No Estado de Alagoas, as indústrias sucroalcooleiras produziram uma safra de 19.555,7 mil toneladas na safra 2022/2023, correspondendo cerca de 14% da produção da região nordeste e 3,15% da produção nacional (UNICA, 2022).

A produção dessa última safra foi 7,3% maior que a safra 2021/2022, sendo o Estado de Alagoas o terceiro maior produtor de cana-de-açúcar do país, ficando atrás apenas dos estados de São Paulo e Minas Gerais. Desse montante, cerca de 70% da cana-de-açúcar produzida no Estado foi destinada a produção de açúcar e 34% para a produção de etanol. A Figura 10 apresenta os dados de produção de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas nos últimos 10 anos, mostrando que o Estado é uma potência na produção de cana-de-açúcar e, por consequência, de bagaço.

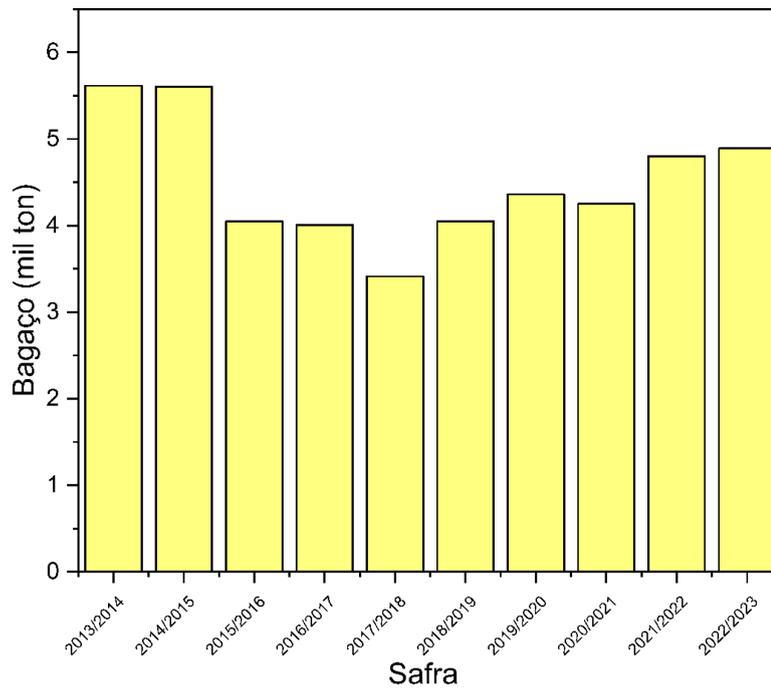
**Figura 10** - Série temporal da produção de cana-de-açúcar nos últimos 10 anos no Estado de Alagoas segundo dados da Unica (2022).



Fonte: Autor (2023).

O bagaço da cana-de-açúcar possui um potencial teórico de metano de 440 mL/gSV (PAN et al., 2022), que é comparável aos de outros resíduos agrícolas como palha de arroz (433 mL/gSV) (PAN et al., 2021) e palha de trigo (449 mL/gSV) (BOLADO-RODRIGUEZ et al., 2016). De acordo a literatura, são produzidos 250 kg de bagaço por tonelada de cana produzida (TORQUATO; RAMOS, 2013).

