

# Estudo da geração de energia elétrica de biogás a partir da vinhaça de uma usina de cana de açúcar

*Study on generation of electric energy by biogas from the vinasse of a sugar cane plant*

*Estudio de la generación de energía eléctrica a partir de biogás de la vinaza de una planta de caña de azúcar*

## Fabício Tadeu Pereira

Eng Ambiental - Univ. Fed.  
Itajubá,  
[fbricio0848@gmail.com](mailto:fbricio0848@gmail.com)

## Ivan Felipe Silva dos Santos

Eng. Hídrico. Doutor Eng. Mec.  
UNIFEI,  
Mestre em Ciências Eng de  
Energia - Univ. Federal de  
Itajubá  
[ivanfelipe@unifei.br](mailto:ivanfelipe@unifei.br)

## Regina Mambeli Barros

Profa. do Instituto de Recursos  
Naturais, Univ. Fed. Itajubá  
[remambeli@unifei.br](mailto:remambeli@unifei.br)

## Geraldo Lúcio Tiago Filho

Prof. Instituto de Recursos  
Naturais, Univ. Fed. Itajubá,  
[tiagounifei@unifei.br](mailto:tiagounifei@unifei.br)

## Thayla Francisca Vilas Bôas

Graduanda Eng. Ambiental,  
Instituto de Recursos Naturais,  
Univ. Fed. Itajubá  
[thaylavlilasboas@unifei.edu.br](mailto:thaylavlilasboas@unifei.edu.br)

## Resumo

A digestão anaeróbia é uma importante rota para tratamento de resíduos sólidos orgânicos que resulta na produção do biogás, gás combustível com elevado potencial energético. O presente trabalho visou à obtenção das características e condições para a geração de energia elétrica do biogás a partir da digestão anaeróbia de vinhaça, tendo sido estudada em usina açucareira do interior do estado de São Paulo. A geração de biogás do caso da vinhaça foi estudada levando-se em consideração os valores da literatura. O potencial energético para a produção de vinhaça de uma safra na usina de estudo com 21 milhões de toneladas, foi estimado o potencial energético de 12.526,19 kWh/dia. Foram simulados 4 cenários em uma combinação entre Resoluções da ANEEL de micro e mini geração distribuída e no âmbito da Portaria MME nº 65/2018 com dois valores de investimento pela Potência. Há viabilidade econômica para o empreendimento de 5MW de Potência estudado com payback a partir do 4º ano de operação no âmbito das Resoluções ANEEL 482/2012 e 687/2015 (Cenários 1 e 2), e no âmbito da Portaria MME nº 65/2018, após o 7º ano de operação (Cenário 3) e 7º ano de operação (Cenário 4).

**Palavras-chave:** energia renovável, vinhaça, digestão anaeróbia

## Abstract

Anaerobic digestion is an important route for the treatment of solid organic waste that results in the production of biogas, a fuel gas with high energy potential. The present study aimed at obtaining the characteristics and conditions for the generation of electric energy from biogas from anaerobic digestion of vinasse, having been studied in a sugar plant in the interior of the state of São Paulo. The biogas generation in the case of vinasse was studied taking into account the values in the literature. The energy potential for the production of vinasse from a harvest in the study plant with 21 million tons, the energy potential of 12,526.19 kWh / day was estimated. Four scenarios were simulated in a combination of ANEEL Resolutions of micro and mini generation distributed and within the scope of MME Ordinance No. 65/2018 with two investment values by Power. There is economic viability for the 5MW Power project studied with payback from the 4<sup>th</sup> year of operation under ANEEL Resolutions 482/2012 and 687/2015 (Scenarios 1 and 2), and within the scope of MME Ordinance 65/2018, after the 7<sup>th</sup> year of operation (Scenario 3) and the 7<sup>th</sup> year of operation (Scenario 4).

**Key-words:** renewable energy, vinasse, anaerobic digestion,

## Resumen

La digestión anaeróbica es una ruta importante para el tratamiento de residuos orgánicos sólidos que da como resultado la producción de biogás, un gas combustible con alto potencial energético. El presente trabajo tuvo como objetivo obtener las características y condiciones para la generación de energía eléctrica a partir de biogás a partir de la digestión anaeróbica de vinaza, habiendo sido estudiadas en una planta azucarera del interior del estado de São Paulo. La generación de biogás en el caso de la vinaza se estudió teniendo en cuenta los valores de la literatura. El potencial energético para la producción de vinaza a partir de una cosecha en la planta de estudio con 21 millones de toneladas, se estimó el potencial energético de 12.526,19 kWh / día. Se simularon cuatro escenarios en una combinación de Resoluciones ANEEL de micro y mini generación distribuidas y en el alcance de la Ordenanza MME No. 65/2018 con dos valores de inversión por Energía. Existe viabilidad económica para el proyecto de 5MW

de Energía estudiado con amortización a partir del 4º año de operación bajo las Resoluciones ANEEL 482/2012 y 687/2015 (Escenarios 1 y 2), y dentro del alcance de la Ordenanza MME 65/2018, después del séptimo año de operación (Escenario 3) y el séptimo año de operación (Escenario 4).

**Palabra-clave:** energía renovable, vinaza, digestión anaeróbica

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com dados sobre a matriz de energia elétrica, do Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil possui no total 3.065 empreendimentos de Usinas Térmicas (UTE) em operação, totalizando 44.196.682,29 kW de potência instalada. Quando avaliada a matriz por fonte e combustível final (Biogás-RU, Resíduos Sólidos Urbanos-RU, Biogás-Floresta, Biogás-AGR e Biogás-RA), há uma potência outorgada de 220.066,80 kW em 41 empreendimentos, correspondendo a 0,5% da matriz energética relativa às UTEs (SIGA-ANEEL, 2020).

De acordo com Cortez et al. (1992), os subprodutos da produção de açúcar começaram a surgir com os processos voltados a um alto grau de pureza e alto padrão. Alguns subprodutos gerados na produção de açúcar e etanol são destacados pela importância comercial ou redução de custos pela usina. Os subprodutos mais importantes são: o bagaço, a vinhaça, a torta de filtro e a levedura. A vinhaça é gerada pela atividade sucroalcooleira no processamento de cana-de-açúcar (CETESB, 2015). Atualmente, a maior parte das usinas destinam a vinhaça à fertirrigação do solo. Entretanto, Penatti e Donzelli (2000) relatam que o excesso de sódio é uma das características utilizadas para definir a qualidade da água, em se tratando de irrigação. Como a vinhaça, resíduos ou águas de irrigação com altos teores de sódio em relação ao cálcio e magnésio são

impróprios para serem aplicados no solo.

