



Rafael Vieira de Carvalho

**Tratamento de Resíduos Sólidos
Orgânicos: análise do potencial de
geração de biogás proveniente da digestão
anaeróbia da casca de tangerina**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental.

Orientador: Celso Romanel
Coorientador: Thais Cristina Campos de Abreu

Rio de Janeiro
Setembro de 2020



Rafael Vieira de Carvalho

Tratamento de Resíduos Sólidos Orgânicos: análise do potencial de geração de biogás proveniente da digestão anaeróbia da casca de tangerina

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Celso Romanel

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof.^a Thais Cristina Campos de Abreu

Coorientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof.^a Ana Cristina Malheiros Goncalves Carvalho

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Marcelo de Jesus Rodrigues da Nóbrega

CEFET/RJ

Prof.^a Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk

UERJ

Rio de Janeiro, 17 de setembro de 2020

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Rafael Vieira de Carvalho

Graduou-se em Engenharia Civil (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2017. Em 2018, teve seu trabalho de conclusão de curso premiado pelo Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Rio de Janeiro (Crea-RJ) no VII Prêmio Crea-RJ de Trabalhos Científicos e Tecnológicos 2018, na categoria "Inovação e Desenvolvimento com Sustentabilidade e Equidade Social".

Ficha Catalográfica

Carvalho, Rafael Vieira de

Tratamento de Resíduos Sólidos Orgânicos : análise do potencial de geração de biogás proveniente da digestão anaeróbia da casca de tangerina / Rafael Vieira de Carvalho ; orientador: Celso Romanel ; coorientador: Thais Cristina Campos de Abreu. – 2020. 99 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, 2020. Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Engenharia Urbana e Ambiental - Teses. 3. Digestão anaeróbia. 4. Biogás. 5. Ensaio BMP. 6. Casca de tangerina. I. Romanel, Celso. II. Abreu, Thais Cristina Campos de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental. IV. Título.

CDD: 624

Dedicatória

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813347/CA

Para meus pais, Regina e Helio,
Todo meu amor e gratidão.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer, primeiramente, aos meus familiares que sempre me apoiaram e acreditaram em mim em todos os momentos da minha vida, em especial minha mãe, Regina, e meu pai, Helio, por todo o amor, suporte e investimento nas minhas escolhas, sempre muito presentes e caminhando ao meu lado. Sem vocês, nada teria sido possível. Além disso, à Sabrina Ramírez, por toda a ajuda e suporte emocional, me ajudando a superar os obstáculos, as incertezas e as adversidades encontradas ao longo da elaboração da dissertação.

Ao meu orientador, Celso Romanel, pela oportunidade da realização deste trabalho, e à minha coorientadora, Thaís Abreu, que me guiou ao longo dessa pesquisa com suas ideias e sugestões, orientando e auxiliando ao longo dos experimentos, além de estar sempre disposta a ajudar em qualquer momento e em tudo que estivesse ao seu alcance, com muita simpatia e profissionalismo.

Aos professores, que buscaram transmitir seus conhecimentos da melhor forma possível e com altíssima qualidade.

À PUC, por proporcionar uma infraestrutura de laboratórios, estudos e pesquisa de excelente qualidade, com ambiente agradável e motivador, sempre incentivando o aluno a dar seu melhor.

À *TU Braunschweig* por agregar com diversos conhecimentos da perspectiva europeia, enriquecendo o aprendizado e reforçando a importância de se expandir os olhares além da nossa realidade.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Carvalho, Rafael Vieira de; **Tratamento de Resíduos Sólidos Orgânicos: análise do potencial de geração de biogás proveniente da digestão anaeróbia da casca de tangerina**. Rio de Janeiro, 2020. 99p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Em um cenário onde a geração de resíduos ao redor do mundo cresce cada vez mais, técnicas de tratamento de resíduos são fundamentais para garantir menores emissões de gases de efeito estufa ao meio ambiente. Esta pesquisa apresenta uma análise realizada com cascas de dois tipos distintos de tangerina, com a finalidade de estudar o potencial de geração de biogás das mesmas através da realização de um ensaio BMP (*Biochemical Methane Potential*). A digestão anaeróbia de resíduos orgânicos corresponde a um tratamento biológico que apresenta uma solução com produtos valiosos, como o biogás, no combate ao aumento de emissões poluidoras, já que o mesmo pode ser utilizado como energia térmica, elétrica ou combustível em detrimento aos combustíveis fósseis. Dessa forma, esta pesquisa também realiza um estudo acerca do processo de fabricação de sucos naturais por parte de pequenos e grandes produtores e de como os mesmos podem utilizar as cascas dos restos da produção dos sucos para a geração de biogás como fonte de energia limpa. Os resultados encontrados apresentam para a casca da tangerina “Ponkan” um potencial de geração de biogás de 615,38 NmL/gSV e, para a casca da tangerina “Montenegrina”, o valor encontrado foi de 565,84 NmL/gSV. Os resultados obtidos sugerem um potencial de geração de biogás positivo para o substrato analisado, a tangerina, quando comparados aos demais resultados de outras frutas encontradas na literatura.

Palavras-chave

Digestão anaeróbia; biogás; ensaio BMP; casca de tangerina.

Extended Abstract

Carvalho, Rafael Vieira de; **Organic Solid Waste Treatment: anaerobic digestion analysis of the potential biogas yield from tangerine peel**. Rio de Janeiro, 2020. 99p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

1. Introduction

The constant increase in global warming that occurred after the middle of the twentieth century and intensified by anthropogenic actions based on the emission of greenhouse gases such as methane, is a reality that worries not only for the harmful damages to the environment and the quality of life of human beings, but also for the preservation of future generations (Silva & Paula, 2009). In the mid-1980s, with the Brundtland conference, the concept for “sustainable development” emerged which is defined as “meeting the needs of the present without compromising future generations” (BRUNDLAND, 1987).

In order to avoid excessive damage to the existence of human beings, recent studies by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2018) examined the need to limit global warming to 1.5 °C instead of 2 °C, as previously predicted by the Paris Climate Agreement signed in 2015. According to the study, the absence of measures to be taken at present may generate extremely harmful damage to the environment, human beings, fauna, and flora of the planet.

Limiting global warming to 1.5 °C involves large reductions in the emission of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂). Thus, a strong demand in the bioenergy sector is necessary, highlighting the importance of using appropriate management measures which contribute to minimizing the problem, as is the case with the use of anaerobic digestion as a treatment for organic solid waste.

The growing increase in the world population and the accelerated urbanization process of cities have resulted in the generation of excessive amounts of solid urban waste (Roth & Garcias, 2008), which, if poorly managed, contribute not only to the increase in damage caused to environment, but also inflict several

problems in the social and economic aspect of modern society, thus aggravating the problem.

In Brazil, according to Christo (2018), a large part of the solid waste generated is sent to sanitary landfills or dumps. Since these are inadequate destinations, it can lead to major socio-environmental impacts because in these types of provisions there are no adequate techniques to preserve the environment.

According to data from ABRELPE's "Panorama of Solid Waste in Brazil" in 2018, an amount of 79 million tons was generated. It represents 6.3 million tons of waste without collection and, consequently, with improper destination (ABRELPE, 2018). According to Prates *et al.* (2019), even with the PNRS - National Solid Waste Policy - in force since 2010 (Brasil, 2010), a large part of the waste generated is still disposed of in landfills, without any previous processing.

In Brazil, the composition of USW (Urban Solid Waste) is quite heterogeneous and gravimetric analyzes reveal significant amounts of organic materials, representing, on average, more than 50% of the collected waste (Zago & Barros, 2019). In addition, the agricultural sector also has a strong influence on the generation of OSW (Organic Solid Waste) given the fact that Brazil is a major power in the area. One of the branches of agriculture is fruit growing, a sector that generates significant amounts of biomass resulting from the harvest and processing of products in various sectors. According to Christo *et al.* (2018), more than 40% of food losses occur in the post-harvest and processing stage in developing countries.

Brazil is the world's largest producer of citrus fruits with tangerines being the second largest group of citrus fruits produced, behind only orange (Brackmann *et al.*, 2007). According to IBGE data (IBGE, 2018), approximately 997 thousand tons of tangerines are harvested annually in the country.

In the fruit-growing sector, it is natural for losses to occur along the productive chain. According to Cypriano *et al.* (2017), approximately 50% of the fruit is discarded in the form of fruit pomace (composed of peel, seed, and pulp), which can be used to obtain products with higher added value. In view of the large population increase, a consequence for the coming years is an increase in per capita consumption of electricity in Brazil, making it necessary to search for electricity production in an alternative way to fossil fuels (Christo *et al.*, 2018), in addition to more effective waste management solutions than landfill disposal.

Alternatives to landfill of waste tend to generate greater long-term benefits, such as ensuring the recovery of recyclable materials and the use of USW, thus reducing the environmental liability due to poor waste management. Thus, treatment technologies then come as a remedy for these damages since they can be applied to maximize the waste potential.

Among the various types of solid waste treatment, anaerobic digestion represents an alternative as a biological treatment of organic waste. According to Amaral *et al.* (2004), its main benefit is the generation of biogas which can be used as a source of alternative renewable energy. Anaerobic digestion allows the reduction of the polluting potential and health risks of manure to a minimum, in addition to allowing the recycling of effluent which can be used as a biofertilizer.

Consistent with Gueri *et al.* (2018), food residues have a good potential to produce biogas since they present values above the average of most substrates when evaluating specific methane production. The estimation of this generation can be done through experimental studies carried out in bench reactors such as the biochemical methane potential (BMP) test. According to the authors, this test allows the substrate to biodegrade while, at the same time, measures the specific production of methane per unit of organic load (that is, by the amount of volatile solids).

Although not yet internationally standardized, the test is an analytical reference method when it comes to obtaining more information on the transformation of organic materials into methane. The process takes place under optimal conditions of degradation and can be considered an accelerated anaerobic digestion process.

This study aimed to evaluate the biogas generation potential from peel waste of two types of tangerine, the “ponkan” and the “montenegrin” species, through the BMP test. Thus, this research seeks to add more data to the literature in order to better understand the behavior of organic waste during anaerobic digestion.

2. Materials and Methods

2.1 Substrate Preparation

The substrate collection of the “ponkan” tangerine peel occurred through the purchase of the tangerines, with the peels separated and stored in the refrigerator. In order to obtain the “montenegrin” tangerine residues, a supermarket in the south zone of Rio de Janeiro was contacted, which supplied the peels of the tangerines used for the production of natural juices.

The tangerine peels were subjected to a crushing process to reduce the size of the material and obtain a homogenized mass (Figure 1). Afterwards, such residues were also properly stored under refrigeration at -4 °C.



Figure 1: Crushing the substrate. A) Food multiprocessor; B) Sliced peel; C) Crushed peel

2.2 Substrate Characterization

The following physicochemical properties were determined: water content (w), total solids (TS), and volatile solids (VS) of the tangerine peels. Such information is essential for the evaluation of the biogas generation potential of the substrate.

2.2.1 Water Content Determination

To determine the water content of the “ponkan” and “montenegrin” tangerine peels, the procedure adopted by the Brazilian standard NBR 6457 (ABNT, 1986) was carried out. The samples, already crushed and homogenized, were separated and placed in porcelain crucibles. After mass constancy at a temperature of 110 °C in an oven, the water content based on dry weight was calculated according to Equation (1):

$$w = \frac{M_i - M_f}{M_f} * 100 \quad (1)$$

where w is the water content (%); M_i is the mass of the residue in its initial state, that is, wet (g); and M_f is the mass of the residue after drying, that is, dry (g).

2.2.2 Total Solids Content Determination

The procedure adopted by the Brazilian standard NBR 10664 (ABNT, 1989) was carried out. This procedure is similar to the previous one. However, for the calculation Equation (2) was used:

$$TS = \frac{M_f}{M_i} * 100 \quad (2)$$

where TS is the total solids content (%).

2.2.3 Volatile Solids Content Determination

This parameter determination was based on the WHO methodology (Standard Methods 2540G, 1992). The remaining mass used to determine the w and TS contents was introduced into a muffle furnace under the temperature of 550 °C for 5 hours. The volatile solids content was calculated based on Equation (3):

$$VS = \frac{P_1 - P_f}{P_1} * 100 \quad (3)$$

where VS is the content of volatile solids (%); P_1 is the initial mass of the dried sample in a kiln at 110 °C (g) and P_f is the final mass of the sample burned in a muffle furnace at 550 °C (g).

2.3 Biochemical Methane Potential (BMP) Test

The assay method employed in this study was performed on the equipment made by Abreu (2014). It is recommended to consult the work of Abreu (2014) for the details of the equipment assembly.

However, for the test setup, the VDI 4630 standard was followed. As a recommendation of this standard, before the test setup, it is necessary to determine the amount of substrate and anaerobic sludge to be used. Among the restrictions imposed by the standard is preventing fermentation inhibition, thus, the substrate must not exceed the proportion presented by Equation (4):

$$\frac{TS_{substrate}}{TS_{sludge}} \leq 0,5 \quad (4)$$

The gas production yield of the substrate must be at least 80% of the total gas generated; and the amount of total solids must not exceed 10% to guarantee an adequate mass transfer.

Based on the restrictions and the physicochemical characteristics of the residue, the substrate mass and the amount of anaerobic sludge for digestion were calculated. Thus, for the “ponkan” tangerine, 10 g of substrate was added to 390 mL of sludge, while for the “montenegrin” tangerine, the values were 12 g and 388 mL, respectively. In the bottles containing only anaerobic sludge, the added value was 400 mL for both tests. Figure 2 shows the sample preparation process in the flasks. It should be noted that the tests were performed in triplicates.



Figure 2: Preparation of the substrate-sludge mixture for the BMP test

With the substrates properly allocated in their flasks, the test proceeded with the pH measurement with the *Hanna* edge benchtop pH meter. It is important to note that during the entire test, it was only possible to measure the pH before and after the end of the test, that is, twenty-one days after the start, because after the coupling of the eudiometric tube to the reagent flask, the set does not allow continuous pH measurements during the process.

Finally, before being taken to the eudiometer, oxygen was extracted from the inside of the flasks through the addition of nitrogen gas, which led to the creation of an anaerobic environment for the degradation of the substrate.

Afterwards, the flasks were finally coupled to the eudiometer, starting the test with daily measurements of gas generation and future analyzes on the biogas generator potential of the tangerine peel residues. Figure 3 shows the complete system of the equipment used for the BMP test at the Laboratory of Geotechnics and Environment (LGMA) of PUC-Rio, to analyze the potential of biogas generation through anaerobic digestion of the tangerine peel.



Figure 3: BMP apparatus used

3. Results and Discussion

3.1 Substrates Characterization

Table 1 shows the results regarding the characteristics of the tangerine peels. For the evaluated “ponkan” tangerine peels, the average water content reached 304.9% and contents of 24.7% of total solids and 98.5% of volatile solids were determined. Similarly, for the “montenegrin” tangerine peels, the same parameters were determined noting slightly higher values of water content (316.4%) but with slightly lower values for TS and VS contents (24 and 96.6%, respectively) in relation to those found for the “ponkan” tangerine.

Table 1: Tangerine peel test results

Substrate	Input parameters		
	w (%)	TS (%)	VS (%)
“Ponkan” tangerine	304.9	24.7	98.5
“Montenegrin” tangerine	316.4	24	96.6

3.2 BMP Test

Table 2 presents the summary of the input and output data (after the 21-day test period) used for the BMP tests. Regarding the “ponkan” peel, the results of accumulated gas generation in the period of twenty-one days are shown in Figure 4. The generation curves for flasks 1, 2, and 3 show the behavior of microbial activity in anaerobic digestion.

In the first days the activity is intense, with a great slope of the curve that, over time, becomes softer from the tenth day, indicating the reduction of microbial activity in the generation of gas, which finally stabilizes around the twentieth day with little gas generation. Flasks 4, 5 and 6, in other words, flasks with only anaerobic sludge, were used as blank solutions, that is, to show how much biogas is generated only by the sludge and not by the substrate.

It is worth emphasizing the importance of measuring pH before and after the test, as the test configuration does not allow constant measurements. It is noted that the pH values practically did not decrease after the test, remaining around the range between pH 7.3 and pH 7.8.

Table 2: Summary of input and output data for the tangerine BMP test

Substrate	Input data	Output data	F1	F2	F3	F4	F5	F6
“Ponkan” tangerine	Substrate mass (g)	-	10	9.99	10.01	-	-	-
	Sludge mass (mL)	-	390	390	390	400	400	400
	Initial sludge pH	-	-	-	-	7.74	7.74	7.74
	Initial solution pH	-	7.59	7.59	7.59	-	-	-
	-	Final solution pH	7.3	7.28	7.3	7.46	7.45	7.47
“Montenegrin” Tangerine	Substrate mass (g)	-	12	12	12	-	-	-
	Sludge mass (mL)	-	388	388	388	400	400	400
	Initial sludge pH	-	-	-	-	7.92	7.92	7.92
	Initial solution pH	-	7.77	7.68	7.72	-	-	-
	-	Final solution pH	7.32	7.34	7.35	7.46	7.49	7.48

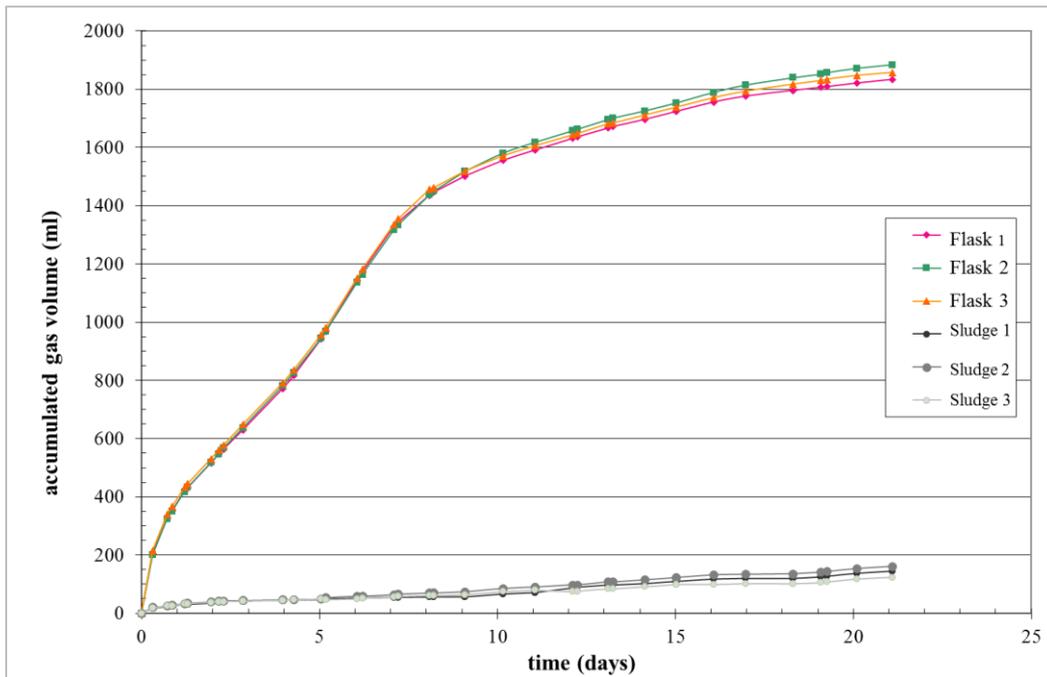


Figure 4: Accumulated volume of biogas for “ponkan” tangerine peel

Thus, an average of 1,858 mL (or 1,621.4 NmL by conversion to standard temperature and pressure STP) was obtained for accumulated gas volume for flasks 1, 2 and 3, that is, those with the mixture peel + sludge, and an average of 142.3 mL (or 124.2 NmL by conversion to STP) for flasks 4, 5 and 6, which contained only sludge. Correcting the volume in relation to the volume generated by the sludge, the volume of biogas generated was 1,497.2 NmL.

In terms of biogas generation potential, the value for the “ponkan” tangerine peel is approximately 615.38 NmL/gVS, or, in terms of total solids, 606.15 NmL/gTS.

The graphical result of the accumulated biogas volume for the “montenegrin” tangerine peel is shown in Figure 5. The analysis of the graph of accumulated biogas production allows to verify that around the fifth day there is still a marked generation of gas, with the slope of the curve decreasing from the twelfth day of testing, and stabilizing around the eighteenth day of testing.