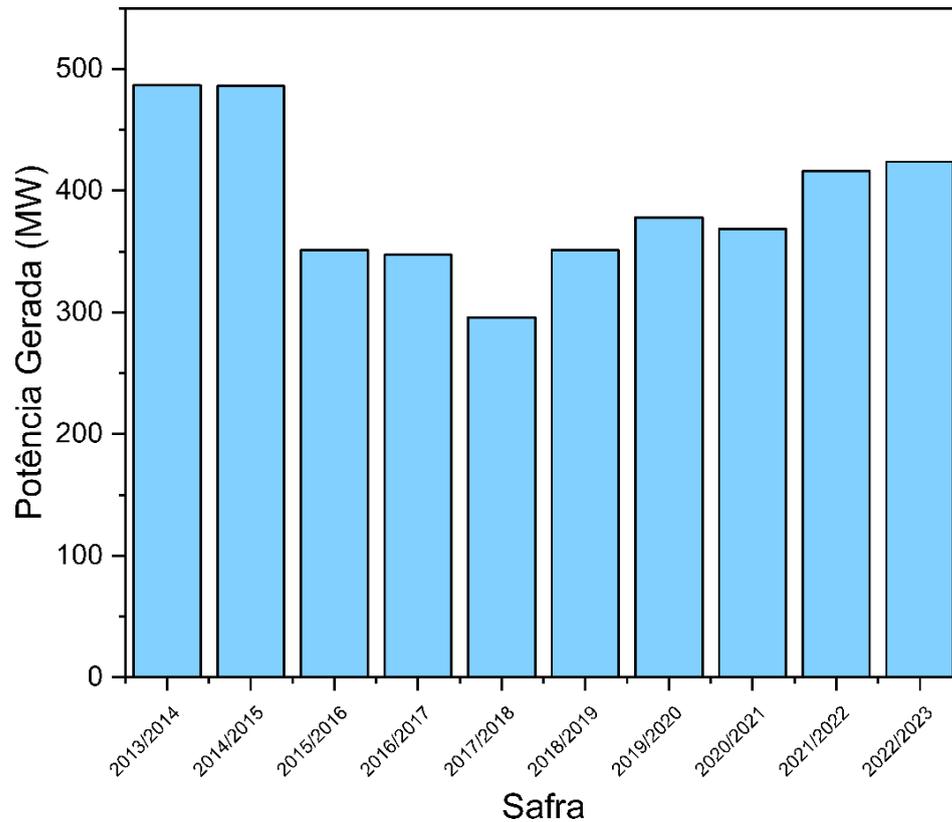
Para cada 1 tonelada de cana-de-açúcar produzida, há produção, em média, de 250 kg de bagaço, logo o Estado de Alagoas teve uma produção de bagaço na safra de 2022/2023 de 78.222,8 toneladas de bagaço. Os dados de produção de bagaço nas últimas 10 safras estão representados na Figura 11.

**Figura 11** - Dados de produção de bagaço no Estado de Alagoas.

Fonte: Autor (2022).

O PCI do bagaço da cana, calculado a partir da Equação 5, é de 1827,6 cal/g e o PCU igual a 613,8 cal/g. Em relação ao potencial de geração de eletricidade foram obtidos os resultados apresentados na Figura 12. Considerando que todo bagaço produzido fosse convertido em vapor, utilizando uma caldeira com rendimento de 70%, a capacidade instalada média do Estado de Alagoas no período avaliado para a geração de energia elétrica a partir da biomassa da cana-de-açúcar seria de 390,4 MW, sendo possível uma geração diária de energia de 6161,5 MWh/dia. Essa quantidade de energia seria o suficiente tanto para o uso próprio das usinas como para distribuição e consumo para a população alagoana. No Apêndice A encontra-se a planilha com os dados e cálculos realizados para determinação do potencial energético.

**Figura 12** - Capacidade instalada para geração de energia do bagaço da cana-de-açúcar no Estado de Alagoas.



Fonte: Autor (2023).

### 4.3 Análise Comparativa

Avaliando-se os resultados obtidos, e apresentados nos tópicos anteriores, para os dois tipos de extratos fermentativos estudados, é perceptível a superioridade do potencial energético da biomassa proveniente do bagaço de cana-de-açúcar frente ao esterco bovino no Estado de Alagoas. Isso é justificado pela maior produtividade de cana-de-açúcar no estado quando comparado a produção de gado. Além disso, o rendimento do bagaço é superior a produção de esterco, que é bastante influenciada pelo peso do animal que tem variação de 0,005 a 0,052 m<sup>3</sup>/ dia de esterco produzido por cada animal.

Como o biogás proveniente a partir do bagaço pode ser produzido na própria usina, utilizando caldeiras com eficiência média de 70%, o custo para instalação seria bem inferior quando comparado com o esterco bovino. Além disso, parte da energia gerada poderia ser utilizada na própria usina e o excedente vendido a centrais de distribuição de energia a fim de tentar baratear o custo da energia para a população do estado. No entanto, ainda se faz

necessário um maior incentivo financeiro e políticas públicas a fim de produzir essa energia limpa.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho possibilitou a compreensão sobre potencial energético de geração de energia a partir da biomassa proveniente do esterco bovino e do bagaço de cana-de-açúcar no estado de Alagoas, onde foi possível verificar as duas biomassas avaliadas apresentam um potencial promissor na geração de energia limpa no estado.