Como a vinhaça apresenta um elevado potencial de matéria orgânica em sua composição, o uso da digestão anaeróbia (DA) para a geração de biogás e em seguida, energia, torna-se uma opção bastante atraente às usinas sucroalcooleiras (BERNAL et al., 2017). O papel da vinhaça de cana-de-açúcar, como fonte de energia alternativa, atraiu recentemente a atenção na indústria sucroenergética brasileira devido ao fato de que a recuperação de energia através do biogás a partir da DA de vinhaça mostra grande potencial para expandir a quota de fontes de energia renováveis na matriz energética (FUESS et al., 2014; FUESS et al., 2017).

O biogás é uma versátil fonte de energia renovável, que pode ser usado para a substituição de combustíveis fósseis na produção de energia e calor, e pode ser usado também como combustível gasoso de veículos. O biogás é rico em metano e pode substituir também o gás natural, após a adequada purificação e adequação, como uma matéria-prima para produzir produtos químicos e outros materiais. A produção de biogás por meio da DA oferece vantagens significativas sobre outras formas de bioenergia (WEILAND, 2010).

Segundo Osorio e Torres (2009), o biogás é composto por vários tipos de gases, tais como o metano, dióxido

de carbono, nitrogênio e o sulfeto de hidrogênio, estes dois últimos, entre outros gases, aparecem apenas na forma de traços. No entanto, o biogás gerado é, principalmente, composto de metano, possibilitando a geração de energia. Além disso, o biogás típico é saturado com água, partículas de poeira, siloxanos, aromáticos e compostos halogenados, mas os montantes destes vestígios compostos são muito baixos em comparação com os gases CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. (KHAN, 2017). A *European Biomass Association* – AEBIOM (2009), mostra a composição comumente encontrada no biogás de DA na Tabela 1.

Tabela 1: Composição do Biogás comumente encontrada no biogás proveniente da Digestão Anaeróbia

<b>Gás</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
Metano	50 – 75
Dióxido de Carbono	24 – 45
Vapor d'água	1 – 2
Monóxido de Carbono	0 – 0.3
Nitrogênio	1 – 5
Sulfeto de Hidrogênio	0.1 – 0.5
Hidrogênio	0 – 3
Oxigênio	Traços

**\* Nota: Tradução do autor. Fonte: AEBIOM, 2009**

Para que o biogás possa ser utilizado como combustível, seja em motores, turbinas a gás ou microturbinas, é necessário identificar sua vazão, composição química e poder calorífico, parâmetros que determinam o real potencial de geração de energia elétrica (COELHO et al., 2006). Santos et al. (2016a) analisaram a viabilidade econômica e o potencial energético da geração de energia a partir do biogás das ETEs anaeróbias brasileiras e seus resultados indicaram viabilidade

econômica apenas para cidades com população superior a 300.000 habitantes e mostraram que este tipo de energia renovável poderia fornecer potencialmente cerca de 0,25% de os combustíveis residuais brasileiros.

Dessa maneira, esse trabalho visa a conduzir um estudo de aproveitamento energético da produção de biogás a partir da vinhaça proveniente de usinas açucareiras. Esse aproveitamento

energético é proposto para se dar mediante o processo da DA e calcular os potenciais energéticos dos três tipos de substratos supracitados.

## 2. Cana de Açúcar

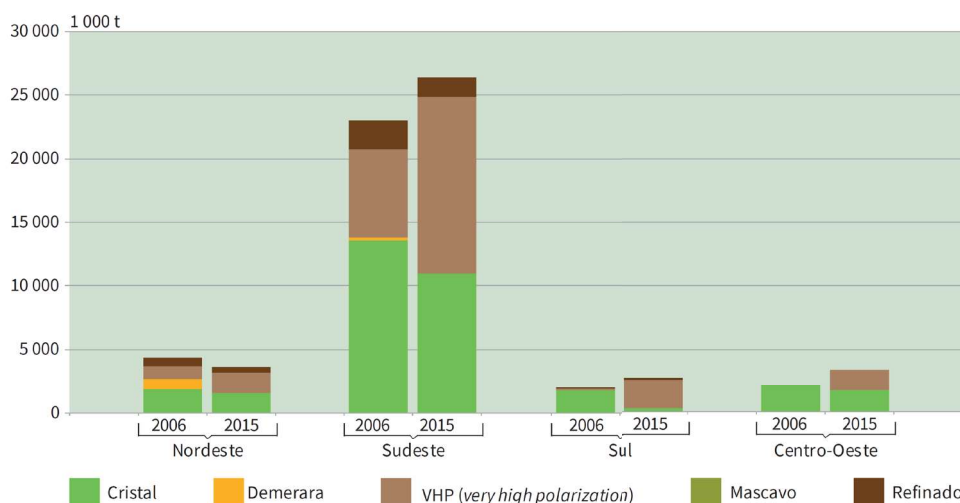
### 2.1 Produção da cana de açúcar no Brasil

De acordo com o levantamento sistemático da produção agrícola - outubro 2020, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020), a produção de safra de cana-de-açúcar foi de 667.532.475 ton em 2019 e de 690.832.317 ton em 2020, com uma variação de 3,5% entre estes anos. A área plantada para os anos de 2019 e 2020 foram de respectivamente de 9.627.539 ha e de 9.711.918 ha (variação de 0,9%) e a área colhida para os anos de 2019 e 2020 foram de respectivamente de 8.986.925 ha e de 9.017.593 ha (variação de 0,3%). (IBGE, 2020).

Ainda, de acordo com o IBGE (2020), o rendimento médio foi de 74.278 kg/ha em 2019 e de 76.609 kg/ha em 2020 (variação de 3,1%).

O principal produto derivado da cana-de-açúcar é o açúcar. Existem diversos tipos de açúcar, os quais são divididos em três categorias, quais sejam: açúcar bruto, açúcar branco ou refinado e açúcar líquido (IBGE, 2017). O Brasil produziu em 2015 produziu mais de 37 milhões de toneladas de açúcar, dos quais mais de 53% era do tipo *very high polarization* - VHP (polarização muito alta). O VHP é usado como matéria-prima para a produção de açúcar refinado ou em outros processos industriais, produzido sobretudo, ao comércio exterior. Os gráfico da Figura 1 mostra o crescimento da produção de VHP e a redução dos outros tipos de açúcar no período representado.