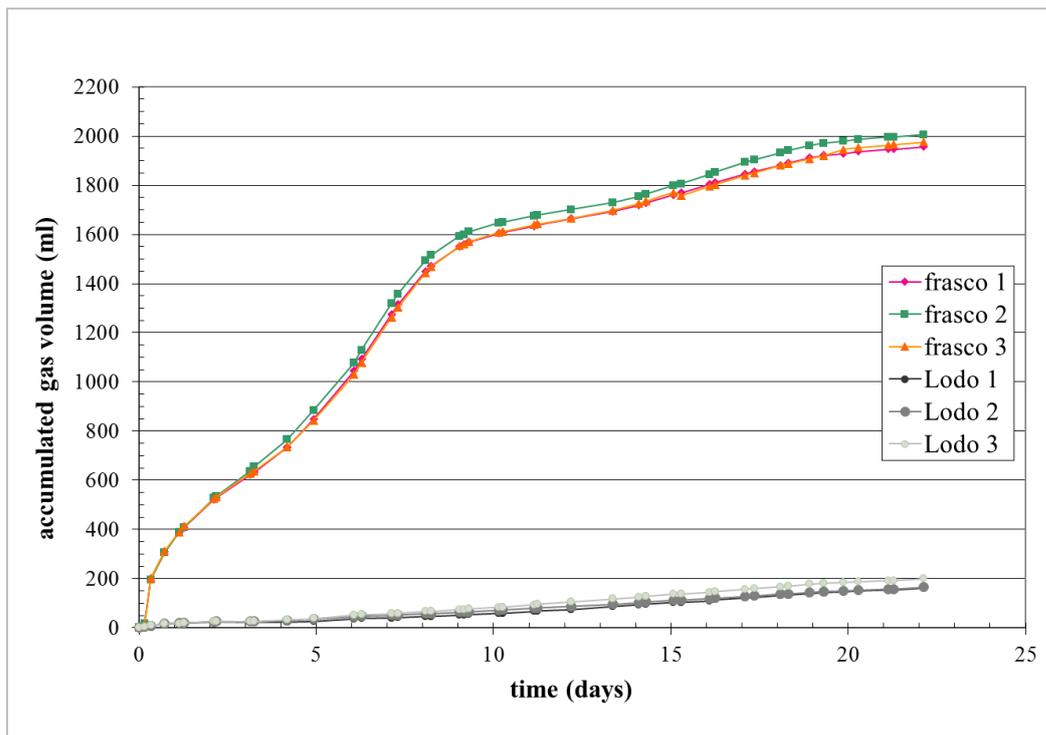


Figure 5: Accumulated volume of biogas for the “Montenegrin” tangerine peel

An average of 1,979.5 mL (or 1,727.5 NmL by conversion to NTP) of accumulated gas volume was obtained in flasks 1, 2, and 3, which contained a mixture of peel + sludge, and an average of 175.7 mL (or 153.3 NmL by conversion to NTP) for flasks 4, 5, and 6, with only sludge. Correcting the volume in relation to the volume generated by the sludge, the volume of biogas generated becomes 1,574.2 NmL, on average, for the “montenegrin” tangerine peel.

The biogas generation potential of “montenegrin” tangerine was approximately 565.84 NmL/gVS, slightly less than for “ponkan” tangerine with a difference of 49.5 NmL/gVS. In terms of total solids, the potential of montenegrin tangerine was 546.6 NmL/gTS, slightly less than for the “ponkan” tangerine, with a difference of 59.5 NmL/gTS.

From the analysis of the results obtained, even with a greater generation of gas within the twenty-one days by the “montenegrin” tangerine peel, it has a lower potential for biogas generation compared to that of the peel of the “ponkan” tangerine. Some factors capable of justifying this issue are related to the fact that “ponkan” tangerine has better physical properties than “montenegrin” tangerine. For instance, for the same TS content, it presents a slightly higher VS content (2%) than the “montenegrin” tangerine.

Table 3 compares the biogas generation potentials of some fruits found in the literature with the tangerines studied in this research. Although each author expressed the biogas potential through a certain unit, to facilitate the comparison of the results of the different fruits, in this study the units were converted to NmL/gVS, with the exception of those results expressed in terms of TS, in which case the original unit was maintained since in these studies details about the VS values were not presented to make the conversion.

Table 3: Comparison of biogas potential of different fruits

Substrate		Biogas Potential	Unity	Author
Fruit	Fruit Parts			
Tangerine	"Ponkan" Peel	615.38	NmL/gVS	This research
		606.15	NmL/gTS	
	"Montenegrin" Peel	565.84	NmL/gVS	
		546.6	NmL/gTS	
	Peel (unspecified)	424.12	NmL/gVS*	GUNASEELAN, 2004**
Orange	Pomace	288	NmL/gVS	SANTOS <i>et al.</i> , 2018
	Pre-treated peel	478	NmL/gVS	CARVALHO <i>et al.</i> , 2017
	Peel	397.07	NmL/gVS*	GUNASEELAN, 2004**
Banana	Peel	212.93	NmL/gTS*	SOUZA <i>et al.</i> , 2013
	Peel	571.44	NmL/gVS*	ACHINAS <i>et al.</i> , 2019
	Peel + stalk + leaves + pseudostem	269.05	NmL/gTS*	SOUZA <i>et al.</i> , 2010
Apple	Pulp	610.88	NmL/gTS*	COALLA <i>et al.</i> , 2009
Grape	Pomace	174.54	NmL/gVS*	BESINELLA <i>et al.</i> , 2017
Mango	Peel	322.89 – 456.41	NmL/gVS*	GUNASEELAN, 2004**
Pineapple	Peel	311.55	NmL/gVS*	
Melon	Peel	210.4	NmL/gVS*	
Lychee	Seeds	62.31	NmL/gVS*	
	Peel	93.73	NmL/gVS*	
Cherry	Seeds	27.14	NmL/gVS*	ZHAO <i>et al.</i> , 2016
Passion Fruit	Peel	170	NmL/gVS*	
Avocado	Peel	78.54	NmL/gVS*	
Dragon Fruit	Peel	170.17	NmL/gVS*	

*Values adapted to the units of this research; ***apud* LUCENA, 2016.

It is evident from this comparison that the characteristics of each fruit influence the process of anaerobic digestion in different ways. It should be noted that the peels are the parts of the fruit that tend to generate the greatest amount of gas, while the seeds have practically no generation.

Gunaseelan (2004) *apud* LUCENA (2016) carried out a BMP test with several fruits, including citrus fruits like tangerine. Although the type of tangerine was not specified, the author reached results of 0.486 m³/kgVS for the analyzed fruits. Converting to the units used in this research, the value reaches 424.12 NmL/gVS, below the 615.38 NmL/gVS obtained with the “ponkan” tangerine peels and 565.84 NmL/gVS of the “montenegrin” tangerine determined in this study. This fact indicates the possibility that another type of tangerine was used. The organic load content of the tests used by Gunaseelan (2004) must also be observed.

Santos *et al.* (2018) carried out tests with orange pomace and inoculum, reaching results considered efficient in terms of production, potential, and methane generation. According to those authors, the configuration of the orange pomace mixed with the inoculum showed an accumulated volume of biogas of 1,748.0 NmL. Regarding the inoculum without the addition of orange pomace, an accumulated volume of biogas of 308.0 NmL was generated. Note that, when comparing with the tangerines studied here, the gas generation values were close (1,497.2 NmL and 1,574.2 NmL). In terms of biogas generation potential, Santos *et al.* (2018) reached the result of 288 NmL/gVS, that is, 327.38 NmL / gSV below the “ponkan” peel and 277.84 NmL/gVS below the “montenegrin” peel.

Finally, Carvalho *et al.* (2017) in studies with pre-treated orange peel with the addition of sewage sludge obtained a biogas potential of 478 NmL/gVS, that is, 137.38 NmL/gVS below the “ponkan” tangerine and 87.84 NmL/gVS below the “montenegrin” tangerine. Such information reinforces the importance of tangerine as a fruit with a potential similar to orange as a substrate for anaerobic digestion and consequent biogas generation.

5. Conclusion

This research carried out an analysis of the biochemical potential of biogas from an anaerobic digestion process of two types of tangerine. The results of laboratory experiments obtained with peels of “ponkan” and “montenegrin”

tangerines showed a potential for biogas generation of 615.38 NmL/gVS and 565.84 NmL/gVS, respectively. The difference found can be considered as reflecting the physical-chemical characteristics, which showed little difference and which, in turn, influence their ability to generate gas during anaerobic digestion.

Furthermore, the biogas potential values obtained indicate that such substrates have a high potential when compared to other fruit peels. Therefore, the anaerobic digestion of the tangerine peel is a great solution in the management of solid waste, since its application results in good efficiency in the degradation of organic matter and fine energy use with the biogas generation, being then not just a way to manage waste as well as an option to generate clean energy.

Keywords

Anaerobic digestion; biogas; BMP test; tangerine peel.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 Problema e relevância	25
1.2 Resíduos Sólidos Orgânicos Gerados da Fruticultura	28
1.3 Objetivos	30
1.4 Desenvolvimento da Pesquisa	30
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
2.1 Gestão de Resíduos	32
2.1.1 Legislações Acerca de Resíduos no Brasil	34
2.1.2 Gestão dos Resíduos Sólidos Orgânicos	38
2.1.3 Formas de Tratamento de Resíduos Sólidos Orgânicos	40
2.2 Digestão Anaeróbia e a Geração de Biogás	44
2.2.1 Princípios da Digestão Anaeróbia	44
2.2.2 Codigestão Anaeróbica	48
2.2.3 Configurações da Digestão Anaeróbia	49
2.2.4 Fatores que Influenciam no Processo de Digestão Anaeróbia	50
2.2.5 Biogás	54
2.3 A Fruticultura e os RSO Gerados do Processos de Fabricação de Sucos	57
2.3.1 Frutas Cítricas e a Tangerina	58
2.3.2 Processo de Fabricação de Sucos	60
2.3.3 Benefícios do Aproveitamento de Biogás para o Processo de Fabricação de Sucos	63
3 MATERIAIS E MÉTODOS	67
3.1 Preparação do Substrato	67
3.2 Caracterização do Substrato	69
3.2.1 Determinação do Teor de Umidade	69
3.2.2 Determinação do Teor de Sólidos Totais	70
3.2.3 Determinação do Teor de Sólidos Voláteis	70
3.3 Ensaio do Potencial Bioquímico de Metano (BMP)	71
3.3.1 Eudiômetro	72
3.3.2 Montagem do ensaio	75
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
4.1 Propriedades Físicas das Tangerinas	79
4.1.1 Tangerina “Ponkan”	79
4.1.2 Tangerina “Montenegrina”	80
4.2 Resultados do Ensaio BMP	81
4.2.1 Tangerina “Ponkan”	81
4.2.2 Tangerina “Montenegrina”	83

4.3 Discussões sobre o Ensaio	84
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
5.1 Sugestões para Futuros Trabalhos	89
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

Lista de figuras

Figura 1.1: Disposição Final de RSU em 2018 (toneladas/dia)	27
Figura 1.2: Fluxograma com etapas de cadeia produtiva e perdas ao longo do processo	29
Figura 2.1: Hierarquia de gerenciamento de resíduos	35
Figura 2.2: Processo simplificado da digestão anaeróbia	47
Figura 2.3: Comparação digestão anaeróbia seca e úmida	50
Figura 2.4: Aproveitamento energético do biogás	56
Figura 2.5: Etapas do processo de produção de sucos de laranja	61
Figura 2.6: Equipamento para extração de sucos naturais	62
Figura 3.1: Casca de tangerina tipo "Ponkan"	68
Figura 3.2: Processo de trituração do substrato	68
Figura 3.3: Estufa à 110 °C utilizada na determinação da umidade da tangerina	70
Figura 3.4: Mufla à 550 °C utilizada para a determinação de SV	71
Figura 3.5: Tubo eudiométrico segundo a norma DIN 38414, parte 8	73
Figura 3.6: Tubo eudiométrico utilizado no ensaio	74
Figura 3.7: Preparo da mistura substrato-lodo para digestão anaeróbia	76
Figura 3.8: Medição do pH	77
Figura 3.9: Cilindro de gás nitrogênio utilizado para retirada do oxigênio	77
Figura 3.10: Equipamento do LGMA para realização do ensaio BMP	78
Figura 4.1: Volume acumulado de biogás para a Tangerina "Ponkan"	81
Figura 4.2: Volume acumulado de biogás para a Tangerina "Montenegrina"	83

Lista de tabelas

Tabela 2.1: Componentes do biogás	55
Tabela 2.2: Equivalência do biogás com outros combustíveis	57
Tabela 2.3: Comparação das Propriedades Tangerina “Ponkan” e “Montenegrina”	65
Tabela 4.1: Resultados das Propriedades Físicas da “Ponkan”	80
Tabela 4.2: Resultados das Propriedades Físicas da “Montenegrina”	80
Tabela 4.3: Dados do ensaio BMP da casca da tangerina “Ponkan”	81
Tabela 4.4: Resultados do Ensaio da Tangerina “Ponkan”	82
Tabela 4.5: Dados do ensaio BMP para a tangerina “Montenegrina”	83
Tabela 4.6: Resultados do Ensaio da Tangerina “Montenegrina”	84
Tabela 4.7: Comparativo de potencial de biogás de diversas frutas	86

1 Introdução

1.1 Problema e relevância

Com o crescente aumento dos danos antrópicos causados ao meio ambiente, surge a necessidade de medidas e técnicas de remediação a serem aplicadas em prol de um futuro sustentável para as gerações futuras.

O constante aumento do aquecimento global ocorrido após metade do século XX e intensificado por ações antropogênicas a partir da emissão de gases estufa, como o metano, por exemplo, é uma realidade que preocupa, não apenas pelos nocivos danos ao meio ambiente e à qualidade de vida dos seres humanos, mas também pela preservação das gerações futuras (Silva & Paula, 2009). Em meados da década de 1980, com a realização da conferência de Brundtland, surgiu o conceito para “desenvolvimento sustentável”, que defende o suprimento das necessidades do presente sem comprometer as gerações futuras (BRUNDLAND, 1987).

A fim de evitar danos desmedidos à existência dos seres humanos, estudos recentes realizados pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) examinaram a necessidade de limitar o aquecimento global pós época pré-industrial a 1,5 °C ao invés de 2 °C, conforme era previsto anteriormente pelo Acordo Climático de Paris, firmado em 2015. Segundo o estudo, a ausência de medidas a serem tomadas no presente poderão gerar danos extremamente nocivos ao meio ambiente, aos seres humanos, à fauna e à flora do planeta.

Segundo o documento oficial do IPCC, as atividades humanas causaram um aumento de aproximadamente 1 °C na temperatura global desde a época pré-industrial até os dias atuais. No entanto, a previsão é de que esse aquecimento alcance 1,5 °C em um período entre 2030 e 2052 no caso do aumento se manter na taxa que se encontra na atualidade, ou seja, aproximadamente 0,2 °C por década (IPCC, 2018). Impactos em sistemas naturais e mudanças de estilo de vida já podem ser notados devido ao aquecimento global intensificado pelas ações humanas.

Dentre tais diferenças, alguns exemplos: aumento da temperatura média na maioria das regiões terrestres e oceânicas; precipitações de chuva com intensidade acima da média em diversas localidades; aumento na probabilidade de secas em regiões propícias para tal; aumento no nível do mar causado por derretimento das geleiras; mudança de ecossistemas, alterando o bioma de certos animais; dentre muitas outras.

Limitar o aquecimento global para 1,5 °C envolve grandes reduções na emissão de metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂). Dessa forma, uma forte demanda no setor de bioenergia é necessária, destacando-se a importância da utilização de medidas de gerenciamento adequadas, as quais contribuam na minimização do problema, como é o caso da utilização da digestão anaeróbia (AD – *anaerobic digestion*) empregada para o tratamento de resíduos sólidos orgânicos.

O crescente aumento da população mundial e o acelerado processo de urbanização das cidades vêm resultando na geração de desmedidos volumes de resíduos sólidos urbanos (RSU) (Roth & Garcias, 2008), os quais, se mal gerenciados, contribuem não apenas para o aumento dos danos causados ao meio ambiente, como também infligem diversos problemas no quesito social e econômico da sociedade moderna, agravando assim a problemática em questão.

No Brasil, segundo Paixão (2018), grande parte dos resíduos sólidos gerados são destinados a aterros sanitários ou ainda a lixões, sendo o último considerado como uma forma de disposições inadequada, por ocasionar grandes impactos socioambientais.

Dados do Panorama ABRELPE indicam que o Brasil, em 2018, gerou um montante de 79 milhões de toneladas de resíduos. Destes, cerca de 43,3 milhões de toneladas foram destinados à aterros sanitários, 29,5 milhões de toneladas dispostas em lixões ou aterros controlados e cerca de 6,3 milhões de toneladas não possuem coleta e, conseqüentemente, com destino impróprio. Além disso, o Panorama ainda prevê uma geração anual de cerca de 100 milhões de toneladas por volta de 2030 para o país (ABRELPE, 2018). A Figura 1.1 ilustra a divisão da disposição final de RSU no Brasil no ano de 2018.



Figura 1.1: Disposição Final de RSU em 2018 (toneladas/dia)
Fonte: ABRELPE (2018)

A enorme quantidade de resíduos que é aterrada e disposta de forma inadequada anualmente no Brasil evidencia um desperdício de uma fonte valiosa que poderia ser reaproveitada de diversas formas, como por exemplo reciclada ou energeticamente.

Em 2010, visando um gerenciamento mais eficiente dos resíduos sólidos brasileiros, instituiu-se a PNRS - Política Nacional dos Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) pela Lei 12.305/2010, a qual tem por objetivos principais a redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, além do desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias com o intuito de minimizar os impactos ambientais.

No entanto, de acordo com Prates *et al.* (2019), mesmo com a vigência da PNRS no Brasil desde 2010, uma grande parte dos resíduos gerados ainda são dispostos em aterros, sem qualquer tipo de processamento prévio. Alternativas ao aterramento de resíduos tendem a gerar maiores benefícios a longo prazo, como a garantia da recuperação de materiais recicláveis, diminuindo assim o passivo ambiental gerado pelo mau gerenciamento de resíduos. As tecnologias de tratamento de resíduos vêm então como uma solução de remediação a esses danos, aplicadas ao aproveitamento máximo do seu potencial.

Dentre os diversos tipos de tratamento de resíduos sólidos, a digestão anaeróbia representa uma alternativa como tratamento biológico dos resíduos orgânicos. De acordo com Amaral *et al.* (2004), seu principal benefício é a geração

do biogás, que pode ser utilizado como fonte de energia alternativa renovável. A AD permite a redução do potencial poluidor e dos riscos sanitários dos dejetos ao mínimo, além de permitir a reciclagem do efluente, o qual pode ser utilizado como biofertilizante.

Além disso, Moustakas *et al.* (2019) afirmam que, atualmente, a AD se trata da melhor solução ambiental e econômica de tratamento para uma variedade de resíduos orgânicos biodegradáveis gerados no planeta por meio das atividades antropogênicas.

1.2

Resíduos Sólidos Orgânicos Gerados da Fruticultura

As frutas estão entre as *commodities* mais importantes no comércio global devido aos seus valores nutricionais fundamentais. De acordo com Wikandari (2014), cerca de 50 % da produção de frutas chega até o consumidor e o restante acaba como resíduos da sua longa cadeia produtiva.

Segundo o autor, nos últimos 30 anos ocorreu um aumento de 2,65 % na produção global de frutas, chegando a um total de 804,4 milhões de toneladas produzidas globalmente em 2012. Gorayeb (2019) reforça o fato de que o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de fruta do mundo, com cerca de 45 milhões de toneladas anuais, apresentando clima temperado durante boa parte do ano e grande oferta de fruta tropicais. Contudo, perdas e desperdícios ocorrem em todas as etapas dessa cadeia produtiva.

No geral, este resíduo é usualmente destinado a lixões, aterros controlados ou aterros sanitários, criando diversos problemas ambientais. Um tratamento mais sustentável de tais resíduos é, portanto, altamente desejável. Converter resíduos de frutas em biogás, via digestão anaeróbia, não apenas contribui na sua gestão, como também ajuda na remediação dos danos ambientais e no desafio da maior utilização de energia sustentável para o futuro. Resíduos de frutas são ótimos substratos para a produção de biogás por possuírem alto teor orgânico, e se encontram prontamente disponíveis em grandes quantidades (WIKANDARI, 2014).

A Figura 1.2 ilustra a cadeia produtiva da hortifruticultura e apresenta como, ao longo de um processo de produção de sucos naturais, as perdas (ou geração de resíduos) de biomassas vão ocorrendo dentro de cada etapa da produção. A coluna esquerda evidencia os setores que geram significativas quantidades de resíduos ao

longo de toda a cadeia produtiva, demonstrando todo o potencial do setor para o aproveitamento de tais resíduos para geração de biogás via digestão anaeróbia. Já com a coluna da direita é possível observar a grande quantidade de energia que necessita ser empregada para o funcionamento deste setor, energia esta que poderia ser proveniente dos próprios recursos energéticos que o tratamento adequado dos resíduos do setor poderia fornecer.