Além dos benefícios que traz ao meio ambiente, o uso do biogás para geração de energia elétrica também contribui para o gerenciamento de resíduos. Uma das razões que dificultam a implementação de sistemas alternativos de gestão de resíduos é, principalmente, a obtenção de fundos para o efeito. Assim, a análise de viabilidade econômica tem papel importante na avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir de resíduos orgânicos.

A geração de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas se apresenta como uma alternativa na geração de energia limpa, visto que o Estado é um dos maiores produtores de cana do país, ficando atrás apenas dos estados de São Paulo e Minas Gerais, apresentando uma potência instalada média de 390,4 MW e uma capacidade instalada de geração de energia elétrica de 6161,5 MWh/dia, sendo superior ao apresentado pela biomassa proveniente de esterco bovino.

Por fim, os resultados indicam o potencial dessas biomassas na produção de energia limpa no estado de Alagoas, podendo suprir parte demanda energética em todo o Estado. Além de reduzir os impactos ambientais, os resíduos que antes seriam descartados, agora serão utilizados na geração de energia elétrica.

Por fim, baseado nos resultados e conclusões alcançados neste trabalho, algumas sugestões para trabalhos futuros são apresentadas:

- Realizar análise da viabilidade econômica para implementação para geração de biogás a partir do bagaço de cana-de-açúcar em usinas no Estado de Alagoas;
- Realizar estudo com outras fontes de biomassa, como as provenientes de algas arribadas;
- Realizar um estudo sobre o potencial energético para produção de biogás no Brasil.

## REFERÊNCIAS

- ADEKUNLE, K. F.; OKOLIE, J. A. A review of biochemical process of anaerobic digestion. **Advances in Bioscience and Biotechnology**, v. 6, p. 205-212, 2015.
- AHMAD, F.; SILVA, V.; SAKAMOTO, I. K.; SUN, J. Z.; SILVA, E. L.; VARESCHE, M. B. A. Bioprospecting sulfuric acid assisted hydrothermal pretreatment of sugarcane bagasse and microbial Community structure for methane production. **Bioenergy Res.**, v. 15, p. 631-649, 2021.
- AMARAL, A. C.; STEINMETZ, R. L. R; KUNZ, A. Os biodigestores. **Embrapa Suínos e Aves – Capítulo III (ALICE)**, 2019.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA. **Informações Gerais**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/>. Acesso em 12 abr 2022.
- ARAUJO, A. P. C. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestores anaeróbico**. Monografia (Bacharel em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, p. 42, 2017.
- ASAM et al. How can we improve biomethane production per unit of feedstock in biogas plants? **Applied Energy**, v. 88, n. 6, p. 2013-2018, 2011.
- ASLANZADEH, S. **Pretreatment of cellulosic waste and high-rate biogas production**. Tese (Doutorado em Recuperação de Recursos) – School of Engineering, University of Borås, Borås, p. 168, 2015.
- BITTON, GABRIEL. **Wastewater microbiology**. Ed. Wiley-Liss, 27/01/2005, p.349, New York, NY.
- BOE, K.; ANGELIDAKI, I. Serial CSTR digester configuration for improving biogas production from manure. **Water Research**, v. 43, n. 1, p. 166-172, 2009.
- BOLADO-RODRIGUEZ, S.; TOQUERO, C.; MARTIN-JUAREZ, J.; TRAVAINI, R.; GARCIA-ENCINA, P. A. Effect of thermal, acid, alkaline and alkaline-peroxide pretreatments on the biochemical methane potential and kinetics of the anaerobic digestion of wheat straw and sugarcane bagasse. **Bioresour. Technol.**, v. 201, p. 182-190, 2016.
- BRAGA, J. K.; MOTTERAN, F.; SAKAMOTO, I. K.; VARESCHE, M. B. A. Bacterial and archaeal community structure involved in biofuels production using hydrothermal -and-enzymatic-pretreated sugarcane bagasse for an improvement in hydrogen and methane production. **Sustain. Energy Fuel**, v. 2, p. 2644-2660, 2018.
- BROSOWSKI et al. How to measure the impact of biogenic residues, wastes and by-products: Development of a national resource monitoring based on the example of Germany. **Biomass and Bioenergy**, v. 127, p. 1-19, 2019.