Figura 1: Produção de açúcar por tipo, segundo as Grandes Regiões - 2006/2015.



Nota: Os dados referentes à produção de açúcar da Região Norte (2006 e 2015) e de parte da produção da Região Centro-Oeste (2006) foram omitidos para preservar o sigilo estatístico.

Fonte: IBGE, Pesquisa Industrial Anual - Produto 2006/2015 *apud* IBGE (2017)

Em IBGE (2017), ressalta-se que dados da PIA-Produto 2015 demonstram que o Estado de São Paulo é o maior produtor de açúcar do Brasil, uma vez que é responsável por mais de 62% da produção de açúcar do País, sendo um dos fatores que podem explicar é a alta produtividade das lavouras de cana-de-açúcar em São Paulo. Este estado vem implementando desde os anos de 1970, aprimoramentos contínuos, incentivados pelas políticas públicas voltadas a incentivar este setor.

O valor bruto que é movimentado pela cadeia sucroenergética, de acordo com Neves<sup>1</sup> et al. (2014 *apud* ÚNICA, s.d.) é superior a US\$ 100 bilhões, com um Produto Interno Bruto (PIB) de aproximadamente US\$ 40 bilhões, ou seja, um montante equivalente a cerca de 2% do PIB brasileiro.

## 2.2 Principais Políticas e Resoluções

No tocante à micro e mini geração distribuída, é importante ressaltar a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 (ANEEL, 2012), em que o consumidor brasileiro pode efetuar a geração de sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou ainda, a cogeração qualificada e inclusive, pode fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade (ANEEL, 2018). Ainda segundo a ANEEL (2018), visando à redução dos custos e tempo para a conexão da microgeração e minigeração, tornar compatível o Sistema de Compensação de Energia Elétrica com as Condições Gerais de Fornecimento (Resolução Normativa nº 414/2010; ANEEL, 2010), incrementar o público alvo e finalmente, aprimorar as informações na fatura, a ANEEL publicou a revisão da Resolução Normativa nº 482/2012 (ANEEL, 2012), ou seja,

a Resolução Normativa nº 687/2015 (ANEEL, 2015). Conforme esta resolução, é permitido a utilização de qualquer fonte renovável, além da cogeração qualificada. Denomina-se microgeração distribuída a central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (KW) e minigeração distribuída, aquela com  $75\text{kW} < P \leq 5\text{MW}$ , conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. No caso em que a quantidade de energia gerada em determinado mês for maior àquela consumida naquele período, o consumidor fica com créditos passíveis de serem usados para redução da fatura dos meses seguintes (ANEEL, 2018).

Em relação ao saneamento, há que se mencionar a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela lei no. 12305/2010 (BRASIL, 2010a) e regulamentada pelo Decreto 7404/2010 (BRASIL, 2010b).

Também, são mencionadas pela ÚNICA (s.d.), a RenovaBio, em que foram aprovados em 2018, vários dispositivos de regulamentação do programa, dentre os quais menciona-se a meta decenal de redução das emissões em mais de 10% até 2030, majorando em aproximadamente 70% o consumo de etanol em um período de 12 anos. Ainda, a ÚNICA (s.d.) ressalta o acréscimo do limiar de injeção de bioeletricidade com a preservação do desconto na Tarifa de Uso dos Sistemas Elétricos de Distribuição (TUSD) para projetos existentes. A publicação artigo na Lei 13.299/2016, possibilitou-se que os empreendimentos à biomassa com potência injetada maior que 30MW continuassem (ou passassem) a ter direito ao desconto da TUSD até os 30MW (desde que não superem o limite máximo de 50MW). Finalmente,

1. Neves, M. et al. Mapeamento e quantificação da cadeia sucroenergética na safra 2013/2014. Mimeo, 2014. *apud* União da Indústria de Cana-de-Açúcar - ÚNICA. Balanço de atividades 2012/2013 a 2018/2019. Disponível em: <https://www.unica.com.br/wp-content/uploads/2019/06/Relatorio-Atividades-201213-a-201819.pdf>. Acesso em 24 de nov. de 2020. p. 13.

2 Pinheiro, J. C. Análise da dinâmica das áreas ocupadas pela cultura canieira no Brasil entre 1990 e 2013: uma contribuição ao estudo do circuito espacial produtivo do setor sucroenergético. 2015. Dissertação (Mestrado)-Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, 2015. Disponível em: <[http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/286588/1/Pinheiro\\_JuniorCesar\\_M.pdf](http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/286588/1/Pinheiro_JuniorCesar_M.pdf)>. Acesso em: out. 2017. apud INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. A Geografia da cana-de-açúcar / IBGE, Coordenação de Geografia. - Rio de Janeiro : IBGE, 2017. 172p. Acima do título: Dinâmica territorial da produção agropecuária. ISBN 978-85-240-4443-4. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101436> Acesso em: 24 de nov. de 2020. p. 68.

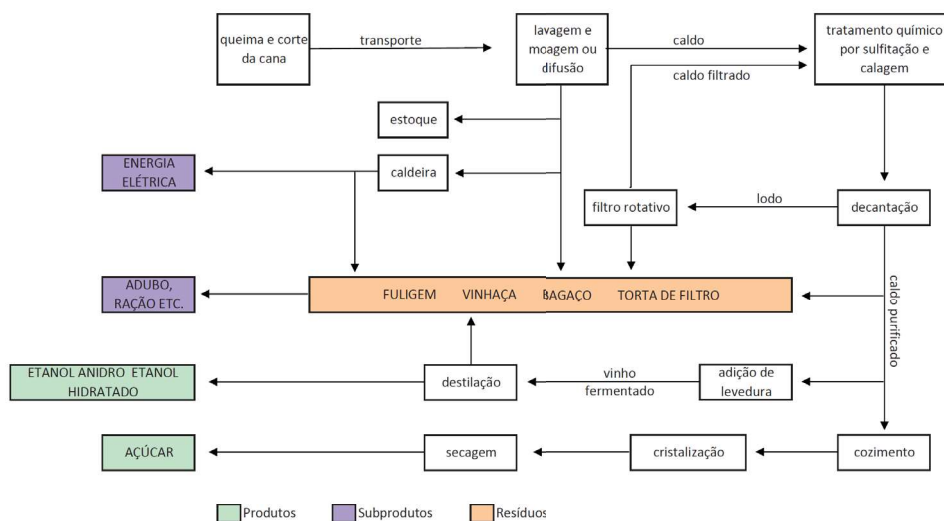
3 Pinheiro, J. C. Análise da dinâmica das áreas ocupadas pela cultura canieira no Brasil entre 1990 e 2013: uma contribuição ao estudo do circuito espacial produtivo do setor