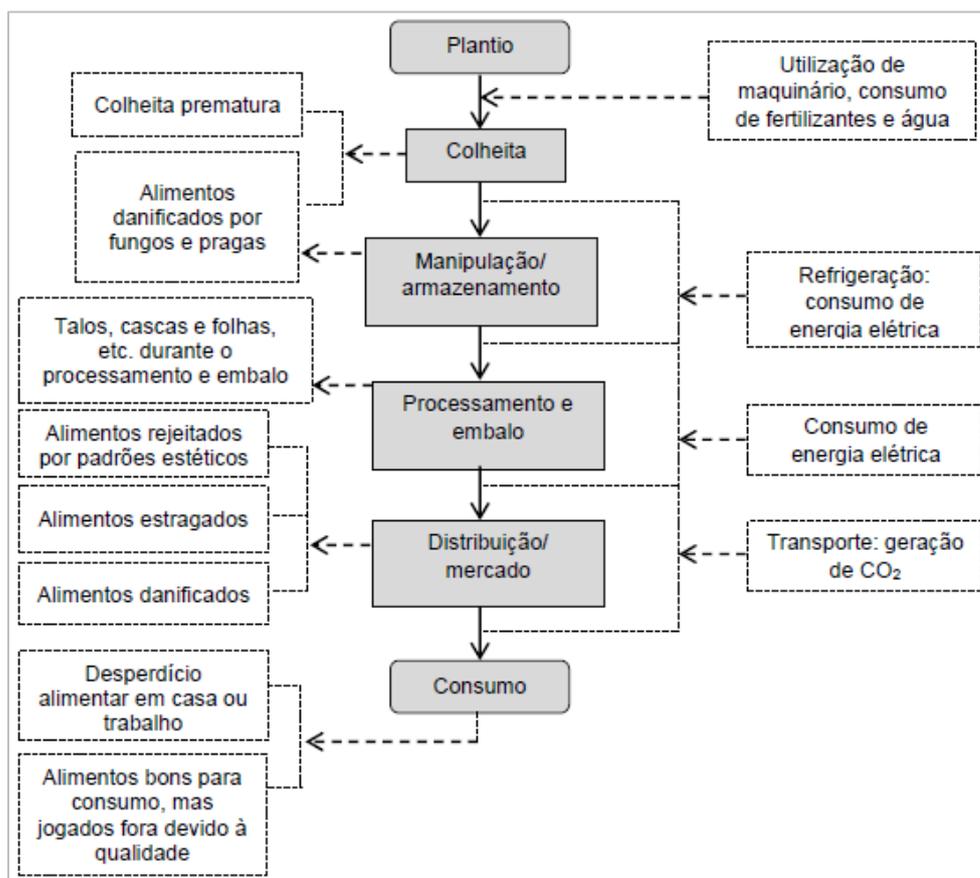


Figura 1.2: Fluxograma com etapas de cadeia produtiva e perdas ao longo do processo
Fonte: Christo *et al.*, 2018

É importante notar que os resíduos gerados pelo plantio e colheita são os resíduos sólidos orgânicos (RSO), mais comumente nomeados como resíduos agrícolas. Enquanto os demais resíduos são resíduos sólidos orgânicos que podem ser resíduos industriais ou resíduos sólidos urbanos provenientes de estabelecimentos comerciais de pequeno a médio porte como restaurantes, lanchonetes, casas de sucos e até domésticos.

Esta pesquisa teve como problema científico a importância da compreensão sobre a necessidade da implantação de tecnologias de tratamento de resíduos sólidos orgânicos, como o caso de resíduos de casca de frutas geradas pela produção

de suco, que gerem produtos a ser valorizados no combate aos danos causados ao meio ambiente, como é o caso do uso do biogás gerado a partir do tratamento via digestão anaeróbia.

1.3 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é o de avaliar o potencial de geração de biogás proveniente de resíduos de casca de tangerina por meio da realização de um ensaio BMP (*Biochemical Methane Potential*).

Os objetivos específicos, por sua vez, consistem na análise dos resíduos orgânicos, em especial aqueles gerados pelo processo de fabricação de sucos de fruta e a realização de uma revisão bibliográfica acerca dos tipos/espécies de frutas que já tiveram o potencial bioquímico de metano levantado.

1.4 Desenvolvimento da Pesquisa

A presente pesquisa foi executada em cinco etapas, descritas a seguir: (1) identificação do problema e objetivos da pesquisa; (2) revisão da literatura relacionada ao tema; (3) descrição dos materiais e métodos utilizados no ensaio realizado para a pesquisa; (4) análise dos resultados e (5) considerações finais.

No capítulo 1, são descritas as necessidades do estudo em questão, a importância e relevância da utilização de tecnologias de tratamentos de resíduos tendo em vista uma previsão ambiental pessimista para o futuro caso medidas de sustentabilidade não sejam aplicadas no presente, além de uma breve apresentação sobre os resíduos sólidos orgânicos oriundos da fruticultura, seu processamento para fabricação de sucos e potencial de aproveitamento via tratamento adequado.

No capítulo 2, é realizada a revisão da literatura sobre a gestão de resíduos no Brasil, com foco nos resíduos orgânicos, e alguns tipos de tecnologias de tratamento para tais resíduos, em especial a digestão anaeróbia. Além disso, discorreu-se sobre o processo de fabricação de sucos e a relevância das frutas como substratos para a digestão anaeróbia e como o biogás poderia favorecer o setor. O capítulo também inclui uma revisão sobre as frutas cítricas e as tangerinas estudadas nessa pesquisa.

No capítulo 3, são apresentados os procedimentos realizados para o ensaio com as cascas de tangerina, a importância dos fatores de influência na digestão anaeróbia e a descrição detalhada do procedimento experimental.

No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos do ensaio, os gráficos gerados, figuras e tabelas. Também é feita uma discussão dos resultados comparando tanto os valores obtidos para ambas as espécies de tangerina como também com outros tipos de frutas encontrados na literatura, além da correspondência entre os resultados encontrados na literatura e aqueles obtidos no programa experimental.

Finalmente, no Capítulo 5, são feitas as considerações finais relacionadas ao tema e conclusões acerca do que foi estudado. Neste capítulo também são citadas as sugestões para futuros trabalhos.

2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo tem por proposição transcorrer sobre a temática da gestão de resíduos no Brasil, das leis e políticas públicas que a envolvem e a importância da valorização dos resíduos orgânicos via tratamento adequado. Além disso, o capítulo: faz uma revisão da literatura acerca da digestão anaeróbia (AD); aborda os processos de produção de suco de fruta no Brasil e a ideia de como os resíduos orgânicos oriundos de tais processos podem ser valorizados através de biogás gerado via AD; e realiza uma exposição relacionada aos resíduos cítricos e às tangerinas.

2.1 Gestão de Resíduos

Antes de adentrar ao tema propriamente, torna-se importante apresentar as definições do que são resíduos sólidos e apresentar uma breve distinção entre eles. Ademais, será apresentado a origem dos resíduos que serão tratados no presente trabalho.

Os resíduos sólidos são definidos no Brasil como:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT NBR 10004:2004, p. 01).

Já a Lei 12.305/10 (Política Nacional de Resíduos Sólidos, posteriormente explicada) os define como:

XVI - resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável

o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

De acordo com o inciso XV do artigo 3, capítulo II, a Política Nacional de Resíduos Sólidos também define o que são rejeitos: parcela dos resíduos sólidos que “depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010).

Além disso, para efeito desta Lei, a origem dos resíduos sólidos pode ser classificada, dentre outras alíneas apresentadas na Lei, como:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
 - b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
 - c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;
 - d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
 - [...]
 - f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
 - [...]
 - i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades. [...]
- (BRASIL, 2010).

Com relação às alíneas mencionadas, percebe-se que todas representam parcelas em que ocorre a geração de resíduos orgânicos. Nos resíduos domiciliares, esta parcela consiste majoritariamente nos restos de alimentos. Para os resíduos de limpeza urbana, são incluídos os resíduos de feiras livres, por exemplo.

Já com relação aos resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviço, dependendo do tipo de estabelecimento este resíduo pode ser diverso e em quantidades muito distintas, variando principalmente entre grandes empreendimentos e empreendimentos menores/locais. No caso deste trabalho, o estudo se dá em torno da geração de resíduos orgânicos oriundos dos estabelecimentos de médio/grande porte, que gerem uma quantidade de resíduos a ponto de se tornar vantajoso o seu tratamento via digestão anaeróbia.

Com relação aos resíduos industriais, a geração proveniente das produções de sucos de frutas, por exemplo, representa o principal objeto de estudo dessa pesquisa,

já que durante a sua fabricação, como será apresentado na seção 2.2, ocorrem diversas perdas ao longo da cadeia produtiva.

Finalmente, levar em consideração os resíduos agrossilvopastoris é de suma importância, tendo em vista suas grandes gerações anuais provenientes das atividades agrícolas.

Os resíduos orgânicos consistem em materiais que, em ambientes naturais equilibrados, se degradam espontaneamente e reciclam os nutrientes nos processos da natureza (MMAa, 2020). No caso dos resíduos sólidos urbanos (RSU), os resíduos orgânicos representam metade da sua geração e “sob esse panorama, o uso da fração orgânica, que representa acima de 50 % de volume de resíduo sólido urbano (FORSU), como fonte de energia renovável tem sido considerado no país” (STEFANUTTI *et al.*, 2019).

2.1.1 Legislações Acerca de Resíduos no Brasil

Em 2 de agosto de 2010 foi assinada a Lei 12.305/10, intitulada “Política Nacional de Resíduos Sólidos” (PNRS) no Brasil:

A Política Nacional de Resíduos Sólidos reúne o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotados pelo Governo Federal, isoladamente ou em regime de cooperação com Estados, Distrito Federal, Municípios ou particulares, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

A Lei prevê a redução e prevenção na geração de resíduos, incentivando práticas de hábitos de consumo sustentável, já que propicia instrumentos para um aumento da reciclagem e reutilização dos resíduos sólidos, além da destinação adequada dos rejeitos. Ademais: institui a responsabilidade compartilhada dos geradores de resíduos; cria metas importantes em vista da eliminação dos lixões; institui instrumentos de planejamento nos níveis nacional, estadual, microregional, intermunicipal e metropolitano e municipal; além de impor que os entes particulares elaborem seus planos de gerenciamento de resíduos (MMAb, 2020).

Com relação ao gerenciamento dos RSU, de acordo com a PNRS (BRASIL, 2010), as principais medidas a serem tomadas são a prevenção e a minimização, dessa forma, a menor geração preserva o meio ambiente e reduz diversos custos envolvidos com a manutenção dos resíduos. A Figura 2.1 demonstra a hierarquia

de medidas a serem priorizadas no gerenciamento dos resíduos, sendo as medidas do topo as mais favoráveis e as da base as menos favoráveis.



Figura 2.1: Hierarquia de gerenciamento de resíduos
Fonte: Adaptado de Bolton & Rousta (2019)

A partir da análise da Figura 2.1, fica evidente que as medidas mais importantes no gerenciamento de resíduos se relacionam com atitudes de consciência ambiental, o que torna de suma importância o desenvolvimento de campanhas sociais de conscientização da população. Com relação a como gerenciar os resíduos já existentes, prioriza-se a reutilização e a reciclagem, respectivamente. É importante ressaltar que o produto reciclado deve almejar a melhor qualidade possível, já que produtos de má qualidade devem ser evitados durante a reciclagem. Caso a qualidade do produto reciclado (ou a ser reciclado) seja muito baixa, então a preferência é por um tratamento e consequente recuperação energética. A última opção desejável é a disposição final, sendo os aterros sanitários prioridade se comparados com os aterros controlados e lixões (BOLTON & ROUSTA, 2019).

Apesar da recuperação energética ocupar a penúltima opção dentre as mais favoráveis, a mesma consiste em um investimento valioso a fim de se transformar resíduos em energia (o conceito *waste-to-energy*), que se torna cada vez mais necessário no mundo moderno visto a necessidade da transição energética dos combustíveis fósseis para energia renovável (MCDONOUGH & BRAUNGART, 2002).

De acordo com o Panorama ABRELPE, mesmo com quase uma década de PNRS, o setor ainda apresenta déficits consideráveis, principalmente relacionados

à coleta seletiva, recuperação de materiais e disposição final dos resíduos coletados: a coleta seletiva está longe de ser universalizada; os índices de reciclagem se apresentam incipientes e pouco evoluem com os anos; e os lixões ainda estão presentes em todas as regiões do país, com impactos diretos ao meio ambiente e às pessoas (ABRELPE, 2018).

Enquanto o mundo avança em direção a um modelo mais moderno e sustentável de gestão de resíduos, o Brasil continua apresentando as deficiências verificadas há vários anos, ficando abaixo dos indicadores médios de nações da mesma faixa de renda e desenvolvimento (ABRELPE, 2018, p. 62).

Em 2011, iniciou-se o processo de elaboração do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), que consiste em um dos instrumentos mais valiosos da PNRS, já que identifica os problemas dos diversos tipos de resíduos gerados, as alternativas de gestão e gerenciamento passíveis de implementação, indicando planos de metas, programas e ações para mudanças sobre o quadro atual (MMA, 2012). O Plano Nacional de Resíduos Sólidos não se confunde com a Lei, visto que representa a estratégia de longo prazo em âmbito nacional para operacionalizar as disposições legais, princípios, objetivos e diretrizes da Política.

Em adição, a instituição de Leis estaduais que promovam o gerenciamento adequado de resíduos e formas de enfrentar as mudanças climáticas é de grande importância para seu efetivo gerenciamento em cada região. Como é o caso da Lei 17.542, de 12 de julho de 2018, que institui a Política Estadual do Biogás para o Estado de Santa Catarina, que estabelece providências visando o melhor aproveitamento desse biocombustível.

A Lei 17.542/18 reúne um “conjunto de princípios, objetivos instrumentos, diretrizes, ações, incentivos e fomentos adotados pelo Estado [...] com vistas à produção, à exploração, ao gerenciamento e à comercialização de biogás” (SANTA CATARINA, 2018).

Dentre os principais objetivos da Política Estadual do Biogás, é importante destacar a intenção de minimização do volume de resíduos sólidos e rejeitos oriundos dos geradores de biomassa, fomentando o aproveitamento dos resíduos orgânicos via biodigestão e consequente geração do biogás. A Lei ainda incentiva: a adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas para minimizar impactos ambientais; o fomento ao aproveitamento de biomassa e biodigestão por meio do seu uso em escala industrial e comercial, como forma de geração de

emprego e renda; e o estímulo ao consumo e à produção sustentável de biomassa, biogás e biometano (SANTA CATARINA, 2018).

Assim como em SC, no Paraná, por sua vez, a Lei 19.500 de 21 de maio de 2018, dispõe sobre a Política Estadual do Biogás e Biometano, abrangendo também os demais produtos e direitos derivados da decomposição de matéria orgânica (biodigestão). A Lei visa o enfrentamento das mudanças climáticas e à promoção do desenvolvimento regional com sustentabilidade ambiental, econômica e social (PARANÁ, 2018).

Para os efeitos desta Lei, entende-se por resíduos sólidos os materiais resultantes “de atividades humanas, agrícolas, pecuárias, industriais, comerciais, habitacionais, urbanas, de transporte, de compostagem e de prestação de serviços, dentre outras, nos estados sólidos ou semissólidos” (PARANÁ, 2018). A Lei define a destinação ou transferência de resíduos de um empreendimento para a biodigestão, com finalidade de gerar biogás ou biometano, como um método de destinação final adequada.

É importante ressaltar que, de acordo com o Capítulo IV – “Da Inovação Tecnológica”, empreendimentos que se enquadrarem nas disposições tratadas pela Lei 19.500/18 serão considerados empresas de inovação tecnológica, podendo ser beneficiados com concessão de incentivos fiscais, recursos financeiros, subvenção econômica, dentre outros benefícios.

Tais legislações reforçam como a premissa deste trabalho em estudar substratos para a AD e a consequente geração de biogás se enquadra e se mostra relevante com as leis brasileiras na busca de alcançar um gerenciamento adequado dos resíduos a fim de promover um desenvolvimento sustentável, econômico e social.

Ademais, a questão do setor da fruticultura como alvo para valorização de seus resíduos como substratos de uma AD ainda é reforçada com as diretrizes propostas pela “Agenda Estratégica da Fruticultura 2010-2015” (MAPA, 2011).

A seção de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) da Agenda Estratégica estabelece diretrizes para o “Programa Nacional de PD&I da Fruticultura”, sendo relevante o destaque para as diretrizes 7, 15 e 16:

- a) Diretriz 7: incorporar estudos relativos à sustentabilidade/equilíbrio ambiental;

- b) Diretriz 15: Contemplar biotecnologia;
- c) Diretriz 16: Contemplar estudos de resíduos.

Dessa forma, fica evidente a relevância desta pesquisa em alinhamento com tais diretrizes, que vão de encontro com os objetivos específicos de valorização de resíduos da fruticultura via tratamento de biodigestão. Na seção 2.3 será apresentado os processos de fabricação de sucos de fruta no Brasil e como o biogás pode se tornar um aliado na sua cadeia produtiva.

2.1.2 Gestão dos Resíduos Sólidos Orgânicos

O acúmulo descontrolado de resíduos ao redor do mundo tem causado diversos problemas à saúde humana e ao meio ambiente. Cerca de um terço da produção mundial de alimentos para o consumo humano se perde ao longo da cadeia de produção alimentar, ou seja, cerca de 1,7 bilhão de toneladas de alimentos (CHRISTO *et al.*, 2018). No geral, na maioria dos países, tais resíduos sólidos orgânicos (RSO) são destinados à aterros sanitários ou à incineração, no entanto, tais soluções se mostram como as opções menos sustentáveis para sua manutenção.

A destinação equivocada de resíduos para aterros sanitários leva à diversos problemas ambientais, tais como a produção de gases de efeito estufa, lixiviação e produção de maus odores. A incineração, por sua vez, pelo fato de os resíduos alimentares possuírem altos valores de umidade, leva à produção de dioxinas durante o processo devido à redução da temperatura nos fornos, causando poluição do ar proveniente de outros componentes do resíduo, tais como plásticos, e perda de propriedades químicas dos resíduos alimentares, fato que a torna uma opção ineficiente e de alto custo energético. Dessa forma, surge a necessidade do desenvolvimento e aplicação de tecnologias para o seu devido tratamento (TOJO *et al.* 2016).

No Brasil, providências já vem sendo tomadas com a Lei 12.305/10. Segundo o artigo 36, inciso V da PNRS, prevê-se a necessidade de implantar, pelos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, “sistemas de compostagem para resíduos sólidos orgânicos e articular com os agentes econômicos e sociais formas de utilização do composto produzido” (BRASIL, 2010).

De acordo com Kiran *et al.* (2014), os resíduos orgânicos, por apresentarem altos teores de nutrientes em sua composição, se tornam aptos a serem utilizados como fontes para a produção de biocombustíveis por meio de diversos processos de fermentação. Dessa forma, a valorização desses resíduos vem despertando maiores interesses ao redor do mundo, principalmente para a geração de biogás, etanol e biodiesel como produtos finais do tratamento dos mesmos.

A digestão anaeróbia, por se tratar de um tratamento de baixo impacto ambiental e que gera valiosos produtos, como o biogás, se mostra como uma excelente e promissora opção para o tratamento de resíduos orgânicos se comparada à outras opções (LEITE *et al.* 2014).

De acordo com Tojo *et al.* (2016), um estudo realizado em 2011 sobre as necessidades globais do futuro, os resíduos alimentares estão em terceiro lugar de um *rank* com 15 potenciais oportunidades de recursos a serem utilizadas como produtos valiosos. Os resíduos orgânicos possuem, no geral, altas quantidades de sólidos totais (ST), com correspondência de aproximadamente 90 % de sólidos voláteis (SV). São compostos por carboidratos de fácil degradação, proteínas e lipídeos. As proteínas possuem altos valores de nitrogênio, o que torna os resíduos orgânicos possuidores de uma baixa relação C/N quando comparados a outros substratos. Outra característica importante é a alta concentração de macronutrientes, como fósforo, potássio, sódio, cálcio ou magnésio, e a baixa concentração de oligoelementos, como ferro, selênio e níquel. Apesar da baixa relação C/N e da pouca quantidade de oligoelementos, fatores que devem ser otimizados/superados pelo processo, as características dos resíduos alimentares os tornam excelentes substratos para a digestão anaeróbia (TOJO *et al.*, 2016).

Com relação aos resíduos de frutas e verduras especificamente, o percentual de matéria orgânica nesses resíduos alcança o patamar de 87 % expresso em termos de SV, 75 % de açúcares, 9 % de material celulósico e 5 % de lignina (LEITE *et al.*, 2014).

Apesar do foco deste trabalho ser os resíduos orgânicos que podem existir provenientes de grandes geradores urbanos ou industriais, por se tratar de um setor que gera expressivas quantidades de resíduos de frutas e vegetais, vê-se importante destacar o setor agrícola e suas diferenças quanto aos resíduos orgânicos previamente apresentados. Manga, abacaxi, tomate, jaca, banana, laranja, dentre outros, consistem em alguns exemplos de uma parcela importante dos resíduos

agrícolas. Tais resíduos são provenientes do corte, descarte e outros tipos de manuseio das frutas e vegetais (HANSEN & CHEONG, 2019). A geração anual de tais resíduos é enorme e seu descarte em aterros também não é ideal, tornando-se uma preocupação ambiental, visto sua natureza perecível. Na Índia, por exemplo, a produção anual de resíduos de frutas e vegetais é de aproximadamente 5,6 milhões de toneladas, os quais são descartados por meio de despejo nos arredores das cidades de maneira inadequada (PATTANAIK *et al.*, 2019).