CAVADOS, Gabriel de Azevedo. *Análise do Impacto da Introdução das Fontes Intermitentes no Setor Elétrico Brasileiro: Estudo de Caso da Região Nordeste*. 2015. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - PPE - COPPE - UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2015.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. p. 79.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; MARTINS, O. S.; ABREU, F. C. A conversão da fonte renovável biogás em energia. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO*, 11, 2006, Brasília, p. 1 – 11.

Cortez, L.A.B.; Lora, E.E.S.; Gómez, E.O. (2008). *Biomassa para energia*. Campinas: UNICAMP.

CRIBARI, B. S. **Secagem térmica do Lodo de Esgoto Gerado em uma estação de tratamento do tipo UASB + Biofiltro Aerados Submersos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, p. 121, 2004.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Papel da biomassa na expansão da geração de energia elétrica**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 29 nov 2022.

FAO, U. Crops, and livestock products. **Food Agric. Organ.** Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 02 dez 2022.

FRIEHE, J.; WEILAND, P.; SCHATAUER, A. Descrição de substratos selecionados. *In: ROHSTOFFE, F.N. (Ed). Guia prático do biogás – geração e utilização*. Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha. 2010.

GALBIATTI et al. Estudo qualitativo do biogás produzido por substratos em biodigestores tipo batelada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 432-437, 2010.

GHALEB et al. Response surface methodology to optimize methane production from mesophilic anaerobic co-digestion of oily-biological sludge and sugarcane bagasse. **Sustainability**, v. 12, p. 2116, 2020.

HU, J. **Anaerobic digestion of sludge from brackish aquaculture recirculation system: CSTR performance, analysis of methane potential and phosphatase, struvite crystallization**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Civil) – Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, p. 68, 2013.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020. Disponível em: . Acesso em: 15 abr 2022.

IBGE. **Rebanho de bovinos (bois e vacas)**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/bovinos/br>. Acesso em: 02 dez 2022.

ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade. **Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários**. Secretariado para América Latina e Caribe, São Paulo, 80p. 2009.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Dados de Séries temporais de estatística - Gráfico com Tendências em energia renovável**. Disponível em: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>. Acesso em: 12 abr 2022.

JIANG, X.; SOMMER, S. G.; CHRISTENSEN, K. V. A review of the biogas industry in China. **Energy Policy**, v. 39, n. 10, p. 6073-6081, 2011.

LEPOIRE, David J.; CHANDRANKUNNEL, Mathew. Energy flow trends in Big History. In: **The 21st Century Singularity and Global Futures**. Springer, Cham, p. 185200, 2020.

LIU et al. Biogas production and microbial Community Properties during anaerobic digestion of corn stover at diferente temperatures. **Bioresource Technology**, v. 261, p. 93-103, 2018.

LOPES et al. Mathematical models for estimating methane production in covered Lagoon biodigesters treating pig manure. **Engenharia Agrícola**, v. 41, n. 4, p. 438-448, 2021.

MAO, C.; FENG, Y.; WANG, X.; REN, G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 540-555, 2015.

MAO, H.; HUANG, N.; CHEN, L.; WANG, H. Research on biomass energy and environment from the past to the future: A bibliometric analysis. **Science of The Total Environment**, v. 635, p. 1081-1090, 2018.

MERAJ et al. Enhanced methane production from anaerobic co-digestion of wheat straw rice straw and sugarcane bagasse: a kinetic analysis. **Appl. Sci.**, v. 11, p. 60-69, 2021.

MILANEZ et al. **Biogás de resíduos agroindustriais: Panorama e Perspectivas**. BNDES Setorial 47, p. 221-276, 2018.