dentre, as políticas mencionadas pela ÚNICA (s.d.), há menção à aprovação pelo Congresso Nacional da MP 688/2015, que alterou a Lei 9.427/1996, e tornou possível a manutenção do desconto na TUSD (mesmo para os agentes que injetem acima de 30MW, com limite superior de até 300MW). Entretanto, a referida medida passou a valer somente para novas outorgas de projetos que entrassem em operação a partir de 2016. A medida foi transformada na Lei 13.203/2015, e contribui para a viabilidade econômica de novas outorgas de geração à biomassa, sobretudo envolvendo *greenfields* (ÚNICA, s.d.).

### 2.3 Produção de açúcar e subprodutos

Segundo Pinheiro<sup>2</sup> (2015 *apud* IBGE, 2017), após a chegada à unidade industrial, a cana-de-açúcar segue por uma esteira cuja função é a retirada das impurezas passíveis de os equipamentos ou ainda de contaminação do caldo. No caso em que a cana-de-açúcar seja manualmente colhida, há uma lavagem da planta com água. Por outro lado, em caso de colheita mecânica, tal limpeza é efetuada com jato de ar a fim de evitar perda de sacarose. O caldo é separado do bagaço, que segue, geralmente, para as caldeiras, local em que é transformado em energia elétrica. O esquema da Figura 2 apresenta resumidamente, o processo produtivo de açúcar, etanol e energia.

Figura 2: Ciclo produtivo do açúcar, etanol e energia.



Fonte: Pinheiro<sup>3</sup> (2015 *apud* IBGE, 2017).

sucroenergético. 2015. Dissertação (Mestrado)- Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, 2015. Disponível em: <[http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/286588/1/Pinheiro\\_](http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/286588/1/Pinheiro_JuniorCesar_M.pdf)

JuniorCesar\_M.pdf>. Acesso em: out. 2017. apud INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. A Geografia da cana-de-açúcar / IBGE, Coordenação de Geografia. - Rio de Janeiro : IBGE, 2017. 172p. Acima do título: Dinâmica territorial da produção agropecuária. ISBN 978-85-240-4443-4. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101436> Acesso em: 24 de nov. de 2020. p. 68.

Alguns subprodutos gerados na produção de açúcar e etanol são destacados pela importância comercial ou redução de custos pela usina. Os subprodutos mais importantes são: o bagaço, a vinhaça, a torta de filtro e a levedura. Conforme IBGE (2017), a vinhaça é um líquido marrom-escuro que exala forte odor com as seguintes características químicas: baixo pH, elevado teor de potássio e elevada carga de matéria orgânica, sendo mais utilizada nos campos rebrotados.

O uso de resíduos da indústria (a exemplo da vinhaça), já consiste em atividade rotineira em muitas regiões canavieiras do Brasil, com os evidentes aumentos na produção de cana-de-açúcar (ORLANDO FILHO e LEME, 1983). De acordo com IBGE (2017), como subproduto da fabricação de açúcar e etanol, a partir da queima do bagaço de cana-de-açúcar, é possível efetuar a geração de energia elétrica de biomassa.

Conforme dados de 2018, da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica CCEE (2018) relatados pela ÚNICA (s.d), a biomassa da cana entregou para a rede do Sistema Interligado Nacional (SIN), 21,44 TWh em 2017, ou seja, 84% do total de geração da biomassa. Este valor foi apenas inferior àquela produzida pelas hidrelétricas, térmicas a gás e eólicas, que entregaram ao SIN respectivamente, 380,91 TWh, 56,45 TWh e 33,49 TWh. A energia elétrica gerada pelo setor sucroenergético para o SIN foi equivalente a ter atendido mais de 11 milhões de residências, além de uma redução nas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) de 6,3 milhões de tonCO<sub>2</sub> (ÚNICA, s.d.)

Ainda, conforme IBGE (2017),

além de energia, ração e adubo, outros subprodutos estão sendo desenvolvidos a partir do bagaço. Exemplos são o etanol de segunda geração, o plástico verde e um tipo de fibra para fabricação de tecido. Ainda, outro resíduo da cadeia canavieira (palha), pode-se produzir papel (IBGE, 2017).

### 3. Materiais e métodos

#### 3.1 Produção de vinhaça

De acordo com Bernal et al. (2017), o volume de vinhaça produzido, pode ser obtido multiplicando-se a massa de cana-de-açúcar moída (em kg) pela produção específica de vinhaça (Equação 1).

$$Vv = Pv \times Tc \quad (1)$$

Onde:

Vv = Volume de vinhaça produzido (m<sup>3</sup>);

Pv = Produção de vinhaça por quilo de cana (m<sup>3</sup>/kg);

Tc = tonelada de cana convertida para quilogramas (kg).

#### 3.2. Estudos energéticos

Aplicando a Equação 2 (LIMA E PASSAMANI, 2012), pôde-se encontrar a energia térmica para todos os casos estudados.

$$E_t = Q_{biogás} \cdot PCI_{biogás} \quad (2)$$

Onde:

E<sub>t</sub> = Energia térmica disponível no biogás (kcal/dia);

Q<sub>biogás</sub> = produção volumétrica de biogás (m<sup>3</sup>/dia); e

PCI<sub>biogás</sub> = Poder calorífico inferior do biogás (kcal/m<sup>3</sup>).

Seguindo-se a literatura pertinente, o biogás possui um Poder Calorífico Inferior (PCI) que se encontra entre 4,95 e 7,92 kWh/m<sup>3</sup>, levando-se em consideração a proporção de metano presente na mistura de 50 e 80%, respectivamente. Para o estudo, foi utilizado o valor apresentado por Costa (2006), sendo o PCI do metano igual a 8500 kcal/m<sup>3</sup> o que equivale a 6,5 kWh/m<sup>3</sup> de gás.