De acordo com Mortier *et al.* (2016), na maioria das colheitas agrícolas, apenas parte da planta que é colhida é utilizada como um produto para o mercado (exemplo: vegetais, frutas, grãos, entre outros). O restante pode ser aproveitado e valorizado em processos como a AD. Devido ao aumento na procura por energias renováveis e o grande potencial dos alimentos em serem reaproveitados em combustíveis, os resíduos agrícolas ganharam enorme interesse como substratos para produção de biogás e também podem proporcionar ganhos em outras atividades se corretamente tratados (CORDEIRO *et al.*, 2020).

Moustakas *et al.* (2019) alarmam que as unidades de tratamento via AD são categorizadas de acordo com sua capacidade, podendo ser de alta capacidade ou baixa capacidade, variando de acordo com a quantidade de resíduos requerida para cada situação. Segundo o autor, no geral, os diferentes tipos de resíduos agrícolas são coletados e tratados em unidades de alta capacidade, enquanto as unidades de baixa capacidade recebem gerações locais de resíduos. Nesse caso, as unidades de tratamento se estabelecem dentro de fazendas ou pequenas indústrias, com fins de autogerenciar seus próprios resíduos gerados. Tais cenários já vem ocorrendo em locais como Grécia, Dinamarca, Alemanha, Áustria e Suécia.

2.1.3

Formas de Tratamento de Resíduos Sólidos Orgânicos

Devido ao fato de os resíduos orgânicos apresentarem altos valores de umidade e serem putrescíveis, destiná-los para aterros ou incineração pode gerar sérios problemas ambientais com a emissão de gases de efeito estufa. Logo, tratamentos como a compostagem e a digestão anaeróbia se mostram mais atrativos.

A digestão anaeróbia (AD) consiste na principal tecnologia de tratamento estudada nesta pesquisa e será posteriormente detalhada na seção 2.4. A AD representa um sistema de tratamento biológico anaeróbio, ou seja, realizado por

micro-organismos sobre a biomassa em condições de ausência de oxigênio. Seus principais produtos são o biogás, que pode ser aproveitado e aprimorado obtendo características combustíveis, e o digestato, que pode ser reaproveitado com características de fertilizante (GROSSO, 2018).

Já o sistema de tratamento biológico aeróbio de resíduos orgânicos é denominado de compostagem, tendo o composto orgânico como seu principal produto. “O sistema de compostagem é uma das tecnologias de tratamento mais simples, com baixo teor de implantação e operação se comparada aos outros tratamentos” (BAPTISTA *et al.*, 2019, p. 60). Dependendo das características empregadas durante o processo de compostagem, é possível eliminar patógenos, sendo considerada uma alternativa sanitariamente eficiente. De acordo com Santos *et al.* (2014), além da vantagem da produção do composto, a compostagem também se mostra eficiente na diminuição de massa e na carga orgânica dos resíduos, ou seja, estabilização da massa orgânica. A compostagem tem se tornado cada vez mais popular pelo fato de reduzir consideravelmente o volume dos resíduos, além de convertê-los no composto, fertilizante natural para o solo (ZHOU *et al.*, 2020).

Quando a compostagem é comparada à AD, algumas diferenças principais devem ser levadas em consideração (GROSSO, 2018): a AD é mais cara; possui um balanço de energia positivo com a geração de biogás; tem maiores riscos (explosões, incêndios); além de deter um melhor balanço econômico (subsídios à energia elétrica a partir do biogás e à injeção na rede de biometano). Com relação às diferenças entre o digestato da AD e o composto resultante da compostagem, vale ressaltar que a estabilidade biológica é muito similar nos dois casos.

A incineração, por sua vez, consiste em um tratamento térmico controlado, recuperando poder calorífico dos resíduos e transformando-os em energia (BAPTISTA *et al.*, 2019).

Russo (2003) reforça que a principal vantagem da utilização da incineração como método de tratamento de resíduos sólidos é a redução dos volumes a serem dispostos em aterros, valor que pode chegar até 90 % do volume inicial.

Contudo, deve-se considerar que para manter o processo de queima completa com a menor emissão e geração de substâncias gasosas perigosas (como dioxinas, furanos entre outros), resíduos orgânicos com altos teores de umidade devem ser evitados. Ademais, existem métodos mais apropriados para este tipo de resíduo.

Com relação à disposição final em aterros sanitários, principal medida de gerenciamento de resíduos do Brasil, define-se:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário (ABNT NBR 8419:1992, p. 01).

Dessa forma, Baptista *et al.* (2019) afirmam que, em teoria, os aterros sanitários podem ser considerados como uma tecnologia de tratamento de resíduos já que agem de maneira ambientalmente correta considerando a premissa de que os processos físicos, químicos e biológicos que se sucedem em um AS ocorram de acordo com o projeto e de forma estável e ambientalmente correta para gerenciar os resíduos sólidos. Contudo, os autores reforçam que os aterros sanitários são estruturas que necessitam de correta manutenção e, caso mal operados, podem ocasionar diversos problemas ambientais como poluição dos recursos hídricos superficiais ou subterrâneos. “Além disso, pode haver carreamento de resíduos do aterro para locais de águas superficiais, como rios e lagos; transferência de gases gerados pela decomposição dos resíduos e que são solúveis na água” (BAPTISTA *et al.*, 2019, p. 63).

De acordo com Borba *et al.* (2018), a emissão do metano e do dióxido de carbono pelos aterros sanitários representa uma das mais importantes fontes de GEE (Gases de Efeito Estufa) em regiões metropolitanas. Segundo Bogner *et al.* (2008) *apud* Borba *et al.* (2018), a emissão do CH₄ no setor dos resíduos equivale a 18 % das emissões antropogênicas do gás em todo o mundo. “A estimativa é que sejam emitidas de 35 a 69 toneladas de CH₄ para a atmosfera por meio dos aterros sanitários” (BORBA *et al.*, 2018, p. 101).

Além disso, os autores reforçam que mesmo com as camadas de cobertura, que têm finalidade de conter a passagem de gases formados para a atmosfera, sua emissão é observada em diversos aterros.

Outro motivo consiste no fato de serem obras que não consideravam o máximo aproveitamento da matéria prima. Foram criados em 1912¹ na Inglaterra e,

¹ Britannica, 2020. *Sanitary Landfill*. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/sanitary-landfill>>. Acesso em: 29 de janeiro de 2020.

apesar de poderem ser considerados como tecnologias de tratamento, vale ressaltar que os aterros sanitários deveriam ser locais para disposição final de rejeitos.

De acordo com a *European Environmental Agency*, alguns países desenvolvidos da Europa proibiram o aterramento de resíduos caso estejam *in natura* ou sem prévio tratamento, ou implementaram uma proibição combinada com uma alta taxa a ser paga caso não respeitada a diretriz. Além disso, também ocorre uma redução gradual da proporção de resíduos descartados no aterro e mudanças das abordagens de gerenciamento de resíduos, em busca de alcançar uma economia circular por meio de políticas, instrumentos econômicos e subsídios para o desenvolvimento do setor de tratamento de resíduos (EEA, 2019).

Portanto, observa-se que esta forma de tratamento passou a ser considerada como uma forma de disposição de rejeitos. Assim, para um melhor aproveitamento da matéria prima, deve-se avaliar o tipo de resíduo, levando em consideração suas características físico-químicas e escolher uma outra tecnologia de tratamento que potencialize seu uso antes do descarte final.

De acordo com Schälch *et al.* (2002), vale ressaltar que essa escolha de um modelo de gerenciamento de resíduos sólidos exige o prévio conhecimento das diferentes formas de tratamento e destinação final de resíduos, e que um tratamento nunca se constitui de um sistema de destinação final ou definitivo, já que sempre há um remanescente inaproveitável. Contudo, suas vantagens tornam-se evidentes visto a necessidade de reduzir os danos que seriam causados com sua ausência.

Tais vantagens têm caráter principalmente ambiental e econômico, sendo este último principalmente relacionado com a redução de custos com a disposição final. Além disso, dentre outros fatores que são recomendados ao tratamento de resíduos pode-se citar: a escassez de áreas para a destinação final dos resíduos; valorização dos componentes do lixo; economia de energia; diminuição da poluição das águas e do ar; dentre outros (SCHALCH *et al.*, 2002).

É importante ressaltar que apesar de existirem diversos tipos de tratamentos de resíduos no mercado, não existe uma solução mais eficiente, e sim uma que se adeque melhor às condições econômicas e socioambientais da área de aplicação.

2.2 Digestão Anaeróbia e a Geração de Biogás

De acordo com Grosso (2018), digestão anaeróbia (AD – *anaerobic digestion*) é um processo microbiológico baseado na interação entre diferentes espécies de bactérias operando de forma simbiótica e interdependente em condições de ausência de oxigênio. As espécies de bactérias são classificadas de acordo com a temperatura de operação (mesofílicas entre 15 e 45 °C; e termofílicas entre 45 e 65-75 °C) e quanto ao metabolismo (bactérias anaeróbias facultativas – ocorrem nas primeiras etapas do processo, ou seja, hidrólise e acidogênese; e bactérias estritamente anaeróbias – ocorrem na metanogênese; etapas estas que serão posteriormente explicadas).

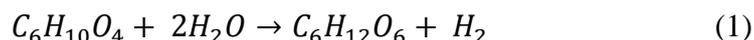
O processo se mostra como uma solução aceitável no gerenciamento de resíduos orgânicos pelo fato do mesmo ter a geração de biogás como um de seus produtos finais, junto com um digestato rico em nutrientes que pode ser utilizado como fertilizante para o solo (KIRAN *et al.*, 2014). Os principais fatores que influenciam na digestão anaeróbia são as características físicas e químicas do substrato, como umidade e quantidade de sólidos voláteis, respectivamente.

De acordo com Tojo *et al.* (2016), estudos recentes baseados em análises de ciclo de vida indicam a digestão anaeróbia como o tratamento mais indicado para resíduos alimentares dentre os demais métodos tradicionais por seu potencial de tratá-los de maneira ambientalmente eficiente e ao mesmo tempo produzir compostos extremamente valiosos.

2.2.1 Princípios da Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia se trata de um processo biológico que se dá em diversas etapas de degradação da matéria orgânica a fim de se produzir biogás e digestato, sob condições de ausência de oxigênio. Usualmente, o processo ocorre em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (TOJO *et al.*, 2016).

A primeira etapa, conhecida como hidrólise, é onde acontece a quebra dos orgânicos complexos, polímeros (carboidratos, lipídeos e proteínas), em orgânicos simples solúveis, monômeros (aminoácidos, monossacarídeos e enzimas). Um exemplo de reação da hidrólise é (BAJPAI, 2017):



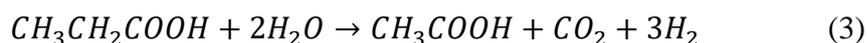
Em seguida, acontece a fermentação, também conhecida como acidogênese, etapa em que os monômeros produzidos pela hidrólise se convertem em produtos mais simples de baixo peso molecular, formando ácidos graxos voláteis, hidrogênio e dióxido de carbono (CO₂) (KUNZ *et al.*, 2019).

Esses micro-organismos são ambos anaeróbios obrigatórios e facultativos. As condições ótimas para essa etapa consistem nas bactérias produzirem principalmente ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono, usados diretamente como substratos por micro-organismos metanogênicos. Condições não adequadas da etapa (causadas por excesso de substrato e/ou presença de substâncias tóxicas) levam ao aumento da concentração de hidrogênio e a formação de intermediários como os VFAs (*Volatile Fatty Acids* – Ácidos Graxos Voláteis). Além disso, na etapa da acidogênese o pH tende a decrescer (GROSSO, 2018).

A reação exemplificativa da quebra da glucose em ácido acético diretamente é (GROSSO, 2018):



A acetogênese consiste na etapa em que os compostos gerados na acidogênese são oxidados e produzem acetato (ácido acético) e hidrogênio. Embora parte do ácido acético e do H₂ sejam produzidos diretamente da acidogênese, ambos são produzidos primariamente via acetogênese e desidrogenação (GROSSO, 2018). Nessa etapa, alguns produtos intermediários da fase anterior (VFAs), como o etanol, propionato, butirato, valerato e lactato, em baixa pressão do gás hidrogênio, são oxidados a acetato, havendo a formação de dióxido de carbono e hidrogênio, como demonstra a reação a seguir (OLIVEIRA, 2009):

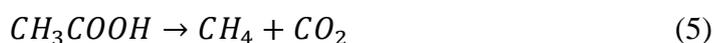
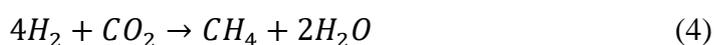


Finalmente, os produtos da acetogênese são então consumidos por bactérias metanogênicas, ou seja, micro-organismos que atuam sobre o dióxido de carbono, hidrogênio e acetato (produtos da acetogênese), transformando-os em metano no processo chamado de metanogênese (OLIVEIRA, 2009). Os micro-organismos

metanogênicos são obrigatoriamente anaeróbios, de crescimento lento e sensíveis às condições do ambiente (GROSSO, 2018).

Dentre todas as fases, a metanogênica é a mais sensível à variação dos fatores que influenciam a digestão anaeróbia, dentre os quais se podem destacar a quantidade de matéria seca (MS), a concentração de nutrientes, o pH, a temperatura interna do digestor, o tempo de detenção hidráulica (TDH), a concentração de sólidos voláteis (SV), a presença de substâncias tóxicas e a relação carbono/nitrogênio (OLIVEIRA, 2009, p. 22).

As principais reações de formação do metano são descritas a seguir segundo Oliveira (2009), apresentadas nas equações 4 e 5:



Segundo Hansen & Cheong (2019), a hidrólise de moléculas complexas é catalisada por enzimas extracelulares e, essencialmente, a estabilização da matéria orgânica (MO) não ocorre durante esta etapa, sendo a MO simplesmente convertida em uma forma solúvel capaz de ser utilizada pelas bactérias. Bajpai (2017) elucida que muitas vezes não é possível fazer uma distinção clara entre as etapas da acidogênese e acetogênese, já que em ambas pode-se gerar o acetado e o hidrogênio. Mortier *et al.* (2016), por sua vez, reforça que se as concentrações de H_2 forem muito elevadas, a acetogênese se torna energeticamente desfavorável para os microorganismos, fator que precisa ser levado em consideração. Além disso, o autor ainda detalha que durante a metanogênese, dois grupos de bactérias metanogênicas podem ser discernidos: as que geram CH_4 e CO_2 via degradação do acetado (produzem cerca de 70 % do metano total gerado) e as que geram CO_2 e H_2 (produzem cerca de 30 % do metano total gerado). A Figura 2.2 ilustra de maneira simplificada as etapas da digestão anaeróbia.

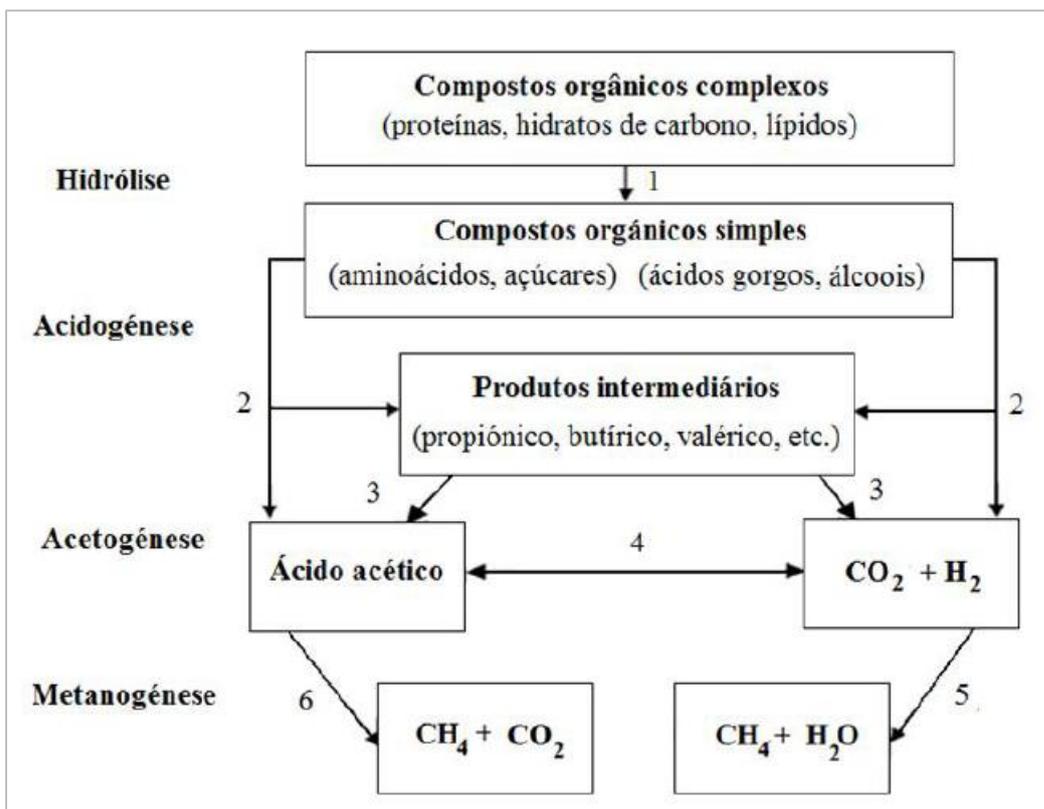


Figura 2.2: Processo simplificado da digestão anaeróbia
Fonte: Adaptado de Suárez (2014)

Na AD de compostos orgânicos complexos, tais como lignocelulósicos ou outros dificilmente biodegradáveis, a hidrólise é a etapa geralmente considerada como a etapa de limitação de velocidade do processo (MORTIER *et al.*, 2016).

De acordo com Tojo *et al.*, (2016), existe a possibilidade de a digestão anaeróbia ser interrompida após a fermentação (acidogênese), sendo este processo chamado de *dark fermentation*, o qual é eficiente caso a finalidade seja a valorização da biomassa para conversão em hidrogênio e ácidos graxos voláteis. Dessa forma, o processo metabólico pode ser conduzido para a produção de outros compostos além do biogás, como etanol e lactato.

Com relação ao substrato, segundo Raposo *et al.* (2012), sabe-se que a biodegradação anaeróbia de um substrato se relaciona com a sua composição. Dessa forma, para dar seguimento com um ensaio BMP, por exemplo, é necessário descobrir primeiramente as características do substrato em questão, como teor de umidade, teor de sólidos totais e teor de sólidos voláteis.

2.2.2 Codigestão Anaeróbica

De acordo com Alves (2016), a codigestão anaeróbica consiste na mistura de dois ou mais substratos com características complementares e mostra-se como uma opção viável para aumentar a produção de metano. Lucena (2016), reforça que a utilização de inóculos na codigestão de resíduos sólidos se mostra de extrema relevância para a otimização do processo de digestão anaeróbia tendo em vista que, pelo fato dos resíduos orgânicos serem rapidamente hidrolisados, os mesmos formam solúveis orgânicos que podem ser convertidos em ácidos graxos e favorecer a acidificação do reator. Dessa forma, a codigestão surge como uma técnica para evitar que essa acidificação aconteça.

O cosubstrato conduz à uma digestão mais estável e melhorias no rendimento de biogás já que pode fornecer nutrientes que estejam deficientes. Segundo Lucena (2016), a codigestão proporciona melhorias da estrutura física do substrato, densidade microbiana, aumento do percentual de umidade, redução do tempo de degradação, aumento da produção de biogás, melhoria da relação C/N e da nutrição do meio.

O inóculo fornece uma comunidade microbiana que é capaz de digerir a matéria orgânica e atua assim no processo inicial de biodegradação das moléculas orgânicas. Comumente, utiliza-se lodos de estações de tratamento de águas residuárias, esterco animal e resíduos biológicos como inóculos (SOUZA, 2020). Além disso, de acordo com Lucena (2016), a adição de lodo de esgoto também vem sendo muito utilizada na codigestão com resíduos orgânicos devido o aporte de nitrogênio que contribui para uma melhor relação C/N, promoção da elevação do pH e por fornecer massa bacteriana ao meio. No Brasil, esta codigestão é ainda mais atrativa visto a grande quantidade de lodo que é produzido nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE).

Segundo a autora, a relação substrato/inóculo é considerada um elemento fundamental para a otimização do processo e prevenção do acúmulo de ácidos graxos voláteis. Souza (2020) reforça que a complexidade da interação entre os substratos e o inóculo aumenta conforme o conteúdo sólido a ser digerido e a quantidade de inóculo deve ser suficiente para superar a acidificação inicial e evitar o acúmulo dos ácidos graxos voláteis.

Segundo Alves (2016), os resíduos de fruta, por apresentarem altas quantidades de matéria orgânica facilmente biodegradável, são ideais para serem misturados com os lodos de esgoto. De um modo geral, a codigestão de lodos com os resíduos sólidos orgânicos apresenta diversas vantagens, dentre elas o aumento da produção de biogás, principal produto da digestão anaeróbia.

2.2.3 Configurações da Digestão Anaeróbia

Kiran *et al* (2014), reforçam a importância da configuração do processo para a eficiência da produção de metano ao longo da digestão anaeróbia. O processo em fase única é amplamente utilizado no tratamento de RSO. Em uma digestão anaeróbia de fase única, todas as reações (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) acontecem simultaneamente em um mesmo reator, o que implica em menos falhas técnicas e um menor investimento financeiro para o seu funcionamento.

Diferente do processo em fase única, a digestão anaeróbia em dois estágios faz uso de dois reatores para a produção de hidrogênio e metano separadamente. De acordo com Kiran *et al.*, (2014), no primeiro reator, micro-organismos de rápido crescimento produzem hidrogênio e ácidos graxos (processo de hidrólise e acidogênese). Já no segundo reator ocorre a metanização, ou seja, micro-organismos de lento crescimento são formados, transformando os ácidos graxos em metano e dióxido de carbono.

A digestão anaeróbia pode ser úmida, em que o substrato é utilizado da forma em que é recebido; ou seca, em que se reduz a quantidade de água até aproximadamente 12 % dos sólidos totais. “Comparado à digestão anaeróbia úmida, o processo seco produz uma menor quantidade de metano [...] por outro lado, a estabilidade do digestor em processo de fase única é superior” (KIRAN *et al.*, 2014, p. 08). A Figura 2.3 compara lado a lado as diferenças entre um processo seco e um úmido. É importante ressaltar que em ambos os processos o digestato resultante deve sofrer uma compostagem aeróbia para que se torne apto a ser aproveitado para usos agrícolas.

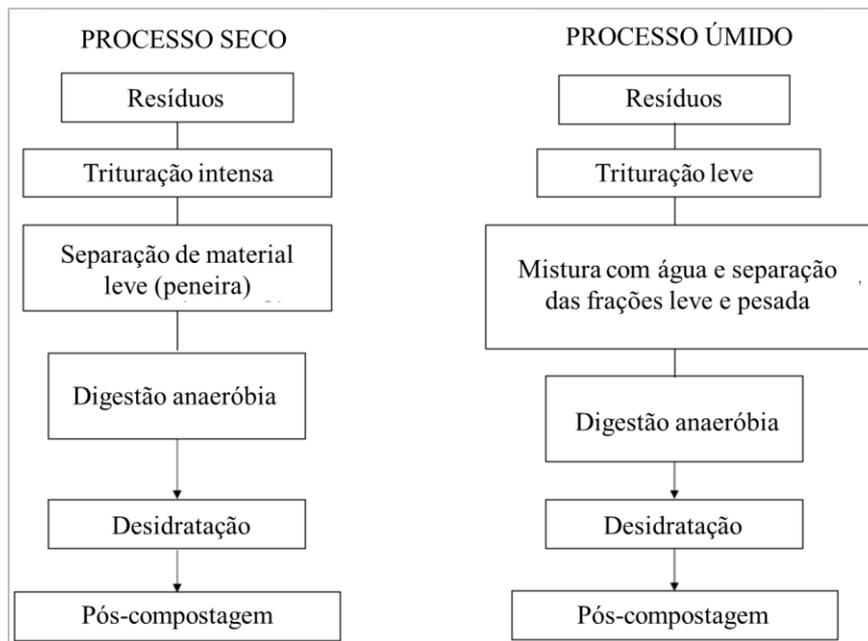


Figura 2.3: Comparação digestão anaeróbia seca e úmida
Fonte: Adaptado de Grosso (2018)

Em adição, de acordo com Kunz *et al.* (2019), a AD pode ser realizada via processos contínuos ou processos descontínuos, também conhecidos como processos em “batelada”. Os processos contínuos são aqueles em que há a alimentação do reator em intervalos regulares com a respectiva retirada do material digerido em quantidades correspondentes. Já nos processos em batelada, os reatores são carregados com material fresco, utiliza-se uma pequena proporção de material digerido e em seguida os reatores são fechados. É importante ressaltar que o processo em batelada é necessariamente um processo seco, enquanto o processo contínuo pode ser tanto seco quanto úmido (massa seca inferior a 12 % a 15 %), sendo o processo úmido realizado em uma ou duas etapas (RICO *et al.*, 2020).

2.2.4 Fatores que Influenciam no Processo de Digestão Anaeróbia

De acordo com Kunz *et al.*, 2019, a atividade metabólica das bactérias durante a digestão anaeróbia depende de diversos fatores, com isso, para um ótimo processo de fermentação, múltiplos parâmetros devem ser considerados e controlados. Dentre os parâmetros mais relevantes no processo de AD, destacam-se:

- a) **temperatura:** Os processos mesofílicos são aqueles que operam num intervalo de temperatura entre 15 e 45 °C, enquanto os processos termofílicos 45 e 65 - 75 °C (GROSSO, 2018).

A estabilidade da temperatura é de extrema importância para o processo, dado que muitos micro-organismos apenas podem sobreviver em intervalos restritos de temperatura, em torno de +/- 2 °C do valor pretendido, sendo, em geral, os valores ótimos mais comuns 37 °C para o processo mesofílico e 55 °C para o termofílico.

Segundo Kunz *et al.* (2019), o aumento da temperatura traz inúmeros benefícios ao processo, incluindo aumento na solubilidade de compostos orgânicos e melhora na velocidade de reações bioquímicas, além de aumentar a taxa de eliminação de patógenos. Contudo, temperaturas excessivas podem levar a um efeito inibitório para os micro-organismos, já que à medida que a temperatura aumenta, o equilíbrio químico é deslocado formando a amônia, que é tóxica às arqueas metanogênicas (KUNZ *et al.* 2019). A velocidade de AD é maior em temperaturas termofílicas em comparação às mesofílicas e, no geral, processos termofílicos geram cerca de até 15 % mais biogás do que os mesofílicos para os mesmos tempos de retenção, contudo, o processo termofílico apresenta altos custos relativos ao aquecimento, superiores aos mesofílicos (ARAÚJO, 2017).

Oliveira (2009), reforça que com o funcionamento na faixa de temperatura adequada, o volume do biodigestor pode ser reduzido pela metade ou menos para o mesmo volume de gás produzido, o que possibilita uma economia de material na construção dele, ou caso seja desejado, produzir mais gás com um volume pré-estabelecido. Apesar da formação de metano poder ocorrer em condições extremas de temperatura entre 0-97 °C, em um processo anaeróbio, o mais importante é “manter uma temperatura constante dentro do reator, devido, principalmente, ao fato de que as bactérias metanogênicas são mais sensíveis a variações bruscas de temperatura” (OLIVEIRA, 2009, p. 25).

- b) **nutrientes:** segundo Oliveira (2009), o conhecimento da composição química e o tipo de biomassa utilizada são extremamente importantes. A presença de alguns macronutrientes (Nitrogênio, Fósforo e Potássio, por exemplo) e alguns micronutrientes (Níquel, Cobalto, Ferro e Selênio, por exemplo) são indispensáveis para o desenvolvimento das bactérias

metanogênicas e também para todo tipo de processo microbial. Os nutrientes e traços de metais necessários para o processo anaeróbio são muito pequenos, sendo que apenas entre 4 – 10 % da DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) removida se converte em biomassa (GROSSO, 2018);

- c) **substâncias tóxicas/inibidoras:** substâncias inibidoras são, no geral, a principal causa de falhas em reatores anaeróbios, já que estão presentes em concentrações relevantes nos lodos. Segundo Grosso (2018), uma substância é considerada inibidora quando influencia na população microbiana ou inibe o desenvolvimento das bactérias. A inibição normalmente se indica por um decaimento na taxa de produção de metano e acumulação de ácidos orgânicos.
- d) **relação carbono/nitrogênio (C/N):** segundo Oliveira (2009), esta relação se trata de outro parâmetro diretamente relacionado ao desenvolvimento do processo biológico da fermentação. Kunz *et al.* (2019) a define como a relação entre a massa de carbono orgânico disponível e a massa de nitrogênio a ser reduzido na desnitrificação, fator este que mede a disponibilidade de carbono orgânico em determinado efluente.
- e) **pH:** segundo Kunz *et al.* (2019), os micro-organismos metanogênicos têm um intervalo de pH ótimo compreendido entre 6,7 - 7,5, enquanto as bactérias fermentativas (ou acidogênicas) têm um intervalo favorável de 4,0 - 8,5. Oliveira (2009) afirma que o ponto ideal de operação se encontra em torno do pH 7,0.
- Grosso (2018) reforça que valores baixos de pH reduzem a atividade metanogênica causando acumulação de VFAs e H₂. Sob uma pressão parcial de H₂ muito elevada, haverá a inibição das bactérias responsáveis por degradar o ácido propiônico, causando um excesso de peso molecular dos VFAs e uma maior queda o pH e, caso a situação não seja resolvida, o processo pode falhar. Como forma de remediar tal caso e ajustar o pH pode-se utilizar substâncias como NaHCO₃ (Bicarbonato de sódio), NaOH (Hidróxido de sódio), Na₂CO₃ (Carbonato de sódio), CaO (Óxido de cálcio), Ca(OH)₂ (Hidróxido de cálcio), CaCO₃ (Carbonato de cálcio) e NH₃ (Amoníaco).
- f) **ácidos graxos voláteis (*Volatile Fatty Acids* – VFA):** “a maioria dos problemas na digestão anaeróbia pode ser atribuída ao acúmulo de VFA’s e, conseqüentemente, a queda de pH” (KUNZ *et al.*, 2019, p. 22). Em baixos

valores de pH, os principais ácidos voláteis são os ácidos acético e butírico, enquanto em pH's próximos a 8,0, os principais são os ácidos acético e propiônico.

- g) **agitação:** a presença de um sistema de agitação acrescenta custos de implantação e manutenção, mas auxilia na transferência de calor e mantém os sólidos em suspensão, melhorando o contato entre a matéria orgânica e os micro-organismos. A utilização de um sistema de agitação adequado implica em um ganho de 15 a 30 % na produtividade de biogás (KUNZ *et al.* 2019).
- h) **taxa de carregamento orgânico (*Organic Loading Rate – OLR*):** também conhecida como “carga orgânica volumétrica” (COV), representa a quantidade de substrato adicionado ao biodigestor em um determinado intervalo de tempo. De acordo com Kunz *et al.* (2019), esta taxa influencia toda a dinâmica do processo de AD. Se a COV foi adequada, haverá uma maior estabilidade no processo e, no caso de COV's baixas, a consequência são baixas atividades biológicas. A COV ideal é relacionada ao modelo de biodigestor, tecnologia aplicada e ao tipo de substrato.
- i) **tempo de retenção hidráulico do reator (*Hydraulic Retention Time – HRT*):** “é o tempo médio em que o substrato permanece no interior do biodigestor, ou seja, é a razão entre o volume do biodigestor e a vazão de alimentação” (KUNZ *et al.*, 2019). Já Oliveira (2009) define o tempo de retenção hidráulica como o período em que o material permanece dentro do biodigestor, ou seja, tempo entre a entrada do efluente e a saída do afluente do digestor;
- j) **teor de sólidos voláteis (SV):** a determinação da concentração de SV é de fundamental importância no processo da AD visto que eles são fermentados para produzir o biogás, ou seja, quanto maior a concentração de SV na biomassa, maior será a produção de gás (OLIVEIRA, 2009).

Vale ressaltar também que, no caso de substratos de difícil biodegradabilidade, um pré-tratamento se mostra necessário devido ao alto conteúdo de estruturas complexas como a lignocelulose. Os pré-tratamentos podem ser de origem física, físico-química, química ou biológica (PATTANAIK *et al.* 2019).

2.2.5 Biogás

Segundo Pattanaik *et al.*, (2019), biocombustível é o combustível derivado de organismos vivos, como plantas e micro-organismos. Biocombustíveis, gerados por recursos naturais, podem ajudar a reduzir os gases de efeito estufa e, conseqüentemente, ajudar a manter um bom equilíbrio de carbono na atmosfera.

O biogás é um exemplo de biocombustível e, de acordo com o autor, suas principais vantagens frente o gás natural são os fatos de ser produzido por fontes naturais e ajudar a reduzir a emissão dos gases de efeito estufa.

No Brasil, o uso energético do biogás vem sendo realizado há pelo menos 40 anos, quando foi integrado no modelo da “revolução verde”, na década de 1970. Atualmente, o Brasil tem 123 usinas de biogás operantes que destinam seu uso para a produção de energia térmica, elétrica, mecânica e produção de biometano/GNV (KUNZ *et al.*, 2019).

De acordo com Oliveira (2009), o biogás foi um gás descoberto no século XVIII por Alessandro Volta, passando a ser produzido em larga escala em biodigestores na China e Índia a fim de suprir as necessidades energéticas da zona rural. Diferente do álcool da cana de açúcar, o biogás não compete por espaço em outras culturas e, dessa forma, não coloca a produção de alimentos em risco.

Segundo o autor, o biogás pode ser obtido a partir de resíduos agrícolas, excremento de animais e do Homem e do lixo urbano (em que em sua maioria é composto de resíduos orgânicos alimentares), este último sendo comumente captado nos aterros sanitários de grande parte dos países desenvolvidos e nas cidades brasileiras que implantaram a tecnologia, apesar da mesma não ser a tecnologia de tratamento ideal para receber este tipo de resíduo.

De acordo com Gomez (2013), o biogás se trata de uma fonte de energia versátil: o biogás produzido por meio de substratos através da digestão anaeróbia é a única fonte energética renovável no presente que se mostra como uma alternativa viável ao gás natural, a qual pode ser utilizada para todas as mesmas finalidades que o mesmo, além da mesma infraestrutura para tal.

Um fato que deve ser observado é que grande parte da energia armazenada na biomassa é perdida para a atmosfera na forma de gases e de calor, através do processo de decomposição. Toda matéria viva, após a morte, é decomposta por micro-organismos (bactérias). Durante esse processo de decomposição, as bactérias retiram

da biomassa parte das substâncias de que necessitam para a manutenção da sua sobrevivência e, em contrapartida, lançam na atmosfera gás e calor. Esse gás é o chamado biogás, uma fonte de energia abundante, não poluidora e barata (OLIVEIRA, 2009, p. 07).

O biogás é uma mistura gasosa constituída principalmente por metano (CH₄), sendo este o fator chave da sua composição que determina a quantidade de energia do mesmo, seguido pelo dióxido de carbono (CO₂) como segundo componente principal, além de outros gases em concentrações menos significantes (PATTANAIK *et al.*, 2019), como indica a Tabela 2.1. Neste também apresenta a faixa proporção em que usualmente estão presentes.

Tabela 2.1: Componentes do biogás

Componente	Teor
CH ₄	55-70% (v/v)
CO ₂	30-45% (v/v)
H ₂ O	1-5% (v/v)
N ₂	0-2% (v/v)
H ₂ S	0-2000 ppm
NH ₃	0-100 ppm
Siloxanos	0-50 mg/m ³
Benzeno, tolueno, etilbenzeno, xileno e cumeno	< 1 mg/m ³
Clorina, fluorina e mercaptanos	< 0,1 mg/m ³

Fonte: Adaptado de Deublein & Steinhauser (2008).

Oliveira (2009) reforça que a utilização desse gás em larga escala permitiria que a humanidade reduzisse o consumo de petróleo, “sendo que essa redução somada à não emissão direta na atmosfera do biogás se tornariam ferramentas contra o combate à emissão de gases de efeito estufa e, conseqüentemente, mitigadoras do aquecimento global” (OLIVEIRA, 2009, p. 07).

De acordo com Gomez (2013), o biogás pode ser aprimorado em biometano (alcançado quando a proporção dos componentes apresenta aproximadamente 98 % de metano) dentro das plantas de tratamento de biogás, permanecendo com as mesmas características do gás natural. Após convertido em biometano, o mesmo pode ser utilizado em aplicações similares a do gás natural, como o abastecimento veicular, eletricidade e calor, o que o torna extremamente importante no contexto de abastecimento de energia sustentável.

O autor reforça que, além disso, após um processo de retirada do enxofre e secagem, o biogás pode ser convertido em energia e calor dentro de unidades de cogeração (CHP – *Combined Heat and Power*) ou convertido em apenas calor por meio da sua queima. O autor afirma ainda que o biogás pode também substituir compostos de carbono em produtos plásticos. Sua principal finalidade gira em torno da produção de energia e calor em ciclos combinados, aproveitamento em caldeiras ou a injeção em redes de gás natural e a produção de combustíveis para veículos. A energia produzida pelo biogás pode ser utilizada para a própria instalação industrial, tornando-a autossustentável, além de aquecer o digestor anaeróbico ou ser vendida à rede distribuidora elétrica.

O tratamento ou purificação do biogás é um processo determinante para a sua utilização como fonte de biocombustível (KUNZ *et al.*, 2019). A Figura 2.4 ilustra como se dá o aproveitamento energético do biogás de acordo com a concentração de metano no mesmo e os pós-tratamentos a fim de se obter o produto desejado:

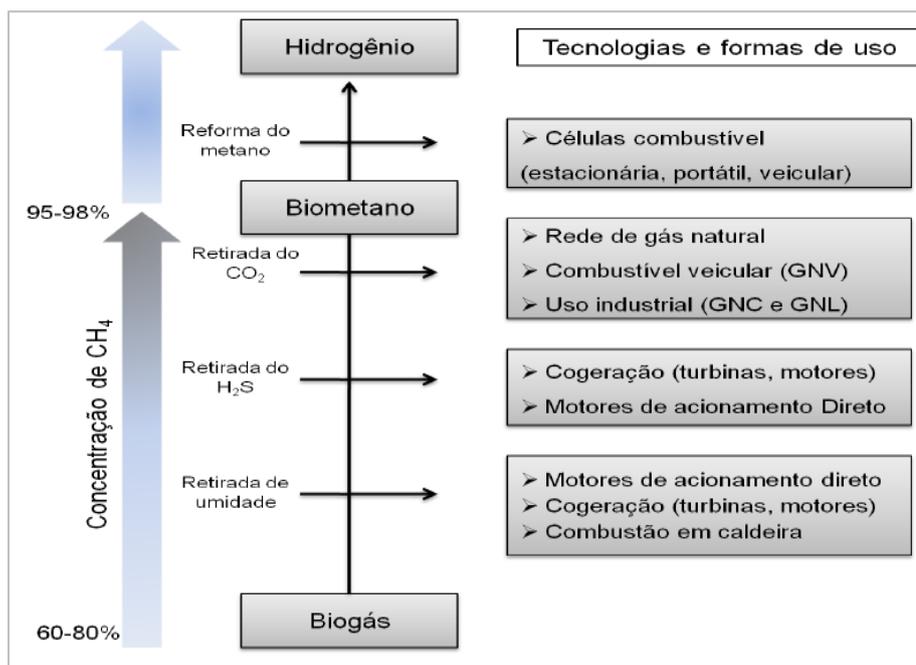


Figura 2.4: Aproveitamento energético do biogás
Fonte: Machado (2016)

De acordo com Kunz *et al.* (2019), dentre os principais contaminantes que afetam o potencial energético do biogás, destacam-se o sulfeto de hidrogênio (H_2S), o dióxido de carbono (CO_2) e a amônia (NH_3). O processo de remoção de H_2S e umidade se chama dessulfurização e deve ser realizado tendo em vista que o H_2S é extremamente tóxico e, caso seja inspirado em certas quantidades, causa

sufocamento interno. Além disso, a partir de concentrações de 50 mg/l ele passa a inibir a ação das bactérias metanogênicas (MACHADO, 2016). O H₂S pode ser removido por meios físicos (adsorção com o uso de adsorventes, lavadores com água pura, membranas seletivas, separação criogênica), químicos (oxidação térmica, oxidação catalítica, ozonização, absorção com substâncias químicas) ou biológicos (biofiltro, biopercolador, biolavador, tratamento com lodo ativado) (SZARBLEWSKI *et al.*, 2012). Já a retirada de CO₂ pode ser feita com dois processos com membranas: a permeação através de membranas, ou contactores com membranas, ambas com o objetivo de purificar o gás a fim de aumentar o poder calorífico específico (MJ/Nm³) e remover componentes que possam danificar sistemas de aproveitamento energético (CERVEIRA, 2016).

De acordo com Lima & Passamani (2012), 1 m³ de biogás equivale a: 0,55 L de diesel; 0,61 L de gasolina; e 0,45 kg de gás liquefeito de petróleo (GLP); o que torna o biogás um produto com diversas opções para aproveitamento, demonstrando o quão versátil ele pode ser e como o mesmo pode ser valioso para cenários futuros, como demonstra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Equivalência do biogás com outros combustíveis

Biogás	Diesel	Gasolina	GLP	Eletricidade
1 m ³	0,55 L	0,61 L	0,45 kg	6,9 kWh

Fonte: Adaptado de Lima & Passamani (2012)

2.3

A Fruticultura e os RSO Gerados do Processos de Fabricação de Sucos

O Brasil, depois da China e Índia, detém a posição de terceiro maior produtor frutícola mundial. O agronegócio frutícola no Brasil desenvolve-se em, aproximadamente, 2 milhões de ha (hectare) comerciais, de um total de cerca de 388 milhões de ha disponíveis, gerando um PIB de quase US\$ 2,2 bilhões (NEVES, 2016).

De acordo com Neves (2016), o segmento da fruticultura representa cerca de 25 % do valor na produção agrícola e está entre os principais geradores de renda, de empregos e de desenvolvimento rural no Brasil. Apesar de ser o terceiro maior produtor de frutas do mundo, o Brasil ocupa o décimo quinto lugar com relação à exportação de frutas, enviando cerca de 2,5 % do volume que produz (SANTOS *et*

al., 2018), o que demonstra que o país não apenas se mostra como um grande produtor como também um grande consumidor.

Segundo Santos *et al.* (2018), a globalização e o aumento no intercâmbio comercial entre os países impulsionaram a produção mundial de frutas e, conseqüentemente, levaram à adoção de novas tecnologias que permitam sua melhor conservação.

Contudo, como consequência do aumento produtivo, o incentivo ao consumo no setor resulta em elevadas quantidades de resíduos orgânicos, o que contribui para o aumento dos impactos ambientais. Dessa forma, o investimento em inovação tecnológica com vistas à energia renovável apresenta-se como um processo eco inovativo viável para o aproveitamento de tais resíduos (DONADON & SANTOS, 2018).

As frutas cítricas consistem em uma parcela da fruticultura que gera grandes quantidades de resíduos. Um dos motivos para tal se deve a uma prática denominada “raleio”, que consiste na retirada e descarte de parte de frutos verdes para melhorar a qualidade final dos frutos remanescentes. Já no processamento, como na remoção do suco, praticamente 50 % do fruto é considerado subproduto (PEREIRA *et al.*, 2018).

Para esta pesquisa, a fruta objeto de estudo foi a tangerina, mais especificamente as cascas do tipo “Ponkan” e “Montenegrina”. As tangerinas representam o segundo maior grupo de cítricos produzido no Brasil, apenas atrás da laranja (BRACKMANN *et al.*, 2007).

2.3.1 Frutas Cítricas e a Tangerina

O Brasil se destaca como o maior produtor mundial de frutas cítricas. Segundo um estudo do IBGE de 2018, aproximadamente 997 mil toneladas de tangerinas são colhidas anualmente no país (IBGE, 2018). Só no Rio Grande do Sul são produzidas, anualmente, 131 mil toneladas, ocupando a escala de 4º maior produtor do país (PEREIRA *et al.*, 2018).

A tangerina do tipo “Ponkan” é originária da Ásia, sendo o grupo mais cultivado dentre as tangerinas e mais comum na China, Japão, Filipinas e Índia. No Brasil, o tipo “Ponkan” é o mais popular, são frutos de árvores de porte médio, com crescimento ereto, produtivo, porém com tendência a apresentar alternância na

produção. Algumas características marcantes da tangerina “Ponkan” são o fato de serem frutas grandes, de maturação meia-estação, com casca solta e sabor bastante doce, o que os torna muito apreciados para consumo *in natura* (Pio *et al.*, 2006).

De acordo com Brackmann *et al.* (2007), a tangerina do tipo “Montenegrina”, também conhecida como “Mimosa”, ocupa a terça parte da área plantada com tangerineiras no Rio Grande de Sul, Estado que ocupa o posto de segundo maior produtor dessa fruta. A tangerineira “Montenegrina” possui sabor e aroma agradáveis, de grande aceitação pelo consumidor, além de outras características tais como polpa firme, fácil descascamento e boa conservação.

Segundo Belo *et al.* (2018), as cascas das frutas cítricas, como a tangerina, também são de extrema relevância e, segundo a ISO 14.000, devem passar por um processo de gerenciamento de resíduos adequados após o seu uso. Isso se dá, pois, alguns compostos presentes na casca dessas frutas apresentam características antibactericidas, antifungos, antioxidantes, inseticidas e até atividades anti-inflamatórias, o que transforma tal resíduo em uma matéria-prima de alto interesse para a indústria farmacêutica na elaboração de drogas medicinais.

De acordo com Pereira *et al.* (2018), os citrus possuem compostos bioativos principalmente na casca dos frutos. Dessa forma, resíduos citrus podem ser reaproveitados com finalidades distintas. No caso da laranja e da tangerina, por exemplo, pelo seu alto teor de umidade, parte do seu resíduo gerado pode ser destinado para ração animal. Outro destino possível seria para extratos alcoólicos para conservação de alimentos, tornando-se alternativas na sua desinfecção e conservação. Além disso, as frutas cítricas são uma importante fonte de compostos bioativos como os fenólicos, flavonoides e vitamina C, que podem ser aproveitados para redução na incidência de doenças cardíacas, redução no risco de desenvolvimento de câncer gastrointestinal, melhora do perfil lipídico do sangue, da pressão arterial e absorção de cálcio (PEREIRA *et al.*, 2018).

Dessa forma, resíduos de cascas de frutas cítricas podem se tornar uma alternativa produtiva de renda tanto para os produtores quanto para as indústrias interessadas, além da redução de resíduo industrial gerado. Portanto, Belo *et al.* (2018, p. 103) mencionam que “a tendência para reaproveitamento total de resíduos é um fator cada vez mais necessário na indústria moderna em todo o mundo”.

2.3.2 Processo de Fabricação de Sucos

Dentre os países que produzem frutas tropicais, o Brasil apresenta condições climáticas extremamente favoráveis para tal produção. Sá & Caixeta-Filho (2002), elucidam que o semiárido brasileiro registra uma ocorrência de cerca de três mil horas de sol por ano, o que facilita e agiliza o processo de produção de frutas na região.

De acordo com informações de uma empresa de grande porte do setor, as grandes empresas adquirem seus sucos e polpas oriundos de frutas plantadas em diversas regiões do país, sendo então o transporte e a logística fundamentais para o bom funcionamento do processo. Depois que uma fruta está madura ela passa por alguns procedimentos (que serão descritos a seguir) e, ao final, se tem a polpa. É importante ressaltar que cada fruta tem seu ciclo e suas peculiaridades durante o processo produtivo (DEL VALLE, TM, 2015).

Com relação ao processo produtivo de sucos para empresas de grande porte, as frutas passam separadamente por diversos processos de limpeza antes de se tornarem o produto que será utilizado na fabricação dos néctares da empresa. Esse processo ocorre de maneira automatizada com a utilização de máquinas. As frutas que chegam pelos caminhões são descarregadas em esteiras, caem em tanques de limpeza, passando por uma lavagem com água e seguindo para um processo manual de descarte de qualquer fruta que não se enquadre nos padrões de qualidade desejados, ou seja, que estejam apodrecidas e/ou danificadas pelo transporte. Em seguida as frutas passam por uma lavagem final e então entram no processo de extração da polpa, também realizado por máquinas, o qual expele o suco de dentro da fruta e o transporta por uma tubulação, abastecendo os tanques de armazenamento. É feita uma homogeneização do produto, a coleta de amostra e testes para verificação se o suco está de acordo com a especificação para posterior envio para a pasteurização e envase. Esse processo de produção é feito a partir da mistura da fruta e seus componentes, esterilização através de um pasteurizador, que faz com que a temperatura do produto se eleve até um determinado nível que garanta que ele esteja esterilizado. A pasteurização preserva a integridade da bebida, não necessitando a adição de conservantes artificiais para os sucos naturais. Finalmente, ocorre o processo de envase, ou seja, colocação do suco nas devidas

embalagens para dar início ao processo de comercialização (DEL VALLE, TM, 2015).

Após o término dessa etapa do processo, a polpa, suco ou suco concentrado ainda passam por um laboratório de alta tecnologia para realização de testes finais de qualidade.

Com relação a esse controle de qualidade, as amostras do suco são enviadas ao laboratório para garantir as propriedades da matéria prima antes de chegar na fábrica. As amostras chegam no laboratório e são acondicionadas em uma câmara fria, com temperatura controlada, para depois serem direcionadas nas diversas áreas do laboratório. Cor, textura, sabor, dentre outras características, são avaliados nessa análise de qualidade do suco antes de ir para a embalagem.

Após as amostras serem devidamente testadas e aprovadas no laboratório, elas chegam até a fábrica, lugar onde todos os sucos e ingredientes chegam para formar o produto final que é distribuído pelo país.

A Figura 2.5 abaixo ilustra de maneira geral as etapas do processo de produção de sucos, no caso para a laranja, realizado pelas empresas no Brasil.

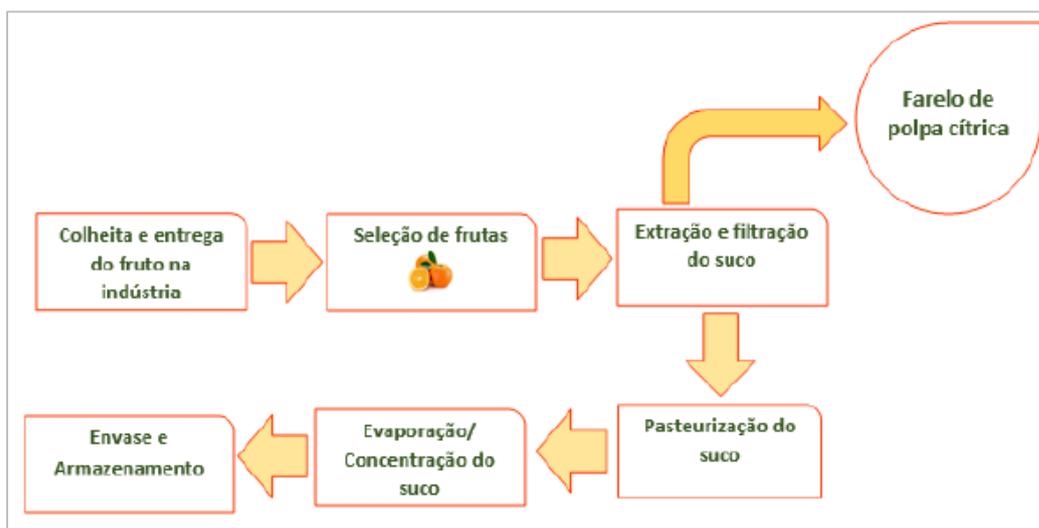


Figura 2.5: Etapas do processo de produção de sucos de laranja
Fonte: Cypriano *et al.*, 2017

Já no caso de empresas de pequeno porte e/ou empreendimentos em que o suco natural é produzido e rapidamente vendido para o consumidor, a produção do suco é um processo mais simples.

Como exemplo, o processo de produção dos sucos de um supermercado do Rio de Janeiro, que se dá por meio da destinação das frutas em uma máquina da marca “Zummo” que realiza todo o processo em três etapas de maneira vertical e

automatizada: as frutas são despejadas no topo da máquina, passando por uma seção de esmagamento a qual retira a maior parte do suco e corta a fruta ao meio; em seguida, na seguinte etapa, um par de hélices realiza um segundo esmagamento, retirando mais suco e separando o bagaço; por fim, a última etapa consiste em um recipiente que recebe o suco pronto para o consumo e na destinação do bagaço para um compartimento abaixo da máquina e posterior recolhimento/descarte. A Figura 2.6 apresenta a vista frontal do equipamento.



Figura 2.6: Equipamento para extração de sucos naturais

É importante ressaltar também que, no caso de pequenas empresas, o processo é mais simplificado, desde a coleta das frutas pelos fornecedores que, no geral, são feitas de maneira manual ou com pequenas máquinas, diferente do que acontece com as grandes empresas e fornecedores que tem o processo completamente realizado por máquinas de grande porte. O processo de seleção e limpeza das frutas segue de maneira similar para os dois tipos de produção, no entanto, as empresas que vendem o suco natural não passam por processos de pasteurização e evaporação, pulando diretamente para o envase após o esmagamento das frutas em

máquinas maiores, porém semelhantes à exibida pela Figura 2.6. A grande diferença no resultado desses sucos é o período de validade dos mesmos, que, no processo natural não dura mais do que três dias sob refrigeração.

Tendo em vista os dados apresentados nesta seção, é possível avaliar que o processo de fabricação de sucos, principalmente o realizado por empresas de grande porte, por requererem a utilização de maquinário ao longo de todo o processo, exigem grandes quantidades de energia para abastecimento do sistema.

2.3.3 Benefícios do Aproveitamento de Biogás para o Processo de Fabricação de Sucos

O biogás é o principal produto da digestão anaeróbia (AD), podendo ser aproveitado como fonte de energia sustentável e que tem potencial para trazer diversos benefícios ao setor da fruticultura com a produção de sucos naturais, isso porque resíduos de frutas consistem em bons substratos na alimentação de reatores anaeróbios (SITORUS *et al.*, 2013).

Durante o processo de fabricação de sucos, desde a colheita até o envase, é natural que ocorram perdas ao longo da cadeia produtiva. Cypriano *et al.*, (2017), cita o exemplo da laranja, em que aproximadamente 50 % da fruta é descartada na forma de bagaço (composto de casca, semente e polpa), após a extração do seu suco.

Fica evidente que este bagaço pode ser utilizado na obtenção de produtos de maior valor agregado. De acordo com Christo *et al.* (2018), em países em desenvolvimento, mais de 40 % das perdas de alimentos ocorrem na etapa de pós-colheita e processamento. Segundo o autor, tendo-se em vista o grande aumento populacional, uma consequência para os próximos anos é um aumento no consumo *per capita* de eletricidade, tornando-se necessário uma busca de produção de energia elétrica de modo alternativo aos combustíveis fósseis.

É o caso de energia derivada da biomassa, também chamada de bioenergia, sendo a única fonte de energia renovável que pode ser fornecida como combustível sólido, gasoso ou líquido (CREUTZIG *et al.*, 2015), podendo ser utilizada na geração de força motriz, de eletricidade e de calor (CHRISTO *et al.*, 2018, p. 73).

O Brasil, por sua vez, como grande produtor agrícola, gera expressivas quantidades de biomassa resultantes da colheita e processamento de produtos de diversos setores, como a fruticultura. Dessa forma, o reaproveitamento da biomassa

remanescente desses processos para a produção de biogás se mostra como um processo viável para, além de evitar o acúmulo de resíduos, contribuir e reforçar na construção de um modelo de produção estilo *cradle-to-cradle* (“do berço ao berço”) para os produtores agrícolas, eliminando a ideia de geração de lixo, visto que os recursos são geridos de forma circular de criação e reutilização, dando um “novo berço”, ou um novo destino, aos resíduos (McDonough & Braungart, 2002).

O processo produtivo para a fabricação de sucos abre diversas oportunidades para a instalação de biodigestores e adoção da digestão anaeróbia como técnica de tratamento dos resíduos orgânicos gerados. No caso da laranja, por exemplo, “o Brasil é o maior produtor de laranja no mundo e gera, anualmente, cerca de dez milhões de toneladas de resíduos que são subutilizados” (CYPRIANO *et al.*, 2017, p. 176).

Os resíduos orgânicos alimentares, em especial as frutas, são excelentes substratos para o processo de digestão anaeróbia e, tendo em vista as grandes quantidades de perdas ao longo do processo, podem ser utilizados como valiosos aliados para as empresas quanto ao abastecimento energético e gerenciamento de resíduos.

Wikandari (2014) reforça que aproximadamente 50 % das frutas terminam como resíduos da produção. Com dados de 2012, o autor calculou, estimadamente, que dos 804,4 milhões de toneladas de frutas produzidas no respectivo ano, 402,2 milhões de toneladas representariam resíduos de frutas, que poderiam ser convertidos em um valor em torno de $32 \times 10^9 \text{ Nm}^3$ de biogás. Se esta quantidade de biogás proveniente de resíduos de fruta fosse posteriormente utilizada como combustível, seria equivalente a 20,8 bilhões de litros de gasolina (WIKANDARI, 2014).

De acordo com Salazar (2014), em quase todos os processos da indústria de alimentos e bebidas são necessários água quente ou vapor, gerado em caldeiras, além do uso de equipamentos de refrigeração e secadores. O autor reforça que o principal uso da eletricidade para o setor de alimentos e bebidas é a força motriz, seguida pela refrigeração.

Em relação ao consumo de energia elétrica no setor de bebidas, os produtos que requerem maiores consumos específicos para a sua fabricação são os sucos e o concentrado de laranja (SALAZAR, 2014). Nota-se então que utilizar os resíduos de fruta como substratos em um tratamento adequado, como a AD, e a consequente

geração do biogás, poderiam ajudar nas demandas energéticas do próprio setor de fabricação de sucos. Pelos dados apresentados até então, percebe-se que os grandes geradores, tanto urbanos quanto industriais/agrícolas, poderiam fortemente se beneficiar com um aproveitamento do biogás em sua cadeia produtiva para ajudar no abastecimento energético do processo, oriundo dos seus próprios resíduos da produção.

A Tabela 2.3 compara algumas características das tangerinas “Ponkan” e “Montenegrina”, as quais serão estudadas a seguir nesta pesquisa para a avaliação do potencial de biogás gerado através de um ensaio BMP.

Tabela 2.3: Comparação das Propriedades Tangerina “Ponkan” e “Montenegrina”

Propriedades	Tangerina "Ponkan"	Tangerina "Montenegrina"
pH	4,17	3,03
Vitamina C (%)	24,28	37,9
Sólidos Solúveis	10,06	11,33
Atividade Antioxidante Total - μM sulfato ferroso g^{-1}	9,98	10,66
Rendimento do Suco (%)	35,78	44,58

Fonte: Adaptado de Belo et al., 2018

O potencial do uso do biogás gerado a partir do reaproveitamento de cascas de tangerina pode ser estimado a partir de informações acerca da quantidade de resíduos disponíveis para seu reaproveitamento. Embora pouca informação sobre qual quantia esteja disponível, de acordo com dados da prefeitura do Ehime, cidade japonesa que produz a maior quantidade de resíduos cítricos no Japão (JFS, 2010), a cidade produz cerca de 310.000 t/ano de tangerinas, sendo dessas, aproximadamente 40.000 t/ano destinadas para a produção de sucos e, cerca de 20.000 t/ano de tangerina sobram como resíduos dessa produção (JFS, 2010).

Ademais, segundo informações apresentadas por Eloá *et al.* (2018), em geral 58 % de uma unidade de fruta cítrica representa a casca e 12 % as sementes, sendo o restante a polpa. Dessa forma, estima-se que das 20.000 t/ano de resíduos da cidade de Ehime, 58 %, ou seja, 11.600 t/ano, são cascas de tangerina oriundas do processo produtivo dos sucos.

A partir dessa quantidade, e tendo-se em vista que as características físicas dessa tangerina devem ser conhecidas, poderia ser calculado uma estimativa de geração de biogás para esta cidade e, conseqüentemente, realizar uma equivalência energética para se estimar a quantidade de energia (kWh/ano) que poderia ser produzida exclusivamente a partir de resíduos de cascas de tangerina.

Ainda que tal exemplo seja relacionado à geração de resíduos em uma cidade, a mesma lógica pode ser empregada para empresas de sucos, permitindo ter-se uma ideia da estimativa de biogás em cada empreendimento, beneficiando-os com a utilização de uma energia limpa e autossustentável proveniente da sua própria produção.

Contudo, a sazonalidade da produção das frutas deve ser levada em consideração tendo-se em vista um maior rendimento anual para produção de biogás. Brackmann *et al.* (2007) afirmam que um armazenamento refrigerado (AR) é a alternativa utilizada para prolongar o período de oferta dos frutos cítricos na entressafra. Segundo o autor, o AR reduz a desidratação e a ocorrência de podridões, mas pode causar distúrbios fisiológicos. A intensidade de tais danos varia de acordo com a temperatura de armazenamento e com o período de exposição. Controlar a umidade relativa (UR) do ar interior da câmara é outro fator de suma importância para a conservação das frutas durante o AR.

Tais técnicas servem como artifícios para a boa manutenção da qualidade das frutas, contudo, dados do “Centro de Apoio e Promoção da Agroecologia” expõem que, para o ano de 2019, dentre as diversas espécies de tangerinas coletadas no RS (dentre elas a “Ponkan” e a “Montenegrina”), ocorre uma safra entre os meses de março e novembro na região de Pelotas (RS). Já as laranjas têm sua colheita entre os meses de abril e janeiro na mesma região (CAPA, 2019).

Dessa forma, tais informações demonstram que o setor de cítricos apresenta uma safra alongada durante praticamente o ano inteiro, fato este que valoriza e reforça seu potencial para a destinação à tratamento via AD e geração de biogás, já que o abastecimento dos biodigestores não seria prejudicado por falta de substrato em períodos de entressafra.

3 Materiais e Métodos

3.1 Preparação do Substrato

A avaliação e caracterização do potencial de geração de biogás provenientes de resíduos de casca de tangerina do tipo “Ponkan”, cujo nome científico é *citrus reticulata blanco* (Figura 3.1) e do tipo “Montenegrina”, também conhecida como “Mimosa”, cujo nome científico é *citrus deliciosa tenore*, foram realizadas no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente (LGMA) da PUC-Rio através do ensaio BMP (*Biochemical Methane Potential*), o qual será descrito posteriormente na seção 3.3, sendo realizado conforme a norma alemã DIN 38414, parte 8.

A coleta do substrato da casca de tangerina “Ponkan” se deu por meio da compra das tangerinas, onde as cascas foram separadas e armazenadas em geladeira. Para a obtenção dos resíduos de tangerina “Montenegrina” utilizados nesta pesquisa, foi contatado o Supermercado Zona Sul, mais especificamente a unidade de Ipanema, localizada na Rua Visconde de Pirajá, no. 118, Rio de Janeiro, na qual o gerente se disponibilizou a ajudar a pesquisa fornecendo restos de tangerina utilizados para a elaboração dos sucos naturais da unidade. Tais resíduos foram devidamente coletados e armazenados em geladeira.

Após a coleta das cascas (Figura 3.1), estas foram submetidas a um processo de trituração a fim de reduzir o tamanho do material e obter uma massa homogeneizada. A Figura 3.2 ilustra o equipamento utilizado para a trituração dos resíduos de casca de tangerina, bem como o resultado do processo até o alcance da massa homogênea.

Com os resíduos de casca de tangerina devidamente triturados, foi possível realizar as medições referentes às propriedades como sólidos totais, sólidos voláteis e umidade, como será descrito posteriormente na seção 3.2.1.



Figura 3.1: Casca de tangerina tipo "Ponkan"



Figura 3.2: Processo de trituração do substrato
A) multiprocessador de alimentos, B) casca fatiada, C) casca triturada

A quantidade de resíduos de casca de tangerina como também do lodo anaeróbico utilizados no ensaio BMP foi então calculada com base na norma alemã VDI 4630, a qual rege ensaios relacionados à fermentação de matéria orgânica, caracterização de substratos, amostragem, entre outros.

3.2 Caracterização do Substrato

Previamente ao início do ensaio BMP, devem ser avaliadas as propriedades físicas do material a ser estudado. Para isso, utilizou-se a infraestrutura do LGMA para realização de ensaios como o de teor de umidade (w), sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV) das cascas das tangerinas, por meio do uso de equipamentos como estufa, mufla e balança de precisão. Tais informações são essenciais para a avaliação do potencial de geração de biogás do substrato.

3.2.1 Determinação do Teor de Umidade

Para a determinação do teor de umidade da casca de tangerina do tipo “Ponkan”, assim como a do tipo “Montenegrina”, realizou-se o procedimento adotado pela norma brasileira NBR 6.457/86 (ABNT, 1986). As amostras, previamente trituradas e homogeneizadas, da casca de tangerina foram separadas e alocadas em cadinhos de porcelana. Os cadinhos foram pesados (primeiramente vazios e depois com o substrato em estado natural, ou seja, úmido) e destinados à estufa sob temperatura de 110 °C, a fim da secagem da amostra até a obtenção de uma massa constante e seca.

Após 2 dias na estufa, os cadinhos foram retirados e pesados novamente para a obtenção da massa de substrato seca, ou em outras palavras, o material foi seco até obter-se a constância de massa. Com esses dados, foi possível utilizar a equação 6 para cálculo da umidade com base no peso seco:

$$w = \frac{M_i - M_f}{M_f} * 100 \quad (6)$$

onde w é o teor de umidade (%); M_i é a massa do resíduo no estado inicial, ou seja, úmido (g); e M_f é a massa do resíduo após a secagem, ou seja, seco (g). A Figura 3.3 ilustra a estufa utilizada para a obtenção do teor de umidade.



Figura 3.3: Estufa à 110 °C utilizada na determinação da umidade da tangerina

3.2.2 Determinação do Teor de Sólidos Totais

A partir das pesagens realizadas para a determinação do teor de umidade, pode-se determinar, complementarmente, o teor de sólidos totais da amostra, o qual será utilizado como base para o posterior cálculo do teor de sólidos voláteis. Realizou-se o procedimento adotado pela norma brasileira NBR 10.664 (ABNT, 1989). Tal procedimento é semelhante ao anterior, contudo, para o cálculo utiliza-se a Equação (2):

$$St = \frac{Pf}{Pi} * 100 \quad (7)$$

onde St é o teor de sólidos totais (%); Pf é a massa de solo seco (g) na estufa à 110 °C; e Pi é a massa de solo úmido (g).

3.2.3 Determinação do Teor de Sólidos Voláteis

De acordo com Abreu (2014), o teor de sólidos voláteis fornece uma aproximação grosseira da quantidade de matéria orgânica presente na fração sólida do resíduo e, por isso, é utilizado no controle de plantas de tratamento biológico.

A determinação desse parâmetro foi baseada na metodologia *WHO (Standard Methods 2540G)*. A massa remanescente da determinação de ST e teor de umidade

foi reintroduzida em uma mufla, sob a temperatura de 550 °C, durante 5 horas, onde o substrato, devido a calcinação, transforma a matéria orgânica em cinza.

O teor de sólidos voláteis foi calculado a partir da equação 8:

$$SV = \frac{P_1 - P_f}{P_1} * 100 \quad (8)$$

onde *SV* é o teor de sólidos voláteis (%); *P₁* é a massa inicial da amostra seca em estufa à 110 °C (g); e *P_f* é a massa final da amostra queimada em mufla à 550 °C (g). A Figura 3.4 abaixo mostra a mufla utilizada para a obtenção dos resultados.



Figura 3.4: Mufla à 550 °C utilizada para a determinação de SV

3.3 Ensaio do Potencial Bioquímico de Metano (BMP)

De acordo com Lucena (2016), o ensaio BMP consiste em um método capaz de avaliar a biodegradabilidade dos resíduos através da geração de biogás. Sendo também um método de determinação da estabilização da matéria orgânica.

Apesar de ainda não ser internacionalmente normatizado, o ensaio é um método analítico de referência quando se trata da obtenção de maiores detalhes sobre a transformação de materiais orgânicos em metano. Pelo fato de o processo ocorrer sob condições ótimas de degradação, pode ser considerado um processo de digestão anaeróbia acelerado.

Para o presente ensaio, a metodologia adotada é denominada GB₂₁ e foi padronizada na Alemanha (DIN 38414, parte 8). O ensaio foi realizado no equipamento confeccionado por Abreu (2014). Recomenda-se a consulta ao trabalho de Abreu (2014) para os detalhes da montagem do equipamento.

A seguir serão descritos os procedimentos tanto para a montagem quanto para a execução do ensaio no equipamento desenvolvido por Abreu (2014).

3.3.1 Eudiômetro

O eudiômetro, de acordo com Abreu (2014), se trata de um instrumento de laboratório indispensável para a realização do ensaio BMP para medição de variação do volume de gás gerado. O instrumento possui uma de suas extremidades fechadas e a outra aberta para o enchimento de algum fluido, sendo a extremidade aberta imersa nesse fluido. “Os gases produzidos por uma reação são deslocados e borbulham no interior do recipiente com o fluido, o que promove uma variação no nível deste fluido no tubo eudiométrico” (ABREU, 2014, p. 164). A Figura 3.5 ilustra o tubo eudiométrico descrito pela norma alemã DIN 38414, parte 8.

O frasco representado pela letra A é um frasco reagente com capacidade volumétrica de 500 mL. O tubo eudiômetro (B) tem capacidade de 300 a 400 mL, com diâmetro de 30 a 35 mm, e escala de medição a cada 5 mL. O tubo C é o tubo interno ao B, com diâmetro de 6 mm. O marco zero do tubo B é representado pela letra D. A letra E representa os pinos de fixação do tubo C. F é o tubo de conexão. A letra G representa o frasco de nível com capacidade de pelo menos 750 mL e H é uma válvula (ABREU, 2014, p. 165).

A partir da norma alemã DIN 38414, parte 8, Abreu pôde confeccionar um aparelho com sua configuração própria, e que foi utilizado para a elaboração deste ensaio com a casca de tangerina, como é apresentado na Figura 3.6. Para este projeto, a capacidade do volume do tubo eudiométrico foi de 400 mL, com uma junta macho do tipo rolha para a conexão com o frasco N°40/45. Utilizou-se um tubo de material flexível para a conexão, de silicone, com diâmetro interno de 6 mm e externo de 10 mm, espessura de 2 mm, sendo estável à temperatura de -20 °C a 200 °C. O frasco G foi feito com modificações do frasco de laboratório DURAN, com tampa de rosca azul de capacidade volumétrica de 1000 mL, onde foi inserido uma saída lateral inferior para o tubo de borracha, proporcionando uma melhor vedação nessa conexão vidro/silicone.

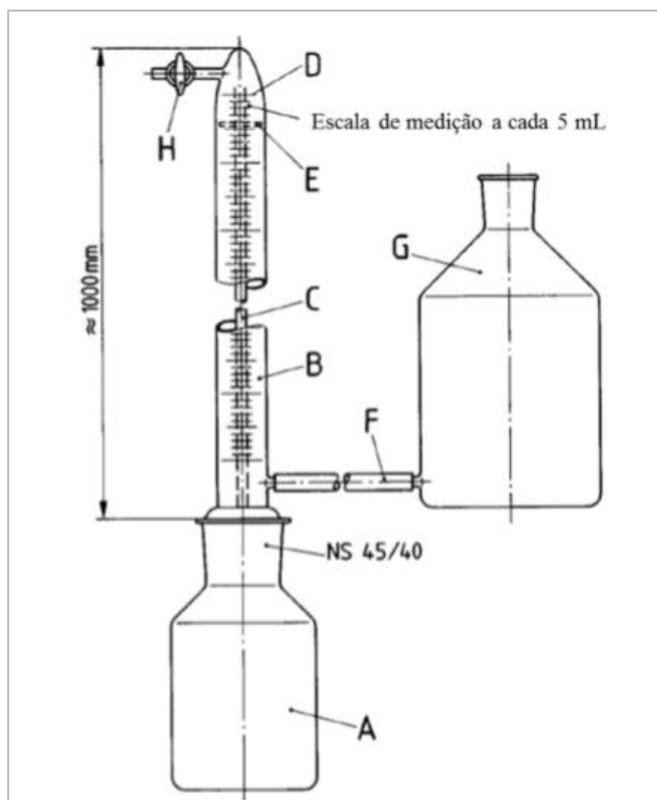


Figura 3.5: Tubo eudiométrico segundo a norma DIN 38414, parte 8
Fonte: Abreu (2014)

Conforme a norma DIN 38414, parte 8, a temperatura no frasco reagente foi mantida constante e foi submetido à um banho-maria com termostato e agitação interna da marca Ethik Technology, modelo 500-1D, sob temperatura regulada de 35 ± 1 °C. Utilizou-se duas tampas de isopor como material isolante com objetivo de proporcionar um ambiente escuro para os micro-organismos, isolando os frascos da iluminação da sala com o objetivo de manter a temperatura estável, evitando perdas de calor com o exterior.

Para a leitura da variação volumétrica de gases dentro do tubo eudiométrico, utilizou-se um líquido selante que sofre movimentação no tubo pelo gás produzido, condicionado à premissa dos gases não se solubilizarem. A norma DIN 38414, parte 8, propõe uma solução selante composta por 200 g de sulfato de sódio decahidratado ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$), 30 ml de ácido sulfúrico p.a. (H_2SO_4 com peso específico igual a 1,84 g/ml) para um volume de 1000 ml, completados com água destilada. Para o presente ensaio, no entanto, foi utilizado o sulfato de sódio anidro (Na_2SO_4), com correção estequiométrica da solução, substituindo os 200 g de sulfato de sódio decahidratado por 87,64 g de sulfato de sódio anidro conforme descrito por Abreu (2014).

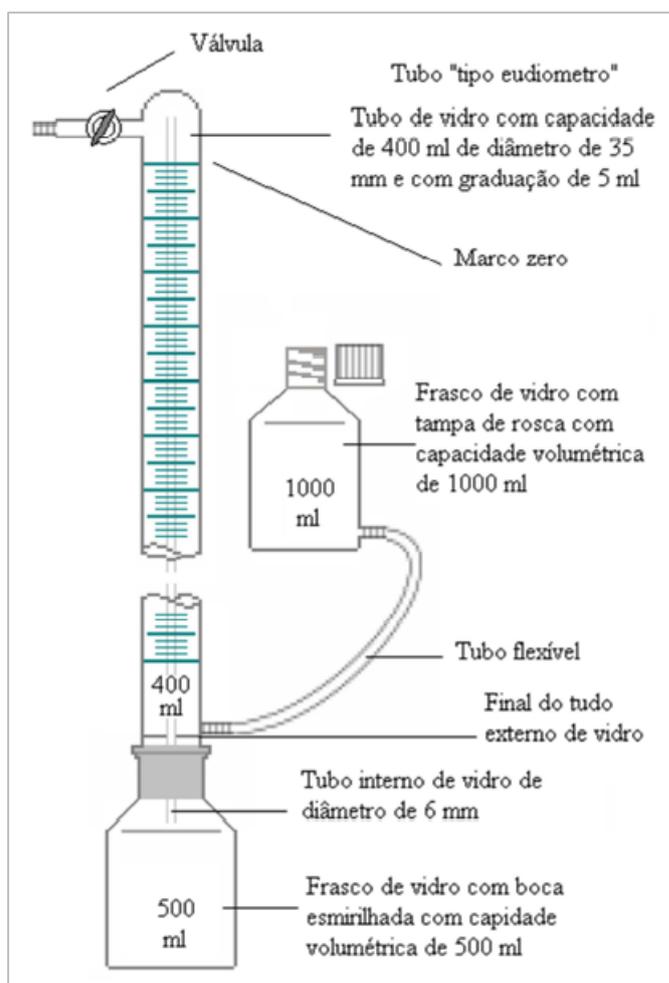


Figura 3.6: Tubo eudiométrico utilizado no ensaio
Fonte: Abreu (2014)

A utilização dessa solução ácida como selante é necessária a fim de evitar que haja solubilização de gases como o CO_2 , que também faz parte do gás formado, diminuindo o valor do biogás medido.

Segundo Abreu (2014), o funcionamento deste equipamento é regido por dois princípios: a Lei de Stevin, também conhecida como o princípio dos vasos comunicantes, e a Lei de Boyle-Mariotte.

Em relação ao primeiro princípio, a válvula no topo do tubo externo é aberta para a atmosfera assim como o frasco reagente que também está aberto para a atmosfera, promovendo um equilíbrio de nível do líquido selante. Dessa forma, a solução selante, presente em ambos os recipientes, estará em um mesmo nível, ajustando este nível para ser a leitura “zero”. Após o ajuste deste “zero” a válvula é fechada. O segundo princípio é referente ao deslocamento da solução selante que o biogás formado promove. O volume de solução selante deslocado é o mesmo volume de biogás gerado. Cada vez que o líquido atinge a marca dos 400 mL no tubo graduado, a válvula é aberta para que o fluido selante deslocado reingresse no tubo e, com isto, o sistema retorne ao equilíbrio e a leitura seja mais uma vez zerada (ABREU, 2014, p. 170).

3.3.2 Montagem do ensaio

O principal objetivo do ensaio do potencial bioquímico do metano é o de determinar o potencial de produção de biogás a partir da decomposição de amostras de material orgânico. No presente estudo foram utilizadas cascas de tangerina do tipo “Ponkan” e do tipo “Montenegrina”, respectivamente, em dois ensaios distintos. A metodologia adotada para esse fim é denominada GB₂₁, padronizada na Alemanha pela norma DIN 38414, parte 8.

O ensaio se deu em duas triplicatas, uma das triplicatas com a mistura do lodo com a casca de tangerina como substratos, e a outra triplicata com apenas o lodo como substrato. Para a determinação da quantidade de substrato e de lodo a serem utilizadas no ensaio, seguiu-se a norma VDI 4630, relacionada à fermentação de matéria orgânica, caracterização de substratos e amostragens, em que as seguintes restrições devem ser seguidas:

- a) para prevenir a inibição da fermentação, o substrato não deve ultrapassar a seguinte proporção apresentada conforme a equação 9:

$$\frac{ST_{substrato}}{ST_{lodo}} \leq 0,5 \quad (9)$$

- b) o rendimento de produção de gás do substrato deve ser no mínimo 80 % do total de gás gerado;
- c) a quantidade de sólidos totais não deve ultrapassar 10 % para garantir uma transferência de massa adequada.

Baseado nas restrições e nas características físico-químicas do resíduo foi calculado a massa de substrato e a quantidade de lodo anaeróbico para a digestão. Dessa forma, para a tangerina “Ponkan”, foram adicionados 10 g de substrato para 390 mL de lodo, enquanto para a tangerina “Montenegrina”, os valores foram de 12 g e 388 mL, respectivamente. Já nos frascos contendo apenas lodo anaeróbico, o valor adicionado foi de 400 mL para ambos os testes. A Figura 3.7 ilustra o processo de preparo das amostras nos frascos a fim de serem acoplados ao eudiômetro para dar início ao processo.



Figura 3.7: Preparo da mistura substrato-lodo para digestão anaeróbia
 A) da esquerda para a direita: triplicata de frascos reagente com somente substrato e triplicata de frascos reagente com somente lodo anaeróbico; B) inserção de lodo anaeróbico ao substrato; C) triplicada de frascos reagentes com mistura substrato-lodo

Com os substratos devidamente alocados em seus frascos, pôde-se dar seguimento aos procedimentos com a medição do pH através do pHmetro de bancada Edge, da marca Hanna. (Figura 3.8). É importante ressaltar que durante todo o ensaio, só é possível medir o pH antes e após o ensaio terminar, ou seja, vinte e um dias depois do início do ensaio, pois após o acoplamento do tubo eudiométrico ao frasco reagente, o conjunto não permite medições contínuas do pH durante o processo.

Finalmente, antes de ser levado ao eudiômetro, equipamento responsável pela medição da variação do gás, descrito anteriormente na seção 3.2.2 deste trabalho, e tendo em vista que a digestão anaeróbia se dá através da ação de bactérias anaeróbicas, ou seja, que necessitam de um ambiente ausente de oxigênio para existirem, realizou-se a extração do mesmo de dentro dos frascos através da adição de nitrogênio gasoso, o que conduz a criar um ambiente anaeróbio para a degradação do substrato. Essa adição foi realizada no laboratório por meio de um cilindro de gás nitrogênio comprimido (N_2), como ilustra a Figura 3.9. Por diferença de pressão, a entrada do nitrogênio dentro do frasco faz com que o oxigênio seja expulso.

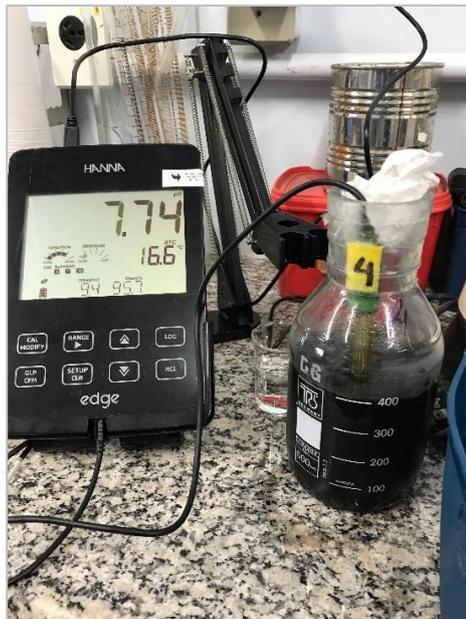


Figura 3.8: Medição do pH



Figura 3.9: Cilindro de gás nitrogênio utilizado para retirada do oxigênio

Após a adição do nitrogênio gasoso, os frascos são finalmente acoplados ao eudiômetro, dando início ao processo de digestão anaeróbia e às medições diárias da geração de gás para validação do ensaio e análises futuras sobre o potencial gerador de biogás dos resíduos de casca de tangerina. A Figura 3.10 ilustra o sistema completo do equipamento utilizado para o ensaio BMP para análise do potencial de geração de biogás através da digestão anaeróbia da casca de tangerina.



Figura 3.10: Equipamento do LGMA para realização do ensaio BMP

4 Resultados e Discussões

Neste capítulo, são apresentadas as discussões relacionadas aos resultados obtidos pelos ensaios de potencial bioquímico de metano da casca da tangerina do tipo “Ponkan”, assim como a do tipo “Montenegrina”. Também será apresentada uma discussão dos resultados, comparando-os com outros resultados encontrados na literatura relacionados à outras frutas e seus potenciais de geração de gás.

4.1 Propriedades Físicas das Tangerinas

Como foi descrito na seção 3.2 deste trabalho, a determinação das propriedades físicas do substrato a ser avaliado é fundamental para a análise no ensaio BMP. A seguir serão apresentadas as tabelas referentes aos ensaios para determinação do teor de umidade, sólidos voláteis e matéria orgânica dos dois tipos de tangerinas estudados.

4.1.1 Tangerina “Ponkan”

Seguindo a norma brasileira NBR 6457 (ABNT, 1986), com a formulação apresentada conforme a seção 3.2.1, para a determinação do teor de umidade, verifica-se que, para três repetições da casca de tangerina “Ponkan” avaliadas, o teor de umidade médio alcançou o valor de 304,9 %.

Foram determinados valores de 24,7 % de ST e os resultados encontrados apontam para uma média de 98,5 % de SV presentes na casca de tangerina “Ponkan”. A Tabela 4.1 apresenta os resultados da “Ponkan”, referente aos dados de entrada e saída para o ensaio BMP.

Com relação aos dados de saída do ensaio BMP, após o término do ensaio, determinou-se as propriedades físicas da mistura (lodo + casca da tangerina já digerida) em cada frasco, como também apresenta a Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Resultados das Propriedades Físicas da “Ponkan”

Parâmetros	Entrada	Saída	Diferença
w (%)	304,9	3717,6	-3412,7
ST (%)	24,7	2,6	22,1
SV (%)	98,5	54,5	44,0

Ainda que a mistura apresente um maior teor de umidade devido à presença de água no lodo anaeróbico utilizado, fica claro a redução dos teores de ST e SV, decorrente da degradação da casca da tangerina durante o ensaio BMP.

4.1.2 Tangerina “Montenegrina”

Similarmente, para as cascas da tangerina do tipo “Montenegrina” foram determinados os mesmos parâmetros notando valores ligeiramente superiores do teor de umidade (316,4 %) mas com valores ligeiramente inferiores para os teores de ST e SV (24 e 96,6 % respectivamente) em relação aos encontrados para a “Ponkan”. Com relação aos dados de saída do ensaio BMP, após o término do ensaio, determinou-se as propriedades físicas da mistura (lodo + casca da tangerina já digerida) em cada frasco, como também apresenta a Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Resultados das Propriedades Físicas da “Montenegrina”

Parâmetros	Entrada	Saída	Diferença
w (%)	316,4	3785,8	-3469,5
ST (%)	24,0	2,6	21,4
SV (%)	96,6	55,4	41,2

Percebe-se um comportamento similar ao da casca da tangerina “Ponkan”, com reduções dos valores de ST e SV e grande aumento do teor de umidade pela presença de água no lodo. Além disso, nota-se que os valores de ST e SV de entrada da “Montenegrina” são levemente inferiores quando comparados à “Ponkan”, fato que influencia no potencial de geração de biogás a ser analisado.

4.2 Resultados do Ensaio BMP

4.2.1 Tangerina “Ponkan”

Com relação ao primeiro ensaio BMP, obteve-se os seguintes resultados com relação à geração de gás acumulado no período de vinte e um dias, como representa a Figura 4.1. Os dados de entrada e saída (posterior ao período de vinte e um dias de ensaio) estão apresentados na Tabela 4.3. Nota-se que, dentro das condições ensaiadas, o pH final da solução mantém-se acima de 7, o que indica que a solução com a casca de tangerina “Ponkan” não acidificou.

Tabela 4.3: Dados do ensaio BMP da casca da tangerina “Ponkan”

Dados de Entrada	Dados de Saída	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Massa de substrato (g)	-	10	9,99	10,01	-	-	-
Massa de lodo (mL)	-	390	390	390	400	400	400
pH inicial do lodo	-	-	-	-	7,74	7,74	7,74
pH inicial da solução	-	7,59	7,59	7,59	-	-	-
-	pH final da solução	7,30	7,28	7,30	7,46	7,45	7,47

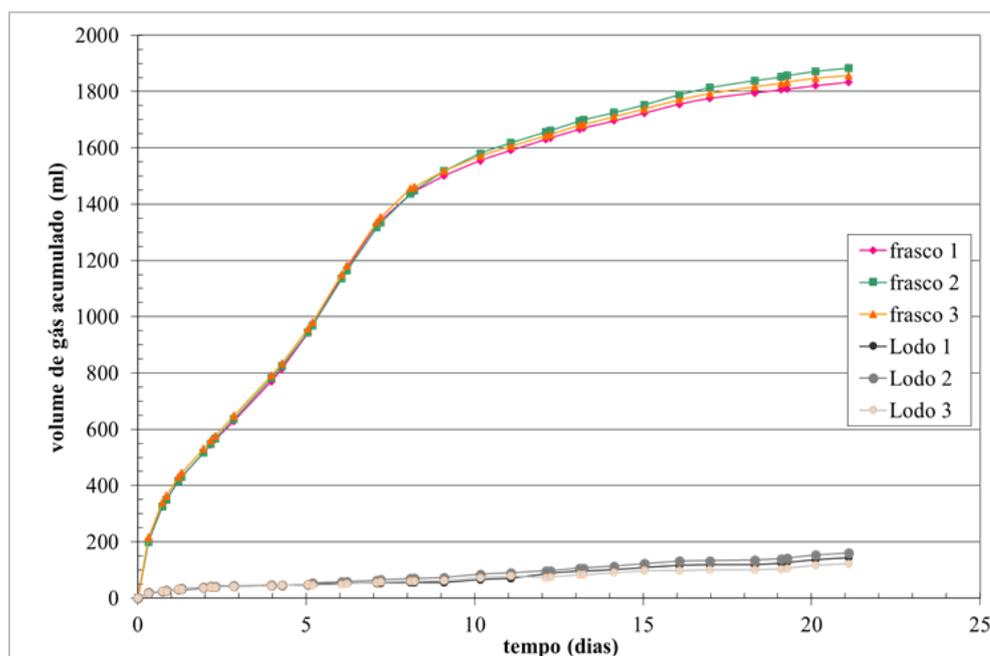


Figura 4.1: Volume acumulado de biogás para a Tangerina "Ponkan"

As curvas de geração para os frascos 1, 2 e 3 evidenciam o comportamento da atividade microbiana na digestão anaeróbia. Nos primeiros dias a atividade é intensa, com grande inclinação da curva que, com o passar do tempo, torna-se mais

suave a partir do décimo dia, indicando a redução da atividade microbiana na geração do gás, que finalmente se estabiliza por volta do vigésimo dia com pouca geração de gás. Os frascos 4, 5 e 6, ou seja, os frascos com apenas lodo anaeróbio têm papel de “branco” do sistema, ou seja, evidenciar quanto de biogás é gerado apenas pelo lodo e não pelo substrato

É válido reforçar a importância da medição do pH antes e após o ensaio, pois a configuração do mesmo não permite medições constantes. Nota-se que os valores de pH praticamente não diminuíram após o ensaio, mantendo-se por volta da faixa entre pH 7,28 e pH 7,59.

A Tabela 4.4 apresenta um resumo dos resultados obtidos com a casca da tangerina do tipo “Ponkan” no ensaio BMP.

Tabela 4.4: Resultados do Ensaio da Tangerina “Ponkan”

Amostra	Volume Acumulado (mL)	Volume Normalizado (NmL)
Frasco 1	1.833,5	1.600,1
Frasco 2	1.883,5	1.643,7
Frasco 3	1.857,0	1.620,6
Frasco 4	144,0	125,7
Frasco 5	160,0	139,6
Frasco 6	123,0	107,3

Dessa forma, obteve-se uma média de 1.858 mL (ou 1.621,4 NmL pela conversão para as CNTP) de volume de gás acumulado para os frascos 1, 2 e 3, ou seja, aqueles com a mistura casca + lodo; e uma média de 142,3 mL (ou 124,2 NmL pela conversão para as CNTP) para os frascos 4, 5 e 6, os quais continham apenas lodo. Corrigindo o volume em relação ao volume gerado pelo lodo, o volume de biogás passa a ser de 1.497,2 NmL, em média, para a casca de tangerina “Ponkan”.

Assim, com o volume de biogás encontrado e os parâmetros de entrada obtidos para a casca da tangerina “Ponkan” é possível chegar ao seu potencial de geração de biogás. O potencial é calculado dividindo-se o volume gerado nos 21 dias de ensaio pela massa de SV ou ST, dependendo da unidade desejada. Em termos de potencial de geração de biogás, o valor para a casca da tangerina “Ponkan” é de aproximadamente 615,38 NmL/gSV, ou, em termos de ST, de 606,15 NmL/gST.

4.2.2 Tangerina “Montenegrina”

Com relação à casca da tangerina “Montenegrina”, os resultados obtidos mostraram-se levemente superiores aos da tangerina “Ponkan”, com uma maior geração de gás no final dos vinte e um dias de ensaio. A Tabela 4.5 apresenta o resumo dos dados de entrada e saída do ensaio, e a Figura 4.2 ilustra a curva dos resultados obtidos. Nota-se que, dentro das condições ensaiadas, o pH final mantém-se acima de 7, o que indica que a solução com a casca de tangerina “Montenegrina” não acidificou, variando entre os valores pH 7,32 e pH 7,77.

Tabela 4.5: Dados do ensaio BMP para a tangerina “Montenegrina”

Dados de Entrada	Dados de Saída	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Massa de substrato (g)	-	12	12	12	-	-	-
Massa de lodo (mL)	-	388	388	388	400	400	400
pH inicial do lodo	-	-	-	-	7,92	7,92	7,92
pH inicial da solução	-	7,77	7,68	7,72	-	-	-
-	pH final da solução	7,32	7,34	7,35	7,46	7,49	7,48

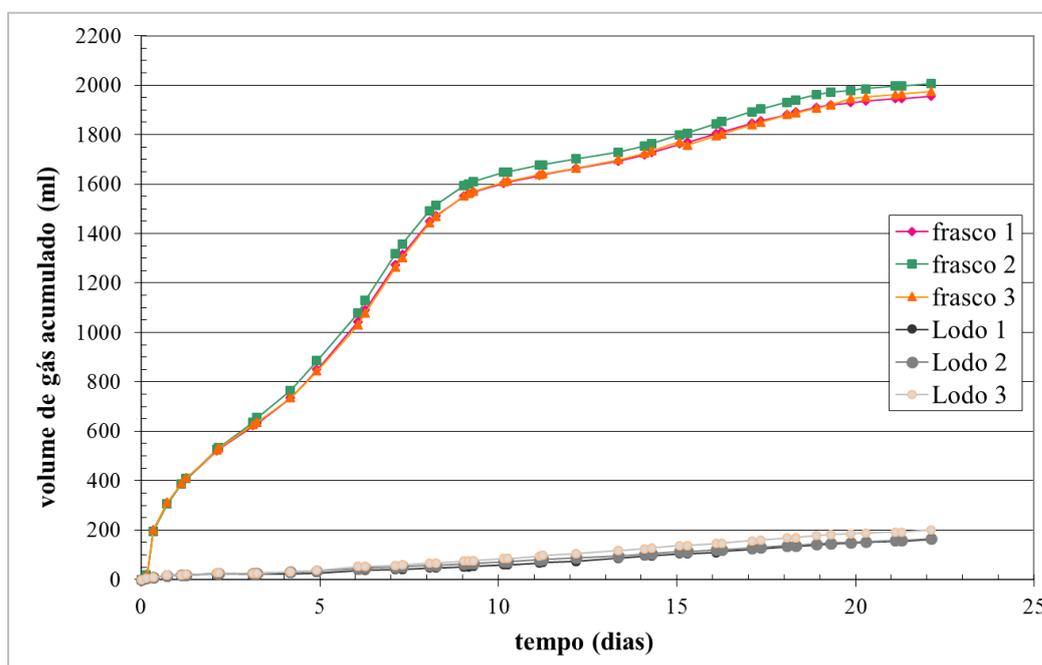


Figura 4.2: Volume acumulado de biogás para a Tangerina "Montenegrina"

A análise do gráfico de produção acumulada de biogás permite verificar que por volta do quinto dia ainda há uma geração acentuada de gás, com a inclinação da curva se reduzindo a partir do décimo segundo dia de ensaio e estabilizando ao redor do décimo oitavo dia de ensaio. A Tabela 4.6 apresenta um resumo dos

resultados obtidos com a casca de tangerina do tipo “Montenegrina” no ensaio de potencial bioquímico do metano.

Tabela 4.6: Resultados do Ensaio da Tangerina “Montenegrina”

Amostra	Volume Acumulado (mL)	Volume Normalizado (NmL)
Frasco 1	1.957,0	1.707,8
Frasco 2	2.006,0	1.750,6
Frasco 3	1.975,5	1.724,0
Frasco 4	161,5	140,9
Frasco 5	165,5	144,4
Frasco 6	200,0	174,5

Dessa forma, obteve-se uma média de 1.979,5 mL (ou 1.727,5 NmL pela conversão para as CNTP) de volume de gás acumulado para os frascos 1, 2 e 3, ou seja, aqueles com a mistura casca + lodo; e uma média de 175,7 ml (ou 153,3 NmL pela conversão para as CNTP) para os frascos 4, 5 e 6, os quais continham apenas lodo. Corrigindo o volume em relação ao volume gerado pelo lodo, o volume de biogás passa a ser de 1.574,2 NmL, em média, para a casca de tangerina “Montenegrina”.

Assim, com os valores encontrados nos resultados do ensaio e os parâmetros de entrada obtidos para a casca da tangerina “Montenegrina” é possível chegar, com base nos valores de ST e SV, ao seu potencial de geração de biogás.

Em termos de potencial de geração de biogás, o valor para a “Montenegrina” foi de aproximadamente 565,84 NmL/gSV, ligeiramente menor do que para a tangerina “Ponkan”, com uma diferença de 49,5 NmL/gSV. Em termos de sólidos totais, o potencial da montenegrina foi de 546,6 NmL/gST, ligeiramente menor do que para a tangerina “Ponkan”, com uma diferença de 59,5 NmL/gST.

4.3 Discussões sobre o Ensaio

A partir da análise dos resultados obtidos, pode-se perceber que mesmo com uma maior geração de gás dentro dos vinte e um dias por parte da casca de tangerina “Montenegrina”, esta apresenta um menor potencial de geração de biogás se comparado ao da casca da tangerina “Ponkan”. Alguns fatores capazes de justificar essa questão estão relacionados ao fato da tangerina “Ponkan” apresentar melhores

propriedades físicas do que a “Montenegrina” como, para um mesmo teor de ST, apresentar um teor de SV ligeiramente superior (2 %) à “montenegrina”.

A Tabela 4.7 foi elaborada buscando comparar os potenciais de geração de biogás de algumas frutas encontradas na literatura com as tangerinas estudadas na presente pesquisa. Embora cada autor tenha expressado o potencial de biogás através de uma determinada unidade, para facilitar a comparação dos resultados das diferentes frutas, nesse trabalho as unidades foram convertidas para NmL/gSV, com exceção daqueles resultados expressos em termos de ST, casos em que a unidade original foi mantida visto que nesses trabalhos não foram apresentados detalhes sobre os valores de SV para fazer a conversão.

Fica evidente por meio desta comparação o fato de que as características de cada fruta influenciam de diferentes maneiras o processo de digestão anaeróbia. Nota-se que as cascas são as partes das frutas que tendem a gerar maior quantidade de gás, enquanto as sementes praticamente não têm geração.

Gunaseelan (2004, *apud* LUCENA, 2016) realizou um ensaio BMP com diversas frutas, incluindo frutas cítricas, dentre elas a tangerina. Apesar do tipo de tangerina não ter sido especificado, o autor chegou a resultados de 0,486 m³/kgSV para as tangerinas analisadas. Convertendo para as unidades utilizadas neste trabalho, chega-se em 424,12 NmL/gSV, abaixo dos 615,38 NmL/gSV da “Ponkan” e 565,84 NmL/gSV da tangerina “Montenegrina” determinados na presente pesquisa. Tal fato indica a possibilidade de ter sido utilizada um outro tipo de tangerina. Também devem ser observados os teores de carga orgânica de entrada aos ensaios empregados por Gunaseelan (2004).

Santos, L. *et al.* (2018) realizaram ensaios com bagaço de laranja e inóculo, chegando a resultados considerados eficientes em termos de produção, potencial e geração de metano. De acordo com aqueles autores, a configuração do bagaço da laranja misturado com o inóculo apresentou um volume acumulado de biogás de 1.748,0 NmL. Já para o inóculo sem a adição do bagaço da laranja correspondeu um volume acumulado de biogás de 308,0 NmL. Nota-se que, ao se comparar com as tangerinas aqui estudadas, os valores de geração de gás foram próximos (1497,2 NmL e 1574,2 NmL). Em termos de potencial de geração de biogás, Santos, L. *et al.* (2018) chegaram ao resultado 288 NmL/gSV, ou seja, 327,38 NmL/gSV abaixo da casca da “Ponkan” e 277,84 NmL/gSV abaixo da casca da “Montenegrina”.

Tabela 4.7: Comparativo de potencial de biogás de diversas frutas

Substrato		Potencial de Biogás	Unidade	Autor
Fruta	Partes da Fruta			
	Casca "Ponkan"	615,38	NmL/gSV	Este Trabalho
		606,15	NmL/gST	
Tangerina	Casca	565,84	NmL/gSV	
	"Montenegrina"	546,6	NmL/gST	
	Casca (não especificada)	424,12	NmL/gSV*	GUNASEELAN, 2004**
Laranja	Bagaço	288	NmL/gSV	SANTOS <i>et al.</i> , 2018
	Casca pré-tratada	478	NmL/gSV	CARVALHO <i>et al.</i> , 2017
	Casca	397,07	NmL/gSV*	GUNASEELAN, 2004**
Banana	Casca	212,93	NmL/gST*	SOUZA <i>et al.</i> , 2013
	Casca	571,44	NmL/gSV*	ACHINAS <i>et al.</i> , 2019
	Casca + Engaço + Folhas + Pseudocaule	269,05	NmL/gST*	SOUZA <i>et al.</i> , 2010
Maçã	Polpa	610,88	NmL/gST*	COALLA <i>et al.</i> , 2009
Uva	Bagaço	174,54	NmL/gSV*	BESINELLA <i>et al.</i> , 2017
Manga Abacaxi	Casca	322,89 - 456,41	NmL/gSV*	GUNASEELAN, 2004**
	Casca	311,55	NmL/gSV*	
Melão	Casca	210,4	NmL/gSV*	
Lichia	Sementes	62,31	NmL/gSV*	
	Casca	93,73	NmL/gSV*	
Cereja	Sementes	27,14	NmL/gSV*	ZHAO <i>et al.</i> , 2016
Maracujá	Casca	170	NmL/gSV*	
Abacate	Casca	78,54	NmL/gSV*	
Pitaia	Casca	170,17	NmL/gSV*	

*Valores adaptados para as unidades deste trabalho; ***apud* LUCENA, 2016.

Também Carvalho *et al.* (2017) em estudos com casca de laranja pré-tratada com adição de lodo de esgoto obtiveram potencial de biogás de 478 NmL/gSV, ou seja, 137,38 NmL/gSV abaixo da "Ponkan" e 87,84 NmL/gSV abaixo da "Montenegrina". Tais informações reforçam a importância da tangerina como uma fruta com potencial similar à laranja como substrato para a digestão anaeróbia e consequente geração de biogás.

Outro ponto que pode ser observado é como a influência de pré-tratamento do substrato interfere nos resultados, como fica evidente com a casca de laranja analisada por Carvalho *et al.* (2017) se comparada com a analisada por Gunaseelan (2004, *apud* LUCENA, 2016), sem pré-tratamento. Os pré-tratamentos podem ser

de diversos tipos, como: mecânicos, térmicos, químicos ou combinações dentre esses tipos; e servem tanto como uma melhoria no rendimento de degradação os sólidos voláteis como no rendimento de produção de biogás já que potencializam os resultados para os substratos que não tem a estrutura química adequada à biodegradação (CARAPINA, 2012).

5 Considerações finais

A digestão anaeróbia como tratamento de resíduos sólidos orgânicos configura-se como uma boa solução no gerenciamento de tais resíduos, visto que sua aplicação resulta em boa eficiência na degradação da matéria orgânica e bom aproveitamento energético com a geração de biogás, sendo então não apenas uma forma de gerenciar os resíduos como também uma opção para se gerar energia limpa.

O desenvolvimento do experimento de laboratório conduzido ao longo deste trabalho com as cascas das tangerinas ajudou a aprofundar o tema e a visualizar na prática, com o ensaio BMP, a análise de potencial de geração de metano das cascas de tangerina, chegando-se a valores otimistas.

Os resultados de experimentos laboratoriais obtidos com cascas das tangerinas “Ponkan” e “Montenegrina” mostraram um potencial de geração de biogás de 615,38 NmL/gSV e 565,84 NmL/gSV, respectivamente. A diferença encontrada pode ser considerada como sendo reflexo das características físico-químicas, que apresentaram pequena diferença e que, por sua vez, influenciam na sua capacidade de gerar gás durante a digestão anaeróbia.

A realização desta dissertação agregou uma maior experiência na área da engenharia ambiental relacionada ao tratamento de resíduos sólidos, em especial à digestão anaeróbia e a consequente produção do biogás. Além disso, relacionado ao último, sua aplicação e aproveitamento a partir da geração via resíduos orgânicos da fruticultura para os produtores de tais frutas, abrindo um nicho no mercado para investimento no setor.

Cada substrato apresenta diferentes características e propriedades que influenciam na sua capacidade de gerar gás durante a digestão anaeróbia, no entanto, pesquisas como esta elucidam a capacidade e potencial das frutas para tal finalidade, como é o caso da tangerina neste trabalho. Dessa forma, as cascas de frutas que restam após a fabricação dos sucos se mostram como ótimas escolhas de substratos para a digestão anaeróbia, visto que após a fabricação, os restos das

mesmas podem ser usados de maneira “pura” nos biodigestores, sem estarem misturados com outros resíