

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ENGENHARIA DE ENERGIA

**ANÁLISE SOBRE UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS COMO COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO  
EM SECADORES DE GRÃOS A LENHA**

por

**José Mário Zamban Filho**

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, Agosto de 2023.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE ENERGIA

**ANÁLISE SOBRE UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS COMO COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO  
EM SECADORES DE GRÃOS A LENHA**

por

José Mário Zamban Filho

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne  
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu Zevallos

Banca examinadora:

Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu Zevallos – DEMEC / UFRGS

Profª. Drª. Thamy Cristina Hayashi – DEMEC / UFRGS

Prof. Dr. Felipe Roman Centeno – DEMEC / UFRGS

Porto Alegre, Agosto de 2023.

*“Troubles will come, and they will pass...”*  
(Lynyrd Skynyrd)

ZAMBAN FILHO, J. M. **Análise sobre utilização de biogás como combustível alternativo em secadores de grãos a lenha.** 2023. 32 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

## RESUMO

Considerando a importância do agronegócio no desenvolvimento do país, desde a geração de empregos até o fornecimento de alimentos, juntamente com as novas ferramentas de geração e aproveitamento de energia de uma forma consciente e sustentável dos recursos naturais disponíveis, este trabalho apresenta uma análise sobre a utilização de biogás como combustível alternativo na queima para geração de calor nas fornalhas de secadores de grãos a lenha. O modelo de análise se apresenta como uma alternativa de exploração e aproveitamento consciente da produção e utilização do biogás disponível nas áreas rurais, o que contribui para diminuir o consumo da matéria prima principal usada nas fornalhas, a lenha, e, assim, também evitar que esse gás proveniente de resíduos orgânicos siga seu percurso natural em que carrega consigo um alto poder de poluição. O estudo abrange desde a estimativa de geração de biogás a partir de dejetos animais, em que apresenta um coeficiente de produção de 0,794 m<sup>3</sup> de biogás para cada 1 m<sup>3</sup> de biodigestor na temperatura de 25°C, até as correlações das características termodinâmicas da queima de dois combustíveis, biogás e lenha, dentro da fornalha de um secador de grãos com o objetivo de aquecer uma massa de ar até uma temperatura desejada. Com o objetivo de se alcançar uma temperatura final de mistura de gases de exaustão e ar atmosférico de 400K, chegou-se ao resultado de relação de massa (kg-ar/kg-combustível) de 194,6 para o biogás e de 154,8 de média para as lenhas analisadas. Essa análise permitiu observar as características do biogás em relação à lenha como combustível para o mesmo processo de secagem de grãos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Biogás, Lenha, Primeira Lei da Termodinâmica, Secagem de grãos.

ZAMBAN FILHO, J. M. **Analysis of the use of biogas as an alternative fuel in wood-fired grain dryers**. 2023. 32 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

### **ABSTRACT**

Considering the importance of agribusiness in the country's development, from job creation to food supply, along with new tools for generating and harnessing energy in a conscious and sustainable way from available natural resources, this paper presents an analysis of the use of biogas as an alternative fuel in burning to generate heat in wood grain dryer furnaces. The analysis model is presented as an alternative for exploration and conscious use of the production and use of biogas available in rural areas, which contributes to reducing the consumption of the main raw material used in the furnaces, firewood, and, thus, also to prevent this gas from organic waste follows its natural course, carrying a high pollution power. The study ranges from the estimation of biogas generation from animal jets, which presents a production coefficient of 0.794 m<sup>3</sup> of biogas for each 1 m<sup>3</sup> of biodigester at a temperature of 25°C, to the correlations of the thermodynamic characteristics of burning two fuels, biogas and firewood, inside the furnace of a grain dryer in order to heat an air mass to the desired temperature. With the aim of reaching a final temperature of 400K for the mixture of combustion gases and atmospheric air, a mass ratio (kg-air/kg-fuel) of 194.6 for biogas and 154.8 average for proven firewoods. This analysis allowed observing the characteristics of biogas in relation to firewood as fuel for the same grain drying process.

**KEYWORDS:** Biogas, Wood, First Law of Thermodynamics, Grain Drying.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Objetivo .....	1
1.2	Estrutura da monografia .....	2
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	2
2.1	Biogás .....	3
2.1.1	Biodigestores.....	3
2.1.2	Fatores e parâmetros que influenciam na geração de biogás.....	3
2.1.3	Modelo de Chen.....	4
2.1.4	Poder calorífico do biogás.....	5
2.2	Secagem de grãos .....	6
2.2.1	Umidade relativa de grãos .....	6
2.2.2	Secagem artificial de grãos .....	6
2.2.3	Secador de fluxo misto.....	7
2.2.4	Fornalha.....	8
2.2.5	Lenha .....	8
2.2.6	Poder calorífico da lenha de eucalipto e pinus .....	9
2.3	Análise termodinâmica.....	9
2.3.1	Primeira Lei da Termodinâmica para um sistema aberto.....	9
2.3.2	Relação entre a massa de ar e combustível.....	10
2.3.3	Entalpia padrão e de formação.....	10
2.3.4	Temperatura de chama adiabática .....	11
3	METODOLOGIA DESENVOLVIDA .....	12
3.1	Modelagem do sistema .....	13
3.2	Modelagem da produção de biogás .....	14
4	RESULTADOS.....	15
4.1	Temperaturas de chama adiabática do biogás e da lenha .....	15
4.2	Balanco energético .....	16
4.3	Produção de biogás.....	16
5	CONCLUSÃO .....	17
	REFERÊNCIAS .....	19

## 1 INTRODUÇÃO

As atividades de produção, beneficiamento e transformação dos produtos provenientes da agricultura e pecuária no Brasil são umas de suas principais atividades econômicas, representando mais de 21% do PIB e gerando 1 a cada 3 empregos no país. Apesar de sua importância econômica e na geração de empregos, o setor também é um dos mais impactantes na geração de resíduos e sua cadeia de produção e distribuição tem grande parcela de contribuição nas emissões de gases do efeito estufa (ABIOGÁS, 2013).

No entanto, embora a alta produtividade de animais proporcione o desenvolvimento econômico, é preciso ressaltar que os mesmos animais produzem resíduos altamente poluentes. Portanto, há a necessidade de se indagar as questões ambientais desta atividade econômica. Entre as alternativas viáveis atualmente, a digestão anaeróbia destes resíduos se destaca como uma forma de promover a reciclagem e a geração de energia, além do fato de que a natureza das transformações biológicas durante o processo de digestão fornece como um dos produtos finais o biogás, produto com grande potencial energético (RESENDE *et al.*, 2015).

O processo de digestão anaeróbia a partir de dejetos caracteriza-se atualmente como a chave para um sistema de produção mais sustentável, devido à redução do uso de energias convencionais e fertilizantes comerciais, além de fornecer um método altamente eficiente para reciclagem de recursos e fechamento do ciclo de produção. Afinal, a crescente busca por novas fontes alternativas para produção de energia e reciclagem de resíduos aponta para a utilização dos dejetos animais como opção economicamente viável dada a relevância da atividade pecuária no Brasil (ABBASI *et al.*, 2012).

Pecora (2006) afirma que até pouco tempo, o biogás era simplesmente conhecido como um subproduto obtido a partir da decomposição anaeróbica de lixo urbano, resíduos animais e de estações de tratamento de efluentes domésticos. No entanto, o acelerado desenvolvimento econômico dos últimos anos e a alta acentuada do preço dos combustíveis convencionais têm encorajado as investigações na produção de energia a partir de novas fontes renováveis e economicamente atrativas, tentando sempre que possível, criar novas formas de produção energética que possibilitem a poupança dos recursos naturais esgotáveis.

Dentro do processo do agronegócio, também se encontra a atividade de beneficiamento, secagem e armazenagem de grãos, a qual é de suma importância para manter uma boa qualidade dos produtos gerados. Há necessidade, portanto, de recursos combustíveis para serem utilizados na parte de secagem de grãos. Os diversos modelos de secadores existentes no mercado operam com variadas fontes de energia, destacando-se lenha, resíduos orgânicos diversos, óleo diesel e *fuel oil*. A lenha é atualmente o combustível mais usado na secagem de grãos no Brasil (EMBRAPA, 2002).

A secagem é uma das etapas do pré-processamento dos produtos agrícolas que tem por finalidade retirar parte da água neles contida. É definida como um processo simultâneo de transferência de calor e massa (umidade) entre o produto e o ar de secagem. A remoção da umidade deve ser feita em um nível tal que o produto fique em equilíbrio com o ar ambiente onde será feito o armazenamento e deve ser feita de modo a preservar a aparência, as qualidades nutritivas e, no caso de grãos, a viabilidade como semente.

O contexto no qual o problema de pesquisa a ser resolvido se insere é na substituição de combustíveis para o mesmo objetivo dentro da secagem de grãos, uma vez que o combustível alternativo pode ser obtido de uma matéria prima que normalmente se encontra muito próxima do produtor rural, como dejetos animais. Estudos sobre esse tema específico não foram encontrados na literatura.

### 1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa no contexto do processo de secagem de grãos em sistemas que utilizam lenha como combustível principal, visando a inclusão de biogás como combustível alternativo para essa queima, com o propósito de gerar calor e aquecer uma massa de ar. Dentro do objetivo principal do trabalho, destaca-se também o levantamento do potencial de geração de biogás, por meio de modelo matemático.