Com a Energia Térmica calcula-se a Energia Elétrica que pode ser gerada a partir do biogás produzido, porém dependendo da eficiência da tecnologia de conversão utilizado (LIMA e PASSAMANI, 2012).

### 3.2.1 Energia elétrica da DA da vinhaça

Segundo Bernal et al. (2017), com os dados de vinhaça produzida, utilizando-se a DQO típica da vinhaça da usina em estudo, prossegue-se calculando a carga de DQO total de todo o volume de vinhaça gerado (Equação 3).

$$DQO_{total} = Vv \cdot DQO_{típica} \quad (3)$$

Onde:

DQO<sub>total</sub> : carga total de DQO contida em todo o volume de vinhaça gerado (kg);

Vv : volume de vinhaça (m<sup>3</sup>);

DQO<sub>típica</sub> : valor típico para a vinhaça.

Em seguida foi realizado o cálculo da DQO removida no processo de DA que dará origem ao biogás (Equação 4).

$$DQO_{rem} = DQO_{total} \cdot Ef \quad (4)$$

Onde:

DQO<sub>rem</sub> : carga total de DQO removida pelo processo de digestão anaeróbia (kg);

DQO<sub>total</sub> : DQO contida no volume de vinhaça gerado (kg);

E<sub>f</sub> : eficiência de tratamento do reator UASB.

Finalmente, pode-se encontrar a quantidade de biogás gerada pela vinhaça, de acordo com a Equação 5.

$$Q_{CH_4} = DQO_{rem} \cdot fp \quad (5)$$

Onde:

Q<sub>biogás</sub> : vazão de biogás gerado em um ano (m<sup>3</sup>/ano);

DQO<sub>rem</sub> : DQO removida por digestão anaeróbia (kg);

f<sub>p</sub> : fator de produção ou produção de biogás específica, que equivale à produção de biogás por massa de DQO consumida.

A partir da vazão de biogás, a potência e a energia (definida como a potência gerada multiplicada pelo tempo de funcionamento) geradas pelo processo são calculadas pelas equações 6 e 7.

$$P = Q_{CH_4} \cdot p_{CH_4} \cdot \eta_{motor} \quad (6)$$

$$E_{ano} = P \cdot \Delta t \quad (7)$$

Onde:

Q<sub>biogás</sub> : vazão de biogás (m<sup>3</sup>/s);

p<sub>CH<sub>4</sub></sub> : percentual de metano no biogás (%);

η<sub>motor</sub> : eficiência ou rendimento do motor de combustão interna;

PCI<sub>CH<sub>4</sub></sub> : poder calorífico do metano;

E<sub>ano</sub> : energia gerada em um ano (GW/h);

P = Potência gerada (kW);

Δt = tempo de funcionamento da usina (horas por ano).

### 3.3 Estudos econômicos

Os modelos de avaliação econômico-financeira constituem-se em



importantes instrumentos para avaliação da viabilidade econômica de um empreendimento. Dentre os diversos modelos, o índice de Valor Presente Líquido (VPL) pode ser usado como índice de decisão.

### 3.3.1 Valor Presente Líquido (VPL)

Para o presente estudo, utilizou-se a consideração de que o índice de decisão foi o VPL. A utilização do VPL abarcou, os resultados dos

cálculos energéticos e respectivo investimento para geração de energia elétrica, como receitas, pela venda da energia elétrica (Equação 8), os respectivos créditos de carbono pela queima do biogás e pela geração de energia elétrica. A Equação 9 apresenta o cálculo do VPL, com base em uma função  $f(x)$  descrita pela Equação (9). Os valores de VPL foram avaliados para os primeiros 20 anos de implementação do empreendimento para cada cenário.

*Receita mensal venda da energia*

$$= \text{Energia Elétrica para a Venda} \left( \frac{kWh}{\text{mês}} \right) * 0,15 * \left( \frac{R\$}{kWh} \right) - (O\&M) \quad (8)$$

$$f(x) = \frac{1}{[(1+i)^n]} \quad (9)$$

$$EVPL = FC_0 + [FC \cdot f(x)_{\text{acum}}] \quad (10)$$

onde:

i: taxa de juros, assumida como sendo 12% a.a.;

n: ano avaliado;

$f(x)_{\text{acum}}$ : valores acumulados de  $f(x)$ ;

$FC_0$ : Investimento para geração de energia elétrica (R\$);

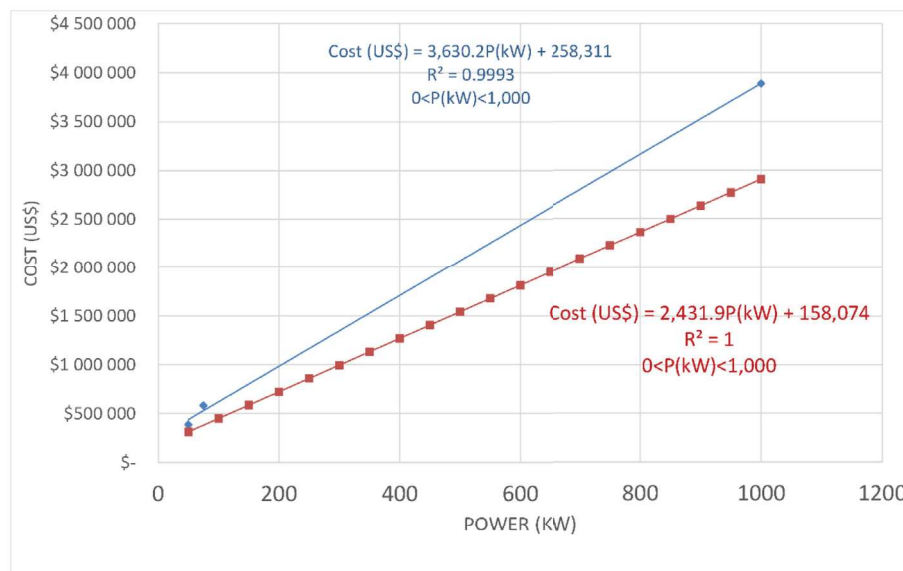
FC: receita anual total (R\$); e

O&M: Operação & Manutenção, considerado como sendo 5% do investimento, conforme Brasil/Probiogas (2015).

Os valores de investimento foram consultados tanto considerando os resultados de investimento de Silva et al. (2017) na Figura 3, e de Tolmasquim (2016), ambas no âmbito

das resoluções ANEEL 482/2012 e 687/2015 (ANEEL, 2012; 2015). A Equação 11 foi extraída deste gráfico e utilizada no presente estudo.