MOHAMMADI, F.; ROEDL, A.; ABDOLI, M. A.; AMIDPOUR, M.; VAHIDI, H. Life cycle assessment (LCA) of the energetic use of bagasse in Iranian sugar industry. **Renew. Energy**, v. 145, p. 1870-1882, 2020.

NOOROLLAHI et al. Biogas production potential from livestock manure in Iran. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 748-754, 2015.

OLIVER, A. P. M. **Manual de Treinamento em Biodigestão**. Instituto de Estudos Del Hambre. 2008 Disponível em <[http://www.ieham.org/html/docs/Manual\\_Biodigestao.pdf](http://www.ieham.org/html/docs/Manual_Biodigestao.pdf)> Acesso em: 26 nov 2022.

OMETTO, A. R.; HAUSCHILD, M. Z.; ROMA, W. N. L. Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. **Int. J. Cycle Assess**, v. 14, p. 236-247, 2009.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Conferência das nações unidas sobre as mudanças do clima**. 2018. Disponível em: . Acesso em: 7 abr 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Acordo de Paris sobre o clima**. 2015. Disponível em: < <https://brasil.un.org/pt-br/node/88191> >. Acesso em: 19 abr 2022.

PAN, S. Y.; LIU, Q. Q.; WEN, C.; LI, Z. C.; DU, L. Q; WEI, Y. T. Producing biogas from rice straw: kinetic analysis and microbial Community dynamics. **Bioenergy Res.**, v. 14, p. 1338-1348, 2021.

PAN, S.; ZABED, H. M.; LI, Z.; QI, X.; WEI, Y. Enrichment and balancing of nutrientes for improved methane production using three compositionally diferente agrolivestock wastes: process performance and microbial Community analysis. **Bioresour. Technol.**, v. 357, 2022.

ROJAN P. JOHN; G.S. ANISHA; K. MADHAVAN NAMPOOTHIRI; ASHOKPANDEY. Micro and macroalgal biomass: A renewable source for bioethanol. **Bioresource Technology**, v.102, p.186-193, 2011.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Energetic potential estimate for electric energy generation of diferente sources of biogas in Brasil. **Biomassa e Energia**, v. 2, n. 1, p. 57-67, 2005.

SANCHEZ, E.M.S.; CAVANI, C.S.; LEAL, C.V.; SANCHEZ, C.G. Compósito de resina de poliéster insaturado com bagaço de cana-de-açúcar: influência do tratamento das fibras nas propriedades. **Polímeros**, v.20, n.3, p.194-200, 2010.

SANTOS, S .S. **O cultivo da cana-de-açúcar no estado de Alagoas: uma análise comparativa dos efeitos da mecanização no estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) – Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, 103 p., 2011.

SANTOS, I. A.; NOGUEIRA, L. A. H. Estudo energético do esterco bovino: seu valor de substituição e impacto da biodigestão anaeróbia. **Revista Agrogeoambiental**, v. 4, n. 1, p. 41-49, 2012.

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J.; FAHL, F. Biogas: developments and perspectives in Europe. **Renewable Energy**, v. 129, p. 457-472, 2018.

SEIXAS, J.; FOLLE, S.; MARCHETTI, D. Construção e funcionamento de biodigestores. Brasília: EMBRAPA-DID, Circular técnica n 4, 1980.

SHARMA, I. P.; KANTA, C.; GUSAIN, Y. S. Crop residues utilization: wheat, Paddy, cotton, sugarcane and groundnut. **Int. J. Bot. Stud.**, v. 3, p. 11-15, 2018.

SILVA, E. P.; CAVALIERO, C. K. N. Perspectivas para as fontes renováveis de energia no Brasil. 2004. Disponível em <<http://www.universiabrasil.net>> Acesso em: 20 nov 2022.

SINDAÇUCAR- **Safra 21/22 ultrapassa 18 milhões de toneladas de cana**, 2022. Disponível em: . Acesso em 18 de abril de 2022.

STRAUBER, H.; BUHLIGEN, F.; KLEINSTEUBER, S.; DITTRICH-ZECHENDORF, M. Carboxylic acid production from ensiled crops in anaerobic solid-state fermentation – trace elements as pH controlling agents support microbial chain elongation with lactic acid. **Engineering in Life Sciences**, v. 18, n. 7, p. 447-458, 2018.