## 1.2 Estrutura da monografia

A análise deste trabalho tem início com uma revisão sobre a formação do biogás, principalmente a partir de resíduos animais, por meio do processo de digestão anaeróbia. Em seguida, é investigado o sistema termodinâmico presente no processo de secagem de grãos, focando na análise da fornalha, que envolve a interação entre o combustível, o ar atmosférico e a massa dos gases de exaustão aquecidos. Esses gases desempenham o papel de fluido de trabalho, responsável pela remoção da umidade dos grãos durante a secagem. Nesse contexto, são consideradas as temperaturas necessárias para o processo ocorrer de forma controlada, assim como a relação da vazão mássica entre o combustível e o ar atmosférico. Por fim, fazer uma avaliação termodinâmica a cerca da utilização de biogás como combustível alternativo dentro do processo de secagem de grãos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Massé *et al.* (2011) destacam a importância ambiental da utilização de biodigestores para produção de biogás na criação de animais. Esta prática contribui para a redução da emissão de gases do efeito estufa (que ocorreria na fermentação dos dejetos ao ar livre), e reduz os riscos de eutrofização de veios da água e contaminação por patógenos presentes nos dejetos. Além disso, diminui a necessidade de utilização de fertilizantes químicos devido ao biofertilizante subproduto da biodigestão.

Santos e Nardi Jr. (2013) discorrem sobre os benefícios do uso do biogás que, por ser uma opção energética renovável de ótimo rendimento, proporciona o desenvolvimento econômico e a melhoria do setor energético local.

Blanco *et al.* (2015) verificaram a eficiência do tratamento de dejetos suínos em biodigestores de lagoa coberta localizados em duas granjas no estado de Yucatan, no México. Os resultados de ambos se mostraram satisfatórios, com redução da demanda química de oxigênio em 90% e 78% e remoção de 71% e 62% dos sólidos totais, respectivamente. Dal Mago *et al.* (2010) avaliaram 12 biodigestores localizados em granjas suínolas no estado de Santa Catarina. O estudo concluiu que a eficiência média de remoção de matéria orgânica nos biodigestores foi de 71% para a demanda química de oxigênio, 66% para os sólidos totais e 74% para sólidos voláteis. Nos biodigestores estudados a vazão média de biogás foi de 5,7 m<sup>3</sup>/h.

Brown *et al.* (2007) e Yiridoe *et al.* (2009) realizaram estudos de viabilidade econômica de geração de energia elétrica a partir do biogás da suinocultura no estado de Nova Scotia, no Canadá. Ambos os estudos demonstraram não haver viabilidade para granjas pequenas e médias. Os autores chegaram em resultados financeiros favoráveis somente em suinoculturas com 600 ou mais matrizes.

A secagem de produtos agrícolas com ar quente e circulação forçada vem sendo usada no Brasil desde o século passado. Um dos problemas fundamentais desse processo é o sistema de aquecimento de ar, que demanda grande consumo de energia. (EMBRAPA, 2002)

Silva (2005) caracteriza a secagem artificial por forçar uma vazão de ar aquecido a passar por certo volume de grãos estáticos ou em movimento. Neste processo deve-se ter cuidado para que esse ar quente não passe todo diretamente nos grãos próximos a entrada do ar quente e também para que os grãos mais distantes não fiquem sem ar quente

Magalhães (2007) cita que para assegurar a queima dos combustíveis que fornecerão calor ao ar e promover a secagem dos grãos, a fornalha basicamente deve ser constituída de câmara de combustão, grelha, cinzeiro, entrada de ar, saída de gases e sistema de alimentação.

Magalhães (2007) menciona que existem basicamente dois tipos de fornalhas, as de fogo direto onde o ar de secagem é proveniente dos gases de combustão e as de fogo indireto, onde se utiliza um trocador de calor.



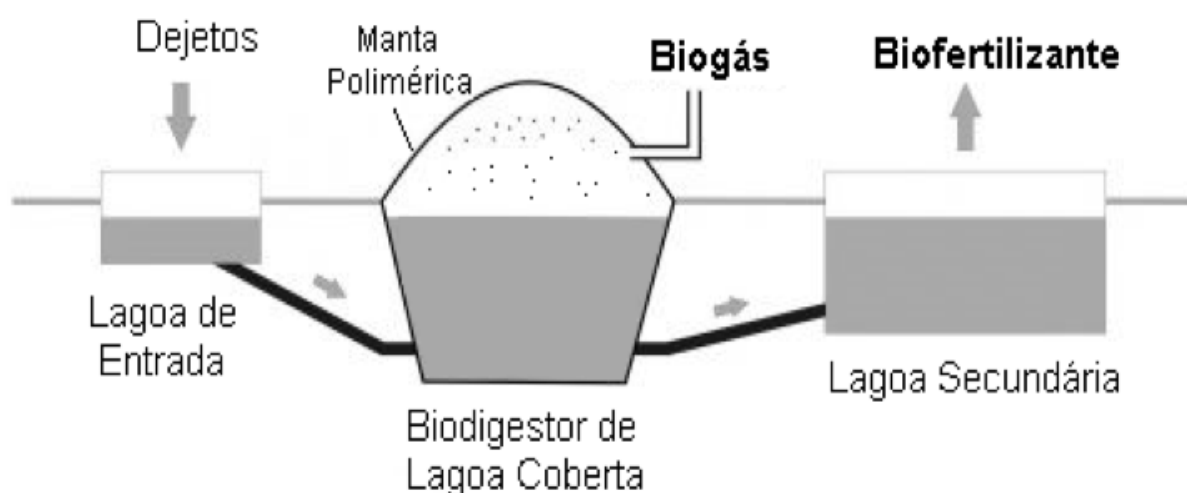
## 2.1 Biogás

### 2.1.1 Biodigestores

É a partir dos biodigestores que é possível criar um ambiente sem oxigênio e, ao receberem efluentes líquidos, propiciam a liberação de gases. Devido à ação de microrganismos, a decomposição da matéria orgânica gera biogás, o qual fica armazenado na área livre da cúpula do biodigestor; nesse caso, transformado em gasômetro ou com função de acumulação do gás no gasômetro. Após essa reação, o biogás é canalizado e pode ser utilizado para diversas finalidades: processos de aquecimento, resfriamento ou qualquer processo de geração de energia elétrica da qual utilize esse combustível (JÚNIOR, 2009).

Na Figura 2.1, é possível observar um esquema de biodigestor de lagoa coberta, levando em consideração que este é um dos mais utilizados para a obtenção de biogás em larga escala.

Figura 2.1- Esquema de biodigestor de lagoa coberta.



Fonte: Adaptado de NOVUS, 2016.

O biodigestor de lagoa coberta é uma tecnologia amplamente utilizada na geração de biogás em larga escala, apresentando diversas vantagens. Esse processo proporciona o fornecimento de combustível, por meio do biogás, e adubo, através do biofertilizante, especialmente benéfico para o meio rural. Além disso, há a valorização dos dejetos para uso agrônômico, a redução do poder poluente e do nível de patógenos, bem como a exigência de menor tempo de utilização hidráulica e área quando comparado a outros sistemas anaeróbios. Outro benefício é a possibilidade de geração de créditos de carbono, certificados emitidos para agentes que reduziram suas emissões de gases do efeito estufa (GEE) (PEREIRA, 2005).

Por outro lado, é importante considerar algumas desvantagens desse processo. O principal obstáculo é o tempo necessário para o processo de fermentação anaeróbia, que depende das bactérias metanogênicas, cuja velocidade de crescimento é lenta. Isso resulta em um tempo prolongado de retenção dos sólidos. Além disso, é necessário garantir a homogeneização dos dejetos para assegurar a eficiência do sistema. Esses aspectos devem ser considerados ao avaliar a viabilidade e a eficácia do biodigestor de lagoa coberta como tecnologia de geração de biogás em projetos de engenharia (PEREIRA, 2005).

### 2.1.2 Fatores e parâmetros que influenciam na geração de biogás

Diversos parâmetros e fatores são essenciais para o processo de biodigestão anaeróbia, conforme apontado por Nishimura (2009) e Fernandes (2012):

- Temperatura: fator determinante, uma vez que influencia a atividade metabólica das bactérias anaeróbias. Geralmente, a faixa ideal de temperatura para a produção de biogás situa-se entre a mesofilia (20-45°C) e a termofilia (45-60°C).

- pH: parâmetro crucial, pois afeta o metabolismo e o equilíbrio das populações microbianas envolvidas no processo de formação de biogás. A faixa de pH ótimo situa-se entre 6 e 8, considerada neutra. Fora dessa faixa, pode ocorrer a inibição de certos grupos microbianos e a redução da eficiência do processo.
- Disponibilidade de nutrientes: fundamental para o funcionamento eficiente do processo de biodigestão anaeróbia. Além da fonte de carbono orgânico, é necessário fornecer nutrientes como nitrogênio, potássio, fósforo e enxofre para os microrganismos envolvidos. A relação carbono/nitrogênio (C/N) desempenha um papel importante, sendo recomendada uma relação próxima a 15 para dejetos suínos. Relações C/N inferiores a 8 podem levar à formação excessiva de amônia, inibindo a atividade bacteriana.
- Concentração de sólidos voláteis (SV): influencia diretamente a produção de biogás. Baixas concentrações de SV resultam em um potencial reduzido de geração de biogás, enquanto altas concentrações podem causar inibição bacteriana devido ao excesso de substrato.
- Tempo de retenção hidráulica: período necessário para que o substrato seja completamente digerido pelo processo anaeróbio no biodigestor. No caso de dejetos suínos, esse tempo varia de 20 a 50 dias, dependendo das características específicas do sistema.
- Presença de substâncias tóxicas: como antibióticos, inseticidas e desinfetantes, pode comprometer a atividade microbiana no biodigestor, inibindo a produção de biogás.