Figura 3: valores para investimento em usinas termelétricas a biogás.



Fonte: Silva et al. (2017)

De acordo com estudos realizados na Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o custo de investimento para geração elétrica a partir de biodigestores anaeróbios com motogeradores (motores de combustão interna + grupo gerador) são de cerca de US\$ 2.402/kW (Tolmasquim, 2016). Para a planta de biodigestão anaeróbia com motogerador também pode ser utilizado o valor de 5% por ano do custo de investimento conforme Brasil/Probiogás (2015) e também mencionado em Tolmasquim (2016). O valor de cotação do dólar foi consultado no site do banco central do Brasil (BCB, 2020) para o dia 23/11/2020, como de 5,3822 R\$ para cada 1,00 US\$.

O valor utilizado por Silva et al. (2017) de 509,74R\$/kWh foi utilizado, no âmbito das Resoluções ANEEL 482/2012 e 687/2015 (ANEEL, 2012; 2015). Também, conforme preconizado pela ÚNICA (s.d.), em fevereiro de 2018 foi publicada pelo

Ministério de Minas e Energia (MME), a Portaria MME nº 65/2018, em que foram estabelecidos os novos Valores Anuais de Referência Específicos (VRES), para os Sistemas de Geração Distribuída, no âmbito da Lei 10.848/2004. A UNICA (s.d.) relatou que desde 2015, por intermédio da Portaria MME 538/2015, havia somente o VRES<sup>4</sup> para a fonte Solar Fotovoltaica (R\$454,00/MWh) e o VRES COGEN GN (R\$ 329,00/MWh). Conforme a Portaria MME nº 65/2018, biomassa e biogás passaram a ter os VRES seguintes (vigentes a partir de 1º de março de 2018):

- I. Biomassa Residual - R\$ 349,00/MWh;
- II. Biogás - R\$ 390,00/MWh; e
- III. Biomassa Dedicada - R\$ 537,00/MWh.

Portanto, foi simulada a viabilidade econômica também para o valor VRES de R\$ 390,00/MWh, conforme a Portaria MME nº 65/2018 mencionada

4 O Valor de Referência Específico para cada fonte (VRES) consiste no valor limitar permitido de repasse das distribuidoras às tarifas do consumidor final, na ocasião em que compram bioeletricidade na modalidade de Geração Distribuída (ÚNICA, s.d.).

pela ÚNICA (s.d.).

Desse modo, foram produzidos 4 cenários, quais sejam:

- Cenário 1: Valor de R\$ 509,74R\$/MWh, conforme a Silva *et al.* (2017). Investimento conforme Equação (11)
- Cenário 2: Valor de R\$ 509,74R\$/MWh, conforme a Silva *et al.* (2017). Investimento de 2.402/kW (Tolmasquim, 2016).
- Cenário 3: VRES de R\$ 390,00/MWh, conforme a Portaria MME nº 65/2018. Investimento conforme Equação (11)
- Cenário 4: VRES de R\$ 390,00/MWh, conforme a Portaria MME nº 65/2018 Investimento de 2.402/kW (Tolmasquim, 2016).

#### 4. Resultados e análises

##### 4.1 Produção da vinhaça

Com relação ao cálculo do volume de vinhaça produzido, e fazendo-se uso dos dados da usina em questão, considerou-se a meta de moagem da safra 2017/18, que é de 21 milhões de toneladas. De acordo com Lora (2002), para usinas que produzam açúcar e etanol, o valor médio de produção de vinhaça por tonelada de cana é de 156 litros por tonelada moída. Dessa maneira fazendo-se uso da Equação 1, tem-se um volume de vinhaça de  $3,276 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ .

##### 4.2. Produção de energia da vinhaça

Para o cálculo da DQO total, foi utilizada dados de DQO típica média realizada por medições na usina, que no caso foi de  $20 \text{ kg/m}^3$ . Também, foi considerado a proporção de geração de geração de 400 litros de vinhaça a cada tonelada de cana moída. Por

fim, levou-se em consideração a meta de moagem para safra 2016/17, no caso de 21 milhões de toneladas. Dessa maneira, foi possível obter a DQO total = 168000 t.

Segundo Moraes *et al.*, a média dos valores de eficiência dos reatores UASB mesofílicos consiste em cerca de 74% de remoção de DQO. Dessa maneira, a DQO removida pode ser calculada de acordo com a Equação 13, sendo igual a 48484 t.

A partir da DQO removida, foi possível calcular a vazão de metano gerada pela vinhaça da usina estudo de caso. O fator de produção de metano específico, de acordo com Granato e Silva (2002), Silva (2016) e Santos *et al.* (2016b), é de  $0,33 \text{ l/g}_{\text{DQO}}$ . Assim, a vazão de metano obtida por meio da digestão anaeróbia da vinhaça foi de  $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Para o cálculo da potência energética foram consultados os dados da literatura pertinente. Considerando o percentual médio de 90% de metano no biogás (AEBIOM, 2009), o rendimento de 33% de um motor a combustão interna (CETESB, 2006) e o PCI do metano com a concentração de metano supracitado de  $3,5 \text{ MJ/m}^3$  (QASIN, 1999), pode-se calcular a potência derivada da energia do biogás, sendo igual a 5349,31 kW.

Considerando o tempo de funcionamento de 8000 horas/safra, pode-se calcular o potencial energético da usina em estudo. Assim, foi possível obter:  $E = 125626,19 \text{ kWh/d}$ .

Os resultados estão compilados na Tabela 2.