TAIGANIDES, E. P. F. **Animal waste management and wastewater treatment**. Singapura – Malasia, 1978.

TALHA, Z.; DING, W. M.; MEHRYAR, E.; HASSAN, M.; BI, J. H. Alkaline pretreatment of sugarcane bagasse and filter mud codigested to improve biomethane production. **Biomed. Res. Int.**, v. 2016, p. 10, 2016.

UDAETA, M. E. M.; MEDEIROS, G. A. S.; SILVA, V. O.; GALVÃO, L. C. R. Basic and procedural requirements for energy potential from biogás of sewage treatment plants. **Journal of Environmental Management**, v. 238, p. 380-387, 2019.

UNICA. **União da indústria de cana-de-açúcar, etanol, açúcar e energia**. São Paulo, Brasil. Disponível em: <https://observatoriodacana.com.br/>. Acesso em: 02 dez 2022.

VIEIRA, G. E. G.; CAMPOS, C. E. A.; TEIXEIRA, L. F.; COLEN, A. G. N. Produção de biogás em áreas de aterros sanitários: uma revisão. **Revista Liberato**, v. 16, n. 26, p. 193–204, 2015.

WANG, P.; WANG, H.; QIU, Y.; REN, L.; JIANG, B. Microbial characteristics in anaerobic digestion processo of food waste for methane production – a review. **Bioresource Technology**, v. 248, p. 29-36, 2018.

XU et al. Fabrication of hierarchical MnMoO<sub>4</sub>H<sub>2</sub>O@MnO<sub>2</sub> core-shell nanosheet arrays on nickel foam as na advanced electrode for asymmetric supercapacitors. **Chemical Engineering Journal**, v. 334, p. 1466-1476, 2018.

YADVIKA et al. Enhancement of biogas production from solid substrates using diferente techniques – a review. **Bioresourse Technology**, v. 95, n. 1, p. 1-10, 2004.

YANG et al. A model for methane production in anaerobic digestion of swine wastewater. **Water Research**, v. 102, p. 464-474, 2016.

ZAMBONI, I. G. **O uso do bagaço de cana-de-açúcar para produção de biogás.** Disponível em: <https://energiaebiogas.com.br/o-uso-de-bagaco-de-cana-de-acucar-para-producao-de-biogas>. Acessado em: 29 nov 2022.

ZIELS et al. Microbial rRNA gene expression and co-occurrence profiles associate with biokinetics and elemental composition in full-scale anaerobic digesters. **Microbial Biotechnology**, v.11, n. 4, p. 694-709, 2018.

**APÊNDICE A – PLANILHA DE CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Safra	Produção (kg)	Bagaço (kg)	Bagaço diário (kg/dia)	Potência gerada (MW)	Capacidade instalada ( GWh)
2022/2023	19555700000	4888925000	20370520.83	423.8	2441.3
2021/2022	19199900000	4799975000	19999895.83	416.1	2396.9
2020/2021	17003000000	4250750000	17711458.33	368.5	2122.6
2019/2020	17439500000	4359875000	18166145.83	378.0	2177.1
2018/2019	16201800000	4050450000	16876875	351.1	2022.6
2017/2018	13646900000	3411725000	14215520.83	295.8	1703.7
2016/2017	16030600000	4007650000	16698541.67	347.4	2001.2
2015/2016	16193400000	4048350000	16868125	351.0	2021.6
2014/2015	22422500000	5605625000	23356770.83	486.0	2799.2
2013/2014	22454600000	5613650000	23390208.33	486.7	2803.2
<b>Média</b>	18014790000	4503697500	18765406.25	<b>390.4</b>	<b>2248.9</b>
$\eta_{caldeira} =$	0.7				
<b>PCU =</b>	2568.1	kJ/kg			
<b>Duração da Safra =</b>	240	dias	(8 meses)		
<b>Conversão</b>	1 dia =	86400	s		
<b>Horas de operação</b>	24hs/dia*30dias/mês*8meses	5760	h		