Esses parâmetros e fatores devem ser cuidadosamente monitorados e controlados durante o projeto e a operação de sistemas de biodigestão anaeróbia, visando obter um processo eficiente e sustentável de produção de biogás

### 2.1.3 Modelo de Chen

O modelo desenvolvido por Chen (1983) é focado na determinação do potencial teórico de metano fazendo algumas considerações sobre configurações de reatores anaeróbios (EMBRAPA, 2018). Neste estudo, a única adaptação realizada foi a equivalência do resultado final em metano para obter o valor estimado em biogás, considerando que o metano representa 60% do biogás.

O modelo aborda parâmetros importantes como os sólidos voláteis (SV) e a capacidade máxima de produção de biogás por dejetos ( $Bo$ ) e, portanto, tem sido muito utilizada para estimar o potencial teórico de produção de biogás (OLIVEIRA e HIGARASHI, 2006). A seguir, as Eqs. (2.1) a (2.4) demonstram como obter as variáveis para o cálculo de biogás a partir dessa metodologia. Chen, 1983, validou o modelo utilizando dejetos suínos, a partir de dados experimentais próprios e de outros pesquisadores.

A produtividade em  $m^3$  de metano por  $m^3$  do biodigestor ao dia ( $PdM$ ) é calculada por:

$$PdM = \frac{Bo \times SV}{TRH} \times 1 - \left( \frac{k}{TRH \times \mu m - 1 + k} \right) \quad (2.1)$$

em que  $Bo$  é a capacidade de produção de metano pelo dejetos em  $m^3_{CH_4} \cdot Kg_{SV}^{-1}$ ,  $SV$  é a concentração de sólidos voláteis em  $g_{SV} \cdot L^{-1}$ ,  $TRH$  é o tempo de retenção hidráulica em dias,  $k$  é o coeficiente cinético adimensional e  $\mu m$  é a velocidade máxima de crescimento específico em  $dia^{-1}$ .

O cálculo do coeficiente cinético é dado por:

$$k = 0,5 + 0,0043 \times e^{0,051 \times SV} \quad (2.2)$$

Na Eq. (2.2),  $SV$  é a concentração de sólidos voláteis em  $g_{SV} \cdot L^{-1}$ .

E o cálculo da velocidade de crescimento específico é dado por:

$$\mu m = 0,013 \times T - 0,0129 \quad (2.3)$$

em que  $T$  é a temperatura em  $^{\circ}C$ .

Portanto, a produção diária é estimada por:

$$PrM = PdM \times V_{bio} \quad (2.4)$$

Na Eq. (2.4), PrM é a produção diária de metano em  $m^3_{CH_4} \cdot dia^{-1}$ , PdM é a produtividade de metano em  $m^3_{CH_4} \cdot m^{-3}_{bio} \cdot dia^{-1}$  e  $V_{bio}$  é o volume do biodigestor em  $m^3$ .

Tabela 2.1 - Valores tabelados da metodologia de Chen para os parâmetros qualitativos.

Tipo de rebanho	SV ( $g_{SV} \cdot L^{-1}$ )	Bo ( $m^3_{CH_4} \cdot kg_{SV}^{-1}$ )
Suínos	31,50	0,50
Bovinos de leite	64,70	0,20

Fonte: EMBRAPA, 2018.

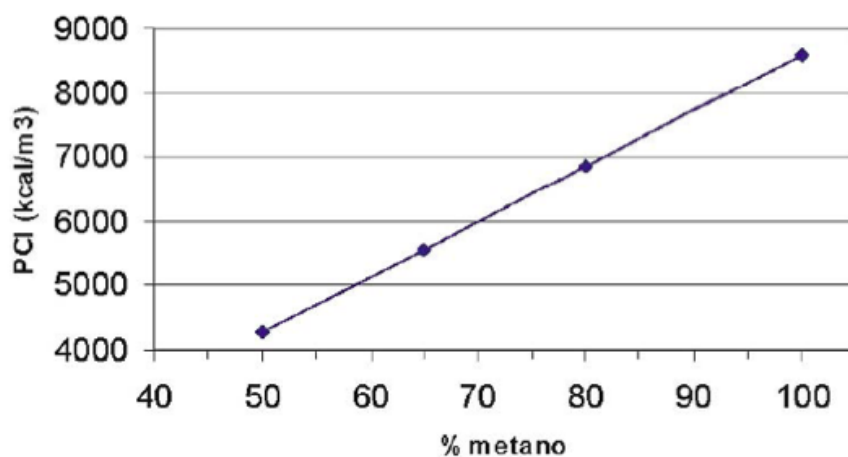
Em resumo, com a obtenção da concentração de sólidos voláteis, SV, da temperatura estimada de trabalho do biodigestor, T, do tempo de retenção hidráulica de projeto, TRH e da produção específica de metano, Bo, é possível calcular a produção de metano do biodigestor.

#### 2.1.4 Poder calorífico do biogás

O principal componente do biogás é o metano, quando se trata de utilizá-lo como combustível. Segundo Alves (2000), a presença de substâncias não combustíveis no biogás (água e dióxido de carbono) prejudica o processo de queima tornando-o menos eficiente. Estas substâncias entram com o combustível no processo de combustão e absorvem parte da energia gerada. O poder calorífico do biogás se torna menor à medida que se eleva a concentração das impurezas.

De acordo com Lima (2005), o poder calorífico do biogás está relacionado diretamente com a concentração de metano presente no combustível, como pode ser visto no gráfico da Figura 2.2, onde o PCI do biogás varia entre aproximadamente 4250 kcal/m<sup>3</sup>, para uma composição de 50% de CH<sub>4</sub> presente no biogás, a cerca de 8500 kcal/m<sup>3</sup>, para 100% de CH<sub>4</sub>.

Figura 2.2 - Comportamento do poder calorífico inferior do biogás com a variação percentual de metano.



Fonte: LIMA (2005).

É possível observar na Tabela 2.2, que segundo Iannicelli (2008), os valores para o PCI e para a massa específica referentes ao biogás em diferentes proporções de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> em sua composição.

Tabela 2.2- Massa específica e PCI do biogás para diferentes proporções de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>.

<b>Composição química do biogás</b>	<b>Massa específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>PCI (kcal/kg)</b>
10% CH <sub>4</sub> e 90% CO <sub>2</sub>	1,8393	465,43
40% CH <sub>4</sub> e 60% CO <sub>2</sub>	1,4603	2333,85
60% CH <sub>4</sub> e 40% CO <sub>2</sub>	1,2143	4229,98
65% CH <sub>4</sub> e 35% CO <sub>2</sub>	1,1518	4831,14
75% CH <sub>4</sub> e 25% CO <sub>2</sub>	1,0268	6253,01
95% CH <sub>4</sub> e 05% CO <sub>2</sub>	0,7768	10469,60
99% CH <sub>4</sub> e 01% CO <sub>2</sub>	0,7268	11661,02

Fonte: IANNICELLI (2008).

A Tabela 2.3 apresenta a comparação entre combustíveis utilizados frequentemente e sua equivalência ao biogás. É importante dar um destaque aos combustíveis poluidores, como a gasolina e a querosene, os quais, são suficientes apenas 1m<sup>3</sup> de biogás para poder ser utilizado na substituição de, respectivamente, 0,312 L e 0,342L desses combustíveis.

Tabela 2.3 – Comparativo entre o biogás e outros combustíveis.

<b>Combustíveis</b>	<b>Quantidade equivalente a 1m<sup>3</sup> de biogás</b>
Gasolina	0,312 L
Querosene	0,342 L
Óleo diesel	0,358 L
Gás de cozinha (GLP)	0,396 L
Lenha	1,450 kg

Fonte: Souza *et al.* (1981).

## 2.2 Secagem de grãos

### 2.2.1 Umidade relativa de grãos

A umidade relativa deve ser monitorada de forma a saber a umidade adequada do produto para armazenagem, devido ao equilíbrio que a umidade relativa e a umidade do produto tendem a atingir. Esse equilíbrio higroscópico é um fenômeno que deve ser dado atenção, pois, poderá necessitar de nova secagem devido à elevação da umidade dos grãos com o aumento da umidade ambiente e, caso a umidade relativa esteja muito baixa, o produto perderá água para o ambiente, ocasionando umidades inferiores, conforme afirmam DIAS *et al.* (2009).

### 2.2.2 Secagem artificial de grãos

O processo de secagem artificial baseia-se principalmente na passagem de ar pelo produto à temperatura ambiente ou aquecido (HALL, 1980) e pode ser feita utilizando o fluxo de ar sobre o produto e as possibilidades de vácuo, baixa temperatura, micro-ondas etc. Em geral, os métodos de secagem artificial utilizam diferentes condições de temperatura e fluxo de ar, tempo e morfologia do movimento das sementes ou grãos e contato ar-grão, e utilizam diferentes secadores disponíveis comercialmente de acordo com os princípios de operação (VILLELA e SILVA, 1992).

O processo de secagem em produtos agrícolas tornou-se fundamentalmente importante e aumenta ano após ano com o aumento da produção, tornando o armazenamento do produto mais seguro sem risco de deterioração, permitindo uma colheita precoce, próxima da maturidade fisiológica. Ajuda a manter a germinação das sementes por longos períodos, controla microrganismos e insetos e minimiza a perda de material no campo (SILVA *et al.*, 2008).

### 2.2.3 Secador de fluxo misto

Estruturalmente, os secadores de fluxos mistos tipo cavaletes, Figura 2.3, possuem uma torre central montada pela superposição vertical de caixa dutos. Uma caixa duto é formada por dutos montados em uma fileira horizontal. E é por entre os dutos que circula a massa de grãos em movimento semelhante a pequenas cascatas, o que define a denominação popular – secador cascata (CESAR, 2006).

Esse secador de grãos de fluxo misto opera com base nos princípios termodinâmicos para remover a umidade dos grãos. O processo envolve a transferência de calor do ar quente proveniente da fornalha para os grãos, seguindo um trajeto específico.

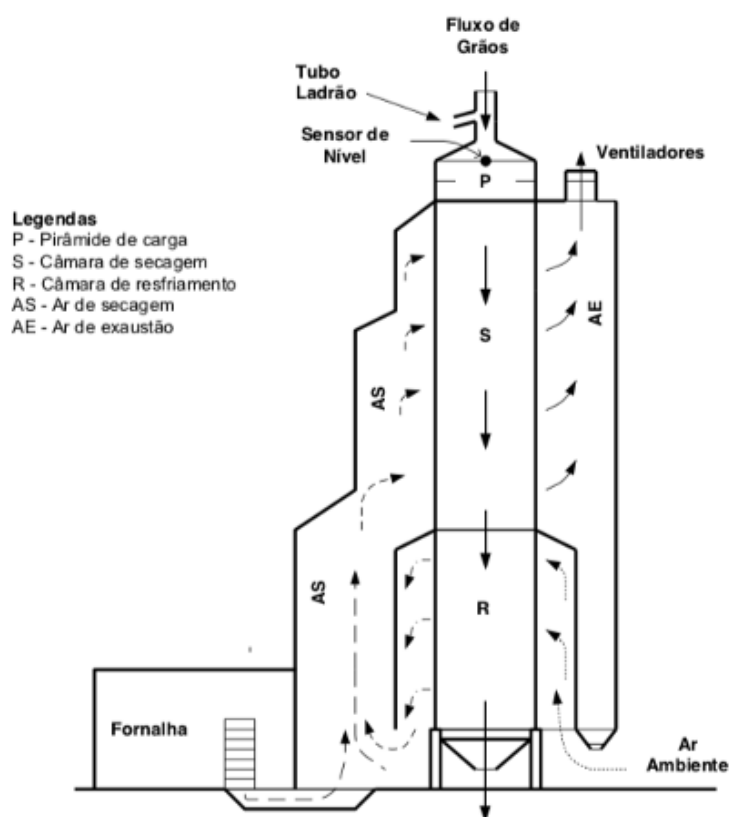
O ar frio é inicialmente aspirado do ambiente externo e pré-aquecido através do contato com os gases quentes da fornalha. Essa etapa ocorre em um trocador de calor, onde ocorre a transferência de energia térmica dos gases de combustão para o ar, elevando sua temperatura.

O ar pré-aquecido entra então no secador, onde ocorre a secagem propriamente dita. Na zona de secagem do secador de fluxo misto, o ar quente entra em contato com os grãos, fazendo com que a umidade presente nos grãos seja transferida para o ar, resultando em uma redução da umidade dos grãos e em um aumento da umidade relativa do ar. Essa transferência de umidade ocorre devido à diferença de pressão de vapor entre o ar e os grãos, impulsionada pela diferença de umidade entre eles.

Após passar pela zona de secagem, parte do ar quente é redirecionada para a zona de resfriamento. Nessa região, o ar quente entra em contato com os grãos já secos, transferindo calor para eles. Esse processo permite resfriar os grãos e reduzir sua temperatura antes do armazenamento, evitando danos e assegurando a estabilidade térmica.

Ao final do processo, o ar quente, agora carregado com a umidade removida dos grãos, é expelido do secador por meio de um exaustor. Os grãos secos são então encaminhados para o local de armazenamento. Esse processo pode ser melhor entendido analisando a figura abaixo.

Figura 2.3 – Desenho esquemático de um secador de grãos do tipo fluxo misto.



Fonte: UFES, 2006.

Como representado na Figura 2.3, 2/3 da altura da torre central corresponde à câmara de secagem. Sendo que pelo lado esquerdo entra o ar de secagem com temperaturas entre 80°C a 110°C. E

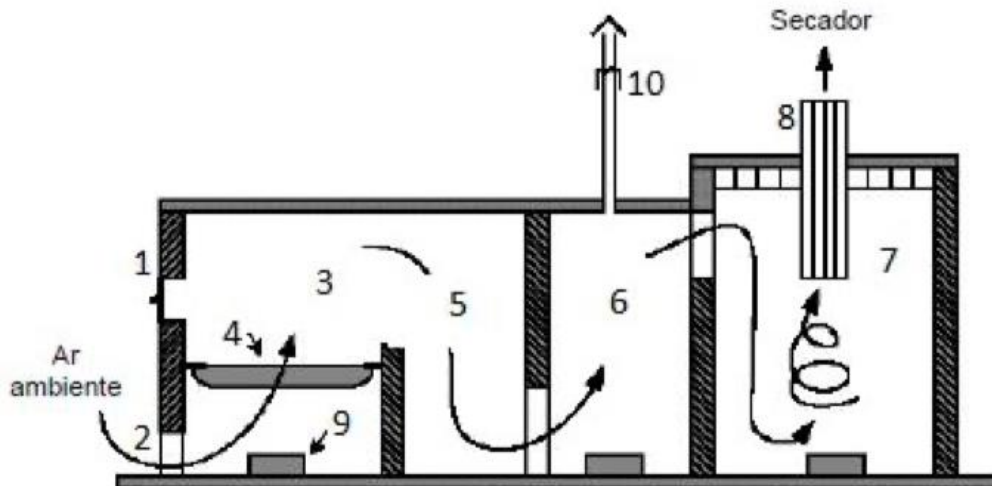
do lado direito é procedida a sucção do ar de exaustão, que geralmente possui temperatura de aproximadamente 7°C acima da temperatura ambiente (CESAR, 2006).

O 1/3 inferior da torre central corresponde à câmara de resfriamento, que tem por objetivo remover calor da massa de grãos, deixando-a com temperatura próxima a 30°C (CESAR, 2006).

### 2.2.4 Fornalha

A fornalha de um secador é responsável por promover a queima do combustível e direcionar os gases de exaustão, visando aproveitar ao máximo a energia térmica liberada durante a combustão. A estrutura arquitetônica da fornalha pode ser visualizada na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Desenho esquemático de uma fornalha típica.



Fonte: MAGALHAES, 2007.

O fluxo do combustível e do ar ambiente é representado pelas setas, enquanto cada componente da fornalha é identificado por um número de 1 a 10, conforme explicado a seguir.

1. Porta para carregamento: introdução do combustível na fornalha, nesse caso, a lenha ou biogás.
2. Entrada de ar primário: entrada de ar para a realização da combustão.
3. Câmara de combustão - primeiro estágio: ocorre a primeira etapa da queima da lenha.
4. Grelha: Estrutura localizada na câmara de combustão que mantém o combustível suspenso durante o processo de combustão.
5. Câmara de combustão - segundo estágio: Continuação da queima da lenha.
6. Câmara de combustão - terceiro estágio: Último estágio da câmara de combustão, onde a queima é finalizada.
7. Misturador tangencial - quebra chamas: promover uma mistura adequada entre os gases da combustão, evitando a propagação de chamas de volta para a câmara de combustão.
8. Duto de saída (tiragem superior): por onde os gases resultantes da combustão são direcionados para fora da fornalha.
9. Porta de remoção das cinzas: permite a retirada das cinzas geradas durante o processo de combustão.
10. Chaminé: local de saída final dos gases da combustão para o ambiente externo.

### 2.2.5 Lenha

De acordo com Barrichelo e Brito (1978), a madeira é um dos recursos mais abundantes na terra, produzida através do processo de fotossíntese. A energia solar captada neste processo é transformada em energia química fixada na matéria orgânica. A madeira sempre foi muito utilizada pelo homem em diversos processos, principalmente na cocção de alimentos e na calefação de ambientes (ROSSO, 2006).

A variedade de lenha *Eucalyptus* é uma das mais utilizadas na geração de calor, devido que esta tem um crescimento rápido e uma grande plasticidade, assim permitindo grandes áreas de reflorestamento. Também essa espécie de madeira possui características que favorecem para seu uso na combustão. (PEREIRA, 2012)

No Brasil, o plantio da espécie *Eucalyptus* segundo (ABRAF, 2011) é de 68,2% da área total de reflorestamento. Sendo que desse total, 37,5% é para a produção madeireira, 35,4% para o segmento de carvão e lenha, 15,8% para madeira serrada, 7,8% madeira industrializada e 3,5% para compensados.

## 2.2.6 Poder calorífico da lenha de eucalipto e pinus

O poder calorífico define-se como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa de combustível (JARA, 1989). No Sistema Internacional o poder calorífico é expresso em joules por grama ou quilojoules por quilo, mas pode ser expresso em calorias por grama ou quilocalorias por quilograma, segundo BRIANE & DOAT (1985).

O poder calorífico divide-se em superior e inferior. O poder calorífico superior é aquele em que a combustão se pode ser efetuada a volume constante e no qual a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é recuperado (BRIANE & DOAT, 1985). O poder calorífico inferior é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir a energia destinada à evaporação da água (JARA, 1989).

Na Tabela 2.4 são apresentados os valores referentes para o poder calorífico superior e para o poder calorífico inferior em função do teor de umidade de exemplos de eucalipto e pinus.

Tabela 2.4 – Valores do poder calorífico superior e do poder calorífico inferior em função do teor de umidade de alguns materiais ligno-celulósicos.

Combustível	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	TU (%)
<i>Eucalyptus</i> sp	4525	3854	10,5
Costaneiras de <i>Pinus</i> sp <sup>1</sup>	4978	4122	12,9
Costaneiras de <i>Pinus</i> sp <sup>2</sup>	4720	3894	12,9
Costaneiras de <i>Pinus</i> sp <sup>3</sup>	5036	4174	12,9

Fonte: LPF/IBAMA <sup>1</sup>Madeira com casca <sup>2</sup>Madeira <sup>3</sup>Casca

## 2.3 Análise termodinâmica

A termodinâmica é definida como a ciência da energia e da entropia, ou seja, é a ciência que trata do calor, do trabalho e daquelas propriedades das substâncias relacionadas ao calor e ao trabalho. Os objetivos dessa ciência é estabelecer critérios gerais para analisar o projeto e funcionamento de sistemas térmicos, cuja energia tem um papel importante (VAN WYLEN et al., 2003). São as leis na termodinâmica que descrevem suas descobertas experimentais.