Tabela 2: Resumo das variáveis e resultados

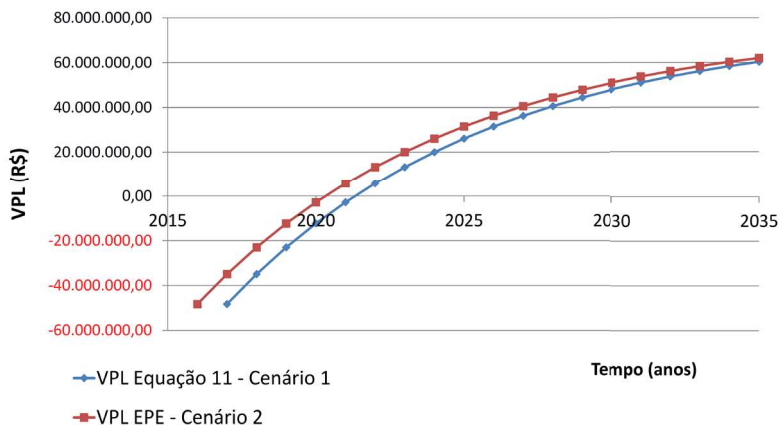
Parâmetros	Quantidade	Unidade
Meta de Moagem Safra 2017/18	21.000.000,00	t
DQO típica da Vinhaça da Usina	20	kg/m <sup>3</sup>
Produção de Vinhaça por t	156	l/t
Capacidade de Moagem na safra	21.000.000,00	t
	3.276.000.000,00	l
Volume de Vinhaça	3.276.000,00	m <sup>3</sup>
DQO total	65.520.000,00	kg
Eficiência UASB mesofílico	0,74	
DQO removida	48.484.800,00	kg
Fp CH <sub>4</sub>	0,33	l/gDQO
DQO removida	48.484.800.000,00	g
Q <sub>CH<sub>4</sub></sub>	15.999.984.000,00	l/d
Rendimento do Motor	0,33	
PCI <sub>CH<sub>4</sub></sub>	35.500.000,00	J/m <sup>3</sup>
Teor de Metano no Biogás	0,6	
	5.349,31	kW
Potência	5,35	MW
Tempo de Funcionamento Usina de Cana-de-Açúcar	8000	horas
Energia	42.794.477,75	kWh/Safra(ano)
Horas Anuais	8760	h/ano
Energia horária	117.245,14	kWh/h

### 4.3. Resultados de cálculos econômicos

Como a potência resultou em 5.349,31 kW, foi considerado para os cálculos econômicos, o valor de Potência de 5MW, para que se encaixe

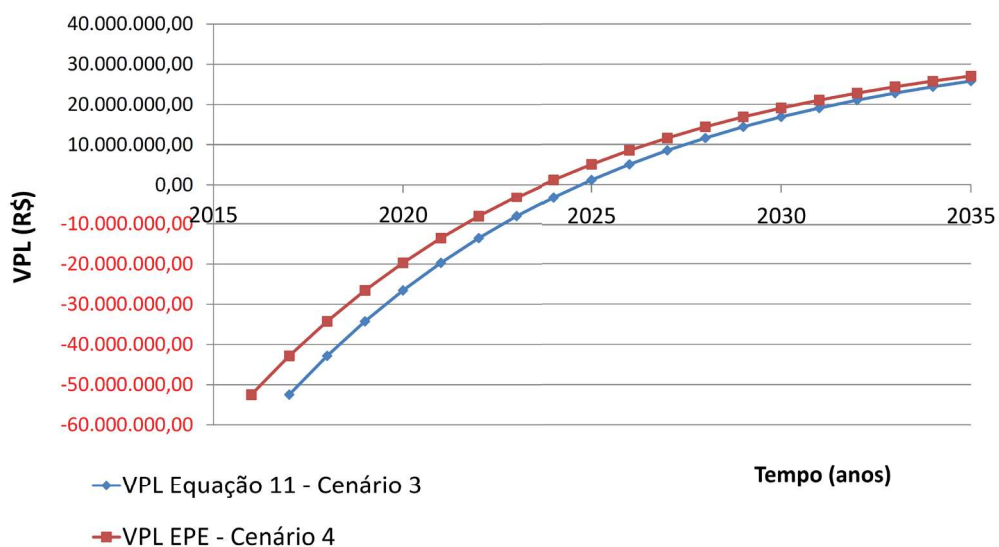
nos requisitos das resoluções ANEEL 482/2012 e 687/2015 (ANEEL, 2012; 2015). Os resultados de cálculos econômicos estão demonstrados no gráfico da Figura 4 para os cenários 1 e 2.

Figura 4: Resultados de VPL para os custos de investimento de Silva et al. (2017) e Tolmasquim (2016)



Do gráfico da Figura 4, é possível verificar que, tanto considerando os resultados de investimento de Silva et al. (2017) e de Tolmasquim (2016), no âmbito das resoluções ANEEL 482/2012 e 687/2015 (ANEEL, 2012; 2015) há viabilidade financeira, com *payback* de ambos após o 4º ano de operação (Cenários 1 e 2). Para os cenários 3 e 4, os resultados de VPL estão apresentados no gráfico da Figura 5.

Figura 5: Resultados de VPL para os custos de investimento de Silva et al. (2017) e EPE (2016)



Do gráfico da Figura 4, é possível verificar que, tanto considerando os resultados de investimento de Silva et al. (2017) e de Tolmasquim (2016), no âmbito da Portaria MME nº 65/2018, em que a VRES é de R\$ 390,00/MWh, há viabilidade financeira, com *payback* de ambos após o 7º ano de operação (Cenário 3) e 7º ano de operação (Cenário 4).

## 5. CONCLUSÕES

No presente estudo, foram avaliados substratos comumente encontrados próximos aos centros urbanos, que podem representar combustíveis em potencial para aproveitamento energético. O substrato foi a vinhaça. Foi efetuada uma análise de geração de energia elétrica a partir do biogás da DA.

Nota-se que a vinhaça possui um potencial bastante significativo para a produção energética, superando a energia gerada por lodos UASB, devido à seu rico teor de matéria orgânica. Não se pode esquecer, entretanto, as dificuldades da DA inerentes a esse substrato.

Entretanto, a DA da vinhaça ainda se apresenta como uma alternativa bastante interessante para as usinas açucareiras. Além disso, as usinas geralmente já trabalham com geração energética a partir do bagaço, gerando mais um subproduto, a energia elétrica, sobretudo em locais próximos ao centro consumidor.

Há viabilidade econômica para o empreendimento de 5MW de Potência estudado com *payback* a partir do 4º ano de operação (Cenários 1 e 2), e no âmbito da Portaria MME nº 65/2018, após o 7º ano de operação (Cenário 3) e 7º ano de operação

## 6. REFERÊNCIAS

AEBIOM. **A Biogas road map for Europe**. European Biomass Association, 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Resolução Normativa nº 414, de 09 de setembro de 2010. Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>. Acesso em: 24 de nov. de 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso da microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, ao sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras medidas. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 16 de out. de 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição - PRODIST. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 22 de out. de 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Geração Distribuída**. Publicado: 28/09/2015 10:48, última modificação: 15/08/2018 14:11. Disponível em: [https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida?p\\_p\\_](https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida?p_p_)

- id=101&p\_p\_lifecycle=0&p\_p\_state=maximized&\_101\_struts\_action=%2Fasset\_publisher%2Fview\_content&\_101\_assetEntryId=14461914&\_101\_type=content&\_101\_groupId=656827&\_101\_urlTitle=geracao-distribuida-introduc-1&inheritRedirect=true. Acesso em: 24 de nov. de 2020.
- AGRICULTURA BRASILEIRA, 2., 1984, Brasília. **Anais**. Brasília: Embrapa, 1984. p. 451-475.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. Cotações. 23 de nov. de 2020. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/> Acesso em 23 de nov. de 2020.
- BERNAL, A. P. et al. Vinasse biogas for energy generation in Brazil: An assessment of economic feasibility, energy potential and avoided CO<sub>2</sub> emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, p. 260-271, 2017.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Seção 1.
- BRASIL. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 23 dez. 2010. Seção 1, Edição Extra.
- BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogas. Metanização seca de última geração (O estado da arte da tecnologia de metanização seca) / Tecnologia de probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autor, Luis Felipe de Dornfeld Braga Colturato. - Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015. 97 p. ISBN 978-85-7958-040-6.
- COELHO, S. T. et al. A conversão da fonte renovável biogás em energia. In: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. 2006.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Manual do Programa de computador Biogás: geração e uso energético - efluentes e resíduo rural versão 1.0/CETESB. São Paulo: SMA: CETESB: MCT, 2006.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Norma Técnica P4.231: **Vinhaça** – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola, 3ª Edição. 2ª versão. São Paulo: CETESB, fevereiro de 2015. 15 p. Disponível em: [https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2013/11/P4.231\\_Vinha%C3%A7a-Crit%C3%A9rios-e-procedimentos-para-aplica%C3%A7%C3%A3o-no-solo-agr%C3%ADcola-3%C2%AA-Ed-2%C2%AA-VERS%C3%830.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2013/11/P4.231_Vinha%C3%A7a-Crit%C3%A9rios-e-procedimentos-para-aplica%C3%A7%C3%A3o-no-solo-agr%C3%ADcola-3%C2%AA-Ed-2%C2%AA-VERS%C3%830.pdf) Acesso em: 10 de nov. de 2020.
- COMPARETTI, A. et al. Current state and future of biogas and digestate production. **Bulgarian Journal of Agricultural Science**, v. 19, n. 1, p. 1-14, 2013.
- CORTEZ, L.; MAGALHÃES, P.; HAPPI, J. Principais subprodutos

- da agroindústria canavieira e sua valorização. **Revista brasileira de energia**, v. 2, n. 2, p. 111, 1992.
- COSTA, D. F. da. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. 2006. 194 p. Dissertação (Mestrado – programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) - Universidade de São Paulo.
- FUESS, L. T.; GARCIA, M. L. Implications of stillage land disposal: a critical review on the impacts of fertigation. **Journal of environmental management**, v. 145, p. 210-229, 2014.
- FUESS, L. T; ZAIAT, M. Economics of anaerobic digestion for processing sugarcane vinasse: Applying sensitivity analysis to increase process profitability in diversified biogas applications. **Process Safety and Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part B**. Apr. de 2018, V. 115 Issue Part B, p. 27-37. 11p, 2017.
- GRANATO, E. F.; SILVA, C. L. **Geração de energia elétrica a partir do resíduo vinhaça**. Anais. 4. Encontro Energia no Meio Rural, 2002. 2002000200006#:~:text=Esta%20produ%20atrav%20aproximadamente%20kWh%20. Acesso em: 10 de nov. de 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **A Geografia da cana-de-açúcar** / IBGE, Coordenação de Geografia. - Rio de Janeiro : IBGE, 2017. 172p. Acima do título: Dinâmica territorial da produção agropecuária. ISBN 978-85-240-4443-4. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101436> Acesso em: 24 de nov. de 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola** - outubro 2020, Dados divulgados na terça-feira, 10 de novembro de 2020 - 08:59:59. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil> Acesso em: 24 de nov. de 2020.
- KHAN, Imran Ullah et al. Biogas as a renewable energy fuel–A review of biogas upgrading, utilisation and storage. **Energy Conversion and Management**, v. 150, p. 277-294, 2017.
- LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C. Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES. 2012. 106 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.
- LORA, E. E. S. Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2002.
- ORLANDO FILHO, L.; LEME, E. J. de M. A utilização agrícola dos resíduos da agroindústria canavieira. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA. 1984. p. 451-475.
- PENATTI, C. P.; DONZELLI, J. L. **Uso da Vinhaça na Lavoura de Cana-de-Açúcar**. Relatório Técnico, CTC - Centro de Tecnologia Coopersucar, COPERSUCAR, Piracicaba, SP, 2000.
- QASIN, S. R. **Wastewater**



- Treatment Plants** – Planning, design and operation. 2 ed. Lancaster, Pennsylvania, USA Technomic Publishing Company, 1999. 1107 p.
- SANTOS, I. F. S. et al. Economic and CO<sub>2</sub> avoided emissions analysis of WWTP biogas recovery and its use in a small power plant in Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 17, p. 77-84, 2016b.
- SANTOS, I. F. S.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L. Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 504-514, 2016a.
- SILVA, A. P. M.. **Lodo de Leito de Secagem (LLS): Caracterização, aproveitamento energético e avaliação do Ciclo de Vida**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá.
- SILVA, M. A. S da; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2017.
- SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA -SIGA/ANEEL. **Matriz por fonte e combustível final**. Disponível em: <https://app.powerbi.com/w?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWZWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>. Acesso em: 10 de nov. de 2020.
- TOLMASQUIM, M. T. Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear / Mauricio Tiomno. Tolmasquim (coord). – EPE: Rio de Janeiro, 2016, 417p.
- União da Indústria de Cana-de-Açúcar - ÚNICA. **Balanco de atividades 2012/2013 a 2018/2019**. Disponível em: <https://www.unica.com.br/wp-content/uploads/2019/06/Relatorio-Atividades-201213-a-201819.pdf>. Acesso em 24 de nov. de 2020. p. 13.
- WEILAND, P. Biogas production: current state and perspectives. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 85, n. 4, p. 849-860, 2010.