Por ser um conceito recorrente à 1ª Lei, a ideia de energia deve ser previamente entendida. Simplificadamente define-se energia como a capacidade de produzir algum efeito (VAN WYLEN et al., 2003). Caso o sistema termodinâmico não esteja isolado, existem diferentes maneiras para transformação ou transferência de energia, tanto na forma de calor, quanto na forma de trabalho (DANTAS, 2010).

### 2.3.1 Primeira Lei da Termodinâmica para um sistema aberto

A primeira lei da termodinâmica, também conhecida como o princípio da conservação da energia, é um pilar fundamental da para o entendimento dos processos térmicos. Essa lei estabelece que a energia total de um sistema isolado é constante, podendo ser convertida entre diferentes formas, mas nunca criada ou destruída. Ela relaciona as trocas de calor e trabalho com as alterações da energia interna do sistema, fornecendo uma base para entender e quantificar os processos energéticos em sistemas termodinâmicos.

A equação de balanço que traduz a Primeira Lei da Termodinâmica para um sistema aberto é apresentada na Eq. (2.5):

$$\dot{Q}_{VC} - W_{VC} = \sum \dot{m}_s \left( h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) - \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) \quad (2.5)$$

Na Eq. (2.5)

$\dot{m}_e$  - Fluxo de massa que entra no volume de controle (kg/s);

$\dot{m}_s$  - Fluxo de massa que sai do volume de controle (kg/s);

$h_e$  - Entalpia específica na entrada do volume de controle (kJ/kg);

$h_s$  - Entalpia específica na saída do volume de controle (kJ/kg);

$\dot{Q}_{VC}$  - Fluxo de calor no volume de controle (kW);

$W_{VC}$  - Potência referente ao volume de controle (kW);

$V_e, V_s$  - Velocidades de entrada e saída do fluxo no volume de controle (m/s);

$z_e, z_s$  - Cotas de entrada e saída do fluxo no volume de controle (m);

$g$  - Aceleração da gravidade local (m/s<sup>2</sup>).

### 2.3.2 Relação entre a massa de ar e combustível

A quantidade estequiométrica de oxidante é a quantidade necessária para queimar completamente uma determinada quantidade de combustível. Quando é fornecida uma quantidade de oxidante maior do que a estequiométrica, temos uma mistura empobrecida em combustível, também conhecida como mistura pobre. Por outro lado, se a quantidade de oxidante é menor do que a estequiométrica, resulta em uma mistura enriquecida em combustível, chamada de mistura rica. A proporção estequiométrica entre oxidante e combustível, conhecida como relação ar-combustível, é determinada por um equilíbrio atômico simples, assumindo que o combustível reage para formar um conjunto ideal de produtos.

A relação estequiométrica ar/combustível,  $AF_s$ , é determinada por

$$AF_s = \frac{4,76 v_{ar}^s M_{ar}}{M_{comb}} \frac{kg - ar}{kg - comb} \quad (2.6)$$

onde  $v_{ar}^s$  é o número de mols de oxigênio no processo de combustão estequiométrica,  $M_{ar}$  é a massa molar do ar em g/mol e  $M_{comb}$  é a massa molar do combustível em g/mol.

Para simplificação, ao longo deste trabalho, será considerado que a composição do ar é representada por 21% de oxigênio (O<sub>2</sub>) e 79% de nitrogênio (N<sub>2</sub>) em termos volumétricos. Portanto, a proporção entre o número de mols de nitrogênio (N<sub>2</sub>) e um mol de oxigênio (O<sub>2</sub>) no ar é de aproximadamente 3,76.

A razão de equivalência,  $\Phi$ , é comumente usada para indicar quantitativamente quando uma mistura de oxidante e combustível é rica, pobre ou estequiométrica. A razão de equivalência é definida como:

$$\Phi = \frac{AF_s}{AF} \quad (2.7)$$

onde  $AF_s$  é a relação ar-combustível estequiométrica e  $AF$  é a relação ar-combustível da reação de combustão em análise.

Para misturas ricas em combustível,  $\Phi > 1$ , e para misturas pobres em combustível,  $\Phi < 1$ . Para uma mistura estequiométrica,  $\Phi = 1$ . Para o presente trabalho, foi considerada uma razão de equivalência unitária, ou seja, a quantidade de ar nos reagentes é a estequiométrica.

### 2.3.3 Entalpia padrão e de formação

No tratamento de sistemas quimicamente reativos, o conceito de entalpia padrão é muito valioso. Para qualquer espécie química, podemos definir uma entalpia padrão que é igual à soma de uma parcela



que quantifica a energia associada às ligações químicas (ou à ausência de ligações químicas), chamada de entalpia de formação,  $\bar{h}_f^0$ , e outra parcela associada somente com a temperatura, que é a variação de entalpia sensível,  $\Delta\bar{h}_s$ . Assim, podemos escrever a entalpia molar padrão da espécie química  $i$  como:

$$\bar{h}_i(T) = \bar{h}_{f,i}^0(T_{ref}) + \Delta\bar{h}_{s,i}(T) \quad (2.8)$$

Entalpia padrão na temperatura T	=	Entalpia de formação no estado de referência Padrão ( $T_{ref}$ )	+	Variação de entalpia sensível no processo de $T_{ref}$ para T
-------------------------------------	---	---	---	---

onde  $\Delta\bar{h}_{s,i} \equiv \bar{h}_i(T) - \bar{h}_{f,i}^0(T_{ref})$ .

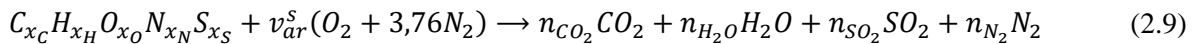
Para utilizar a Eq. (2.8), é necessário definir um estado de referência padrão. Será empregada a temperatura de estado padrão,  $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$  (298,15 K), e a pressão de estado padrão,  $P_{ref} = P_0 = 1$  atm (101.325 Pa). Além disso, será adotada a convenção de que as entalpias de formação são iguais a zero para o estado de ocorrência natural dos elementos na temperatura e pressão do estado de referência.

### 2.3.4 Temperatura de chama adiabática

A temperatura de chama adiabática é um parâmetro importante para se analisar processos de combustão, pois é a temperatura máxima teórica alcançada durante uma reação de combustão completa, e, nesse caso, a pressão constante.

Uma mistura combustível-ar encontra-se em proporções estequiométricas quando existe a quantidade exata de ar, nos reagentes, para produzir a combustão completa do combustível. Com a finalidade de apresentar a análise de uma forma geral, considera-se um combustível que contém carbono, oxigênio, nitrogênio e enxofre ( $C_{x_C}H_{x_H}O_{x_O}N_{x_N}S_{x_S}$ ).

A reação global para a mistura estequiométrica, assumindo combustão completa, é mostrada na Eq. (2.9).



Aplicando a Lei de Conservação de Massa aos elementos presentes na reação, é obtido o número de mols de cada espécie nos produtos assim como a quantidade estequiométrica de ar.

$$\text{Carbono} \quad n_{CO_2} = x_C \quad (2.10)$$

$$\text{Hidrogênio} \quad n_{H_2O} = \frac{x_H}{2} \quad (2.11)$$

$$\text{Oxigênio} \quad v_{ar}^s = x_C + \frac{x_H}{4} + x_S - \frac{x_O}{2} \quad (2.12)$$

$$\text{Nitrogênio} \quad n_{N_2} = 3,76v_{ar}^s + \frac{x_N}{2} \quad (2.13)$$

Enxofre

$$n_{SO_2} = x_S \quad (2.14)$$

Aplicando as simplificações adotadas à Primeira Lei da Termodinâmica para sistema aberto, é obtido a seguinte relação:

$$H_R = H_P \quad (2.15)$$

onde as entalpias dos reagentes e dos produtos são expandidas como mostrado na Eq. (2.16):

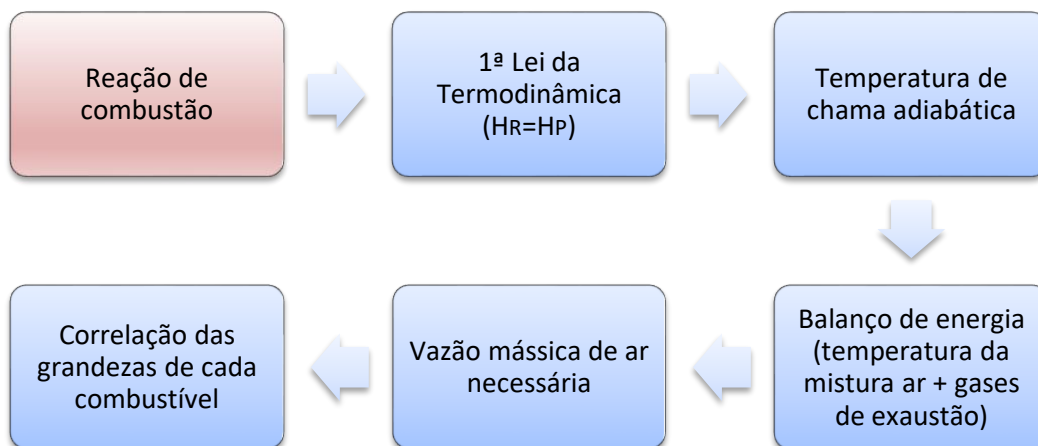
$$\begin{aligned} \bar{h}_{f,comb}^0 + v_{ar}^s(\bar{h}_{O_2} + 3,76\bar{h}_{N_2}) = & n_{CO_2}(\bar{h}_{f-CO_2}^0 + \Delta\bar{h}_{CO_2}) + n_{H_2O}(\bar{h}_{f-H_2O}^0 + \Delta\bar{h}_{H_2O}) \\ & + n_{SO_2}(\bar{h}_{f-SO_2}^0 + \Delta\bar{h}_{SO_2}) + n_{N_2}\Delta\bar{h}_{N_2} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Existem dois métodos de solução. Um deles é por aproximações sucessivas feitas manualmente, geralmente esse tipo é adotado quando se utilizam diretamente dados tabelados para as entalpias. O outro método é por métodos numéricos, geralmente adotado quando as entalpias são determinadas como uma função da temperatura. O método numérico mais utilizado para esses casos é o método de Newton-Raphson.

### 3 METODOLOGIA DESENVOLVIDA

Este estudo foi baseado na coleta de dados termodinâmicos relacionados a dois combustíveis envolvidos no processo de combustão dentro de uma fornalha, lenha e biogás, com o objetivo de aquecer uma massa de ar. O objetivo é estabelecer uma correlação entre suas propriedades dentro desse processo e, conseqüentemente, comparar suas características termodinâmicas apresentadas. Inicialmente, foi calculada a temperatura de chama adiabática de cada combustível, para assim, saber em que temperatura os gases de exaustão se encontram após a combustão completa dos respectivos combustíveis. Em seguida, foi realizado um balanço energético a partir da temperatura final que a massa de ar e a massa dos gases de exaustão deveriam atingir, com o intuito de se obter o valor da massa de ar necessária para que o objetivo térmico fosse alcançado. Foi assumida uma faixa de temperatura, com o intuito de abranger um universo maior de hipóteses, em que uma massa de ar deve atingir ao se misturar com os gases de combustão aquecidos. Assim, foi possível correlacionar as grandezas de cada combustível para o mesmo processo a fim de se realizar uma comparação. A Figura 3.1 ilustra o fluxograma da metodologia do presente trabalho.

Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia do trabalho.



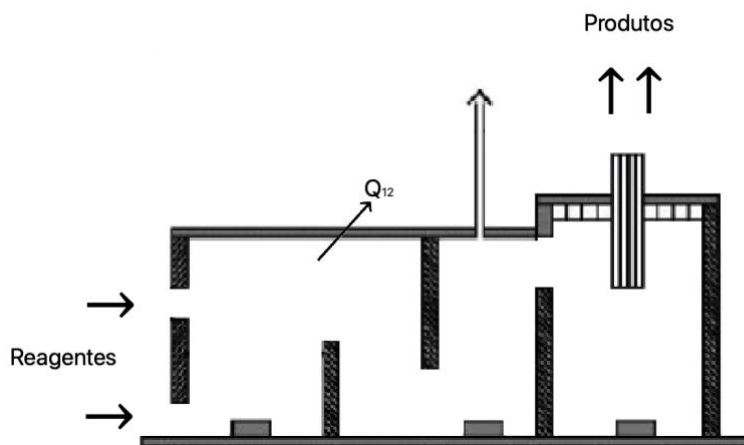
### 3.1 Modelagem do sistema

Para o presente trabalho, as seguintes simplificações foram adotadas:

- O processo é adiabático;
- Não há trabalho atravessando as fronteiras do sistema;
- As variações das energias cinética e potencial são desprezíveis;
- Não há perdas de calor,  $Q_{12}=0$ ;
- Não há trabalho atravessando o volume de controle;
- A combustão é completa,  $\Phi = 1$ .

Para se iniciar a análise de um processo envolvendo reação de combustão, deve-se delimitar um volume de controle,  $VC$ , para controlar as variações de massa e energia. No presente trabalho, o  $VC$  é delimitado pelas paredes externas da fornalha, sendo ilustradas com flechas as entradas e saídas de massa e calor do sistema, como mostra a Figura 3.2.

Figura 3.2 – Esquema do volume de controle para o processo de combustão.



Fonte: Adaptado de MAGALHAES, 2007.

Nos reagentes, ingressam o combustível, biogás ou lenha, juntamente com o ar atmosférico, levando em conta que a oferta de oxigênio é tamanha que é plausível considerar queima completa. E, nos produtos, saem do  $VC$  os gases de exaustão misturados com ar atmosférico com temperatura elevada, pois se trata de um processo exotérmico.

Tomando como base a Eq. (2.9) e utilizando-se das Eqs. (2.10) a (2.14), é possível obter a reação de combustão dos combustíveis em análise, biogás e lenha, uma vez que as composições elementares são conhecidas. A Tabela (3.1) fornece a referência que será utilizada da disposição elementar dos combustíveis analisados.

Tabela 3.1 – Composição elementar dos combustíveis em base mássica (%).

Combustível	$x_C$	$x_H$	$x_O$	$x_N$	$x_S$	$v_{ar}^s$	$PM_{comb}$ (g/mol)
Pinus <sup>1</sup>	49,25	5,99	44,36	0,06	0,03	4,2160	99,69
Eucalipto <sup>2</sup>	49,00	5,87	43,97	0,30	0,01	4,1765	99,15
Eucalipto <sup>3</sup>	47,50	6,00	44,00	1,00	1,50	4,1300	100,00

Fonte: Adaptado de <sup>1</sup>JENKINS (1990), citado por LORA et al (1997); <sup>2</sup>VLASSOV (2001); <sup>3</sup>LOPES (2002).

Para que sejam realizados os cálculos da temperatura de chama adiabática, é necessário converter a composição elementar dos combustíveis de base mássica para base molar, como mostrado na Tabela 3.2. Uma das formas de se realizar essa transformação é utilizando a relação  $x_i = \%X_i / PM_i$ , ou seja, dividindo a percentagem mássica de cada elemento pela sua massa molar e assumindo o peso molecular

do combustível,  $PM_{comb}$ , como o somatório das percentagens os elementos. Considera-se, nessa análise, a composição do biogás como 60% de metano ( $CH_4$ ) e 40% de dióxido de carbono ( $CO_2$ ).

Tabela 3.2 – Composição elementar dos combustíveis em base molar.

Combustível	$x_C$	$x_H$	$x_O$	$x_N$	$x_S$	$v_{ar}^s$	$PM_{comb}$ (g/mol)
Biogás	1,000	2,400	0,800	0	0	1,2000	27,20
Pinus <sup>1</sup>	4,104	5,990	2,773	0,004	0,001	4,2160	99,69
Eucalipto <sup>2</sup>	4,083	5,870	2,748	0,021	0,000	4,1765	99,15
Eucalipto <sup>3</sup>	3,958	6,000	2,750	0,071	0,047	4,1300	100,00

Fonte: Adaptado de <sup>1</sup>JENKINS (1990), citado por LORA et al (1997); <sup>2</sup>VLAASSOV (2001); <sup>3</sup>LOPES (2002).

Para seguir com a análise termodinâmica, é necessário referenciar valores para a temperatura de saída da mistura dos gases de exaustão com ar atmosférico, responsável pela secagem dos grãos dentro do secador. Bakker-Arkema (1994), fez uma comparação entre os três principais tipos de secadores, fluxos cruzados, concorrentes e mistos (Tabela 3.3), com respeito a temperatura do ar de secagem, à máxima temperatura alcançada pelos grãos e a expectativa de aumento da susceptibilidade às quebras na secagem do milho quando foram retirados 10 pontos percentuais de umidade do grão. Segundo o autor, o secador de fluxo concorrente foi o que gastou menos energia no processo, porém é o equipamento de maior custo.

Tabela 3.3 – Efeito do tipo de secador sobre o ar de secagem, máxima temperatura do grão e susceptibilidade a quebras em milho.

Tipo de secador	Temperatura do ar de secagem (°C)	Máxima temperatura do grão (°C)	Susceptibilidade às quebras (%)
Fluxos cruzados	80-110	80-100	20
Fluxos mistos	100-130	70-100	10
Fluxos concorrentes	175-285	60-80	5

Fonte: Bakker-Arkem, 1994.

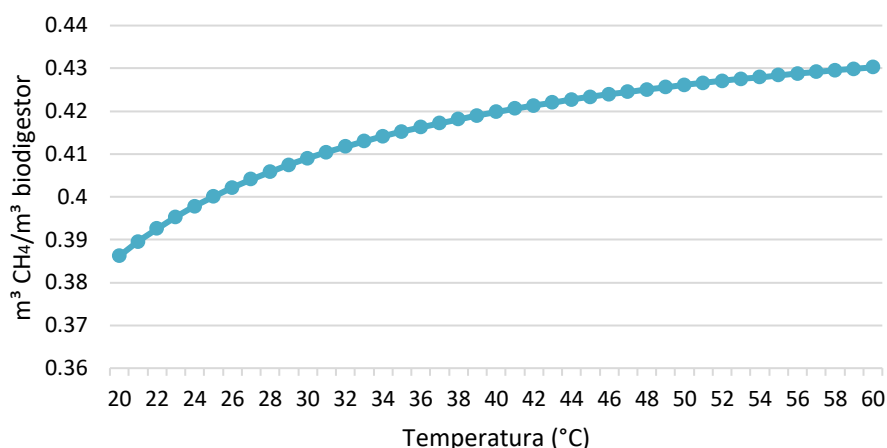
### 3.2 Modelagem da produção de biogás

Para o presente trabalho, foi admitido um cenário hipotético no qual ocorre a produção de biogás, a fim de relacionar esse combustível no processo de secagem de grãos. Por meio do modelo de Chen, é possível estimar a produção de biogás por volume do biodigestor. Para isso, foi definido como fonte de dejetos o rebanho do tipo suíno. Da Tabela 2.1, foi definida a concentração de sólidos voláteis (SV) em 31,50 gSV.L-1 e capacidade máxima de produção de biogás por dejetos (Bo) em 0,50 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>.KgSV-1.

Conforme definem Nishimura, 2009 e Fernandes, 2012, o tempo de retenção hidráulica (TRH) varia de 20 a 50 dias, usou-se, portanto, um TRH médio de 35 dias.

Para modelar a temperatura em que o sistema vai operar, Nishimura, 2009 e Fernandes, 2012, definem que a temperatura ideal para produção de biogás situa-se entre as faixas mesófila (20- 45°C) e a termófila (45-60°C), portanto, foi observado a influência da temperatura na produção de biogás na faixa de 20°C a 60°C como mostra a Figura 3.3.

Figura 3.3 – Gráfico da produção de metano em função da temperatura e da área do biodigestor pelo modelo de Chen.



## 4 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos da análise do biogás, em comparação às lenhas de eucalipto e pinus, com objetivo de aquecer uma massa de ar que servirá como fluido de trabalho com temperatura controlada para retirar umidade de grãos dentro de um secador. Primeiramente, são apresentados os dados referentes ao primeiro processo, o processo de combustão propriamente dito, em que foi possível estimar a temperatura de chama adiabática que cada combustível irá atingir. Em seguida, visto que a temperatura de chama adiabática é a mesma que os gases de exaustão irão atingir, foi possível realizar um balanço de energia para se estimar a relação massa de ar por massa de combustível necessária para que, ao se misturar com os gases de exaustão, essa mistura atinja a temperatura desejada. Nesse trabalho, foram analisadas três temperaturas objetivo para essa mistura: 300K, 400K e 500K.

Por fim, foi realizada uma estimativa de geração de biogás em um cenário hipotético utilizando o Modelo de Chen, em m³ de CH₄/m³ de biodigestor/dia, a fim de correlacionar do potencial de geração de biogás com quantidade equivalente de lenha.

### 4.1 Temperaturas de chama adiabática do biogás e da lenha

O primeiro objetivo foi calcular a entalpia de formação,  $h^{\circ}f$ , para cada combustível na temperatura de referência, 298,15K. Os resultados obtidos, Tabela 4.1, foram bastante similares para os combustíveis lenhosos, ficando na faixa de -720 a -680 kJ/mol e para o biogás em torno de -202 kJ/mol.

Tabela 4.1 – Resultados termodinâmicos para os combustíveis analisados.

Combustível	$h^{\circ}f$ (T <sub>ref</sub> ) (kJ/mol)	MM (kg/kmol)	PCI (kcal/kg)	V <sub>ars</sub>	AF <sub>s</sub> (kg-ar/ kg-comb.)	T <sub>ad</sub> (K)
Biogás	-202,33	27,20	4229	1,200	6,056	2172,5
Pinus <sup>1</sup>	-714,294	99,69	3894	4,216	5,806	2145,1
Eucalipto <sup>2</sup>	-716,858	99,15	3854	4,177	5,783	2134,9
Eucalipto <sup>3</sup>	-683,397	100,00	3854	4,130	5,670	2152,1

Fonte: Autor.

A partir das entalpias de formação dos combustíveis, que nesse caso são iguais às entalpias dos reagentes, foi possível determinar a temperatura de chama adiabática de cada combustível. Nota-se que a faixa de valores para essa temperatura de chama ficou em torno de 2130K a 2180K, valores considerados satisfatórios e muito próximos da realidade. Percebe-se, também, que no processo de queima do biogás, considerando biogás composto por 60% CH₄ e 40% CO₂, a AF<sub>s</sub> é a maior entre os combustíveis

analisados, com valor de aproximadamente 6. Ou seja, para cada 1 kg de biogás, se faz necessário 6 kg de ar atmosférico para que ocorra combustão completa.

## 4.2 Balanço energético

O segundo objetivo, e considerado principal, foi a obtenção da relação da massa de ar em função da massa de combustível a fim de se obter uma mistura com a temperatura desejada. A Tabela 4.2 mostra as temperaturas de cada elemento participante dessa troca de calor.

Tabela 4.2 – Resultados termodinâmicos para o balanço energético dos gases de exaustão e massa de ar para diferentes temperaturas finais do processo.

Combustível	T <sub>gases de exaustão</sub> (K)	T <sub>ar</sub> (K)	Relação de massa (kg-ar / kg-combustível)		
			300K	400K	500K
Biogás	2172,5	298,15	9518,9	194,6	108,8
Pinus <sup>1</sup>	2145,1	298,15	8703,3	156,3	77,7
Eucalipto <sup>2</sup>	2134,9	298,15	8614,9	154,6	76,8
Eucalipto <sup>3</sup>	2152,1	298,15	8541,6	153,4	76,2

Fonte: Autor.

É possível observar que a temperatura dos gases de exaustão é exatamente a mesma temperatura da chama adiabática. O ar atmosférico, por outro lado, ingressa no sistema na temperatura de referência, 298,15K, e irá absorver calor dos gases de exaustão até atingir a temperatura desejada para o sistema. No presente trabalho, foram consideradas três temperaturas finais para a mistura de ar atmosférico e gases de exaustão, são elas: 300K, 400K e 500K. Nota-se, conforme a Tabela 4.2, que para essa mistura atingir uma temperatura final de 300K é necessário aproximadamente 9.500kg de ar para cada 1kg de combustível, quando analisado o biogás como combustível, um uma relação de massa bastante grande pois o ar ingressa com temperatura muito próxima da temperatura final.

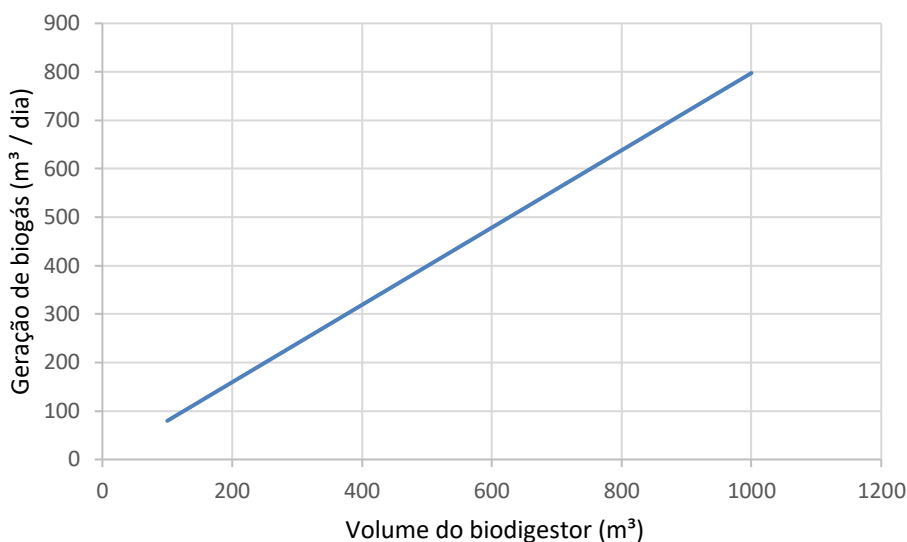
Ao se analisar a relação de massa para a temperatura final da mistura de 400K, temperatura que se aproxima muito daquela utilizada em secadores de fluxo misto, nota-se uma relação de massa consideravelmente menor quando comparada à referente a 300K. Quando se deseja alcançar uma temperatura final de mistura de 400K, para cada 1 kg de biogás, se faz necessário 194,6 kg de ar atmosférico, valor esse, que quando comparado a 1kg de lenha, é aproximadamente 25% maior. Já para se atingir uma temperatura final de mistura de 500K, a relação de massa do biogás é ainda maior, proporcionalmente, quando comparada à da lenha, ficando em torno de 40% maior.

## 4.3 Produção de biogás

Para o cenário de geração de biogás, considerando uma temperatura externa média de 25°C, foi possível aplicar a metodologia de Chen para se obter um resultado em produção de biogás diário em função do volume do biodigestor.

Para cada temperatura média avaliada, observa-se que a relação de produção de biogás diário por volume de biodigestor é linear, pode-se observar isso observando a Fig. 4.2, na qual foi projetada graficamente essa produção para a temperatura externa média de 25°C. É possível observar que nessa temperatura analisada, um biodigestor com volume de 200 m<sup>3</sup> é capaz de gerar diariamente aproximadamente 165 m<sup>3</sup> de biogás, assim como um biodigestor com 1000 m<sup>3</sup> seria capaz de gerar 800 m<sup>3</sup> de biogás diariamente. A partir dessa relação linear, é possível chegar ao coeficiente de geração de biogás diário para a temperatura de 25°C de aproximadamente 0,794 m<sup>3</sup> de biogás para cada 1 m<sup>3</sup> de biodigestor.

Figura 4.2 – Gráfico da geração diária de biogás em função área do biodigestor.



Fonte: Autor.

## 5 CONCLUSÃO

O presente estudo analisou o desempenho do processo de combustão de dois tipos de combustíveis, lenha e biogás. Primeiramente, foi determinada a temperatura da chama adiabática, a temperatura máxima teórica que os gases de exaustão dessa queima podem atingir, e por um balanço de energia, foi calculada a relação de massa necessária entre o ar a ser aquecido e o combustível, a fim de atingir a temperatura desejada.

É notória a relevância que assuntos relacionados ao uso de fontes energéticas alternativas se correlacionem para o avanço de uma sociedade moderna mais eficiente e sustentável. O biogás se mostra uma fonte alternativa para diversas finalidades, incluindo principalmente a geração de calor com a sua queima. Além disso, é válido ressaltar que o biogás, apesar de ser uma fonte de energia renovável, tem um elevado potencial de poluição quando liberado em sua forma química natural, com um impacto de efeito estufa cerca de 21 vezes maior do que o do gás carbônico. Portanto, é considerado viável e consciente a sua queima e aproveitamento do seu poder calorífico, em vez de permitir a sua livre dispersão na atmosfera.

A análise feita sobre a utilização de biogás como combustível alternativo em secadores de grãos a lenha mostrou as correlações existentes entre os dois tipos de combustível. O biogás analisado, composto por 60% CH<sub>4</sub> e 40% CO<sub>2</sub>, apresentou temperatura de chama mais alta em comparação às lenhas analisadas, assim como uma relação de massa (kg-ar/kg-combustível) maior também, ou seja, com a mesma massa de combustível, o biogás demanda uma massa de ar atmosférico maior no processo. Assim, foi possível concluir que é necessária uma análise da estrutura do secador antes de utilizar biogás dentro do processo de secagem de grãos, uma vez que essa substituição de combustível pode implicar em adequações estruturais.

Com respeito a análise sobre a geração de biogás, dentro do cenário hipotético modelado, foi possível observar a linearidade entre o volume de biogás que pode ser gerado diariamente em função da área de biodigestor, para uma temperatura média fixa. O valor escolhido de 25°C representou um valor abrangente de temperatura que se enquadra para diversas regiões do Brasil. Pôde-se concluir, a partir dos dados definidos para a presente análise de geração, que para um projeto de geração de biogás em função apenas do volume de biodigestor, o coeficiente de geração é linear e com valor de, aproximadamente, 0,794 m<sup>3</sup> de biogás para cada 1 m<sup>3</sup> de biodigestor.

Pode-se concluir que os resultados obtidos com esse estudo atingiram o objetivo em conseguir dados para correlacionar os dois combustíveis analisados, assim como o objetivo de chegar a um coeficiente de produção de biogás pelo método de Chen.



**REFERÊNCIAS**

ABBASI, T. *et al.* Anaerobic digestion for global warming control and energy generation – An overview. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 16, n. 5, p. 3228-3242, 2012.

ABIOGÁS. **O potencial brasileiro de biogás.**, p. 11-26, 11 mar. 2022.

ALVES, J. W. S., 2000. **“Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos”**. (Dissertação de Mestrado). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, SP.

BATISTA, L.F. **“Manual técnico construção e operação de biodigestores”**. Brasília, DF, 1981, (Manuais, 24).

BLANCO, D.; Suárez, J.; Jiménez, J.; González, F.; Álvarez, L.M.; Cabeza, E.; Verde, J., 2015; **“Eficiencia del Tratamiento de Residuales Porcinos em Digestores de Laguna Tapada”**, Pastos y Forrajes, vol. 38, p. 441-447.

BRIANE, D.; DOAT, J. **Guide technique de la carbonisation: la fabrication du charbon de bois**. Aix-en-Provence, ÉDISUD, 1985. 180p.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G., 1978. **Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca**. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Piracicaba, n.16, p.63-70.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grain and oilseeds**. The AVI Publishing, New York, p.450, 1992.

BROWN, B.B.; Yiridoe, E.K.; Gordon, R., 2007. **“Impact of Single Versus Multiple Policy Options on the Economic Feasibility of Biogas Energy Production: Swine and Dairy Operations in Nova Scotia”**, Energy Policy, vol. 35, p. 4597-4610.

DA SILVA LEAL, G. **“Análise Termodinâmica Simplificada De Potencial Energético Do Biogás Produzido Por Estações De Tratamento De Esgoto”**.

DAL MAGO, A.; Araújo, I.S.; Belli Filho, P.; de Oliveira, P.A.V.; **“Caracterização do Biogás e do Afluente em Biodigestores da Atividade Suinícola em Santa Catarina”**, X Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais, 2010.

DANTAS, D. N. **Uso da biomassa da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista**. 2010. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

DARTORA, V.; Perdomo, C.C.; Tumelero, I.V.; **“Manejo de Dejetos Suínos”**, Boletim Informativo de Pesquisa – Embrapa Suínos e Aves e Extensão, vol. 11, 1998.

EMATER/RS. **“Tecnologia De Secagem de Grãos”**. Passo Fundo, RS; disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/820202/1/Tecnologiadeseccagemdegraos.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2022.

EMBRAPA. **Circular Técnica**. 1 dez. 2002.

EMBRAPA. **Uso de GLP na secagem de milho em sacador de leito fixo**. Circular Técnica, 1 dez. 2000.

FERNANDES, D.M.; **“Biomassa e Biogás na Suinocultura”**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2012.

IANNICELLI, L. A.; **“Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira”**. 2008, 83 F. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté. São Paulo, 2008.

JARA, E.R.P., 1797. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989. (Comunicação Técnica).

JÚNIOR, B. C. Embrapa – **“Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais”**. 2. ed. Foz do Iguaçu: FAO. 2009.

JÚNIOR, B. C. Embrapa – **“Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas,**

KUNZ, A., de Oliveira, P.A.V.; Higarashi, M.M.; **“Biodigestor para o Tratamento de Dejetos de Suínos: Influência da Temperatura Ambiente”**, Comunicado Técnico, vol. 416, p. 1-5, 2005.

LA FARGE, B., 1995. **Le biogaz: “procédés de fermentation méthanique”**. Paris: Masson.

LIMA, F. P. **“Energia no tratamento de esgoto: Análise tecnológica e institucional para conservação de energia e uso do biogás”** (Dissertação de Mestrado). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MAGALHÃES, Edney A., 2007. **“Desenvolvimento e análise de uma fornalha para aquecimento direto e indireto de ar utilizando biomassa polidispersa”**. Tese. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MASSÉ, D.I. Talbot, G.; Gilbert, Y., 2011. **“On Farm Biogas Production: A Method to Reduce GHG Emissions and Develop More Sustainable Livestock Operations”**, Animal Feed Science and Technology, vol. 166-167, p. 436-445.

MASSÉ, D.I.; Talbot, G.; Gilbert, Y.; **“On Farm Biogas Production: A Method to Reduce GHG Emissions and Develop More Sustainable Livestock Operations”**, Animal Feed Science and Technology, vol. 166-167, p. 436-445, 2011.

MONTORO, S.B.; Lucas Jr., J.de L.; Santos, D.F.L.; **“Sustentabilidade Energética e Ambiental: Viabilidade Econômica da Implantação de Biodigestores Anaeróbios para Tratamento de Dejetos Bovinos”**, XLII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Anais, 2014.

NISHIMURA, R.; **“Análise de Balanço Energético de Sistema de Produção de Biogás em Granja de Suínos: Implementação de Aplicativo Computacional”**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2009.

OJEDA, L.; VASCONCELLOS, L. M.; SILVA, 1999. **“Projeto de um biodigestor de dejetos de gado leiteiro para uma pequena propriedade rural”**. Anais do 10º SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO – SIEPE. Universidade Federal do Pampa. Santana do Livramento, 6 a 8 de novembro de 2018.

PECORA, V. **“Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de Caso (Dissertação de Mestrado)”**. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PEREIRA M. L., 2005. **“Biodigestores: opção tecnológica para a redução dos impactos ambientais na suinocultura”**. São Paulo, SP. Disponível em: <<http://www.embrapa.br>>. Acesso em: 10 fev. 2022.

TEKHNE e LOGOS. **Produção de biogás a partir de dejetos de origem animal.**, 2 ago. 2013.

QUIRINO, W. et al. **“Poder Calorífico Da Madeira E De Materiais Ligno-Celulósicos Publicado na Revista da Madeira no 89 abril 2005 pag 100-106”**. Disponível em: <<https://mundoflorestal.com.br/arquivos/podercalorifico.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2023.

RESENDE, J. A. de *et al.* **Dejtos bovinos para produção de biogás e biofertilizante por biodigestão anaeróbica**. Juiz de Fora, MG: Embrapa Gado de Leite, 2015. 5 p. il. (Embrapa Gado de Leite. Circular Técnica, 110).

SANTOS, E.L.B.; de Nardi Jr., G.; **“Produção de Biogás a partir de Dejetos de Origem Animal”**, Tekhne e Logos, vol. 4, p. 80-90, 2013.

SANTOS, W. **“Controle e Avaliação de um Conjunto Gaseificador-Combustor de Fluxo Concorrente, Utilizando como Combustível a Biomassa de Lenha de Eucalipto”**.

Disponível em:

<<https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/3539/1/texto%20completo.pdf>>. Acesso

em: 12 ago. 2023.

SENGER, R. **“Análise Do Rendimento Térmico De Uma Caldeira Alimentada Com Lenha Em Toras”**.

SGANZERLA, E., 1983. **“Biodigestor, uma solução”**. Porto Alegre, RS.

SILVA, J. de S. **“Secagem e Secadores”**. Disponível em:

<[https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/201811/23093833-secagem-e-](https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/201811/23093833-secagem-e-armazenagem-cap5.pdf)

[armazenagem-cap5.pdf](https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/201811/23093833-secagem-e-armazenagem-cap5.pdf)>. Acesso em: 10 ago. 2023.

SILVA, J. J., 2008. **“Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas”**. 2ª ed. Editora Aprenda Fácil. Viçosa, MG.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2003.

VILLELA, F. A; SILVA, W.R. **“Curvas de secagem de sementes de milho utilizando o método intermitente”**. Scientia Agricola, Piracicaba, v.49, n.1, p.145-153,1992.

VILLELA, F. A ; SILVA, W.R. **Curvas de secagem de sementes de milho utilizando o método intermitente**. Scientia Agricola, Piracicaba, v.49, n.1, p.145-153,1992.

ZEVALLOS, A. A. M. *et. al.* **Combustão Aplicada**. Editora UFSC, edição didática, 2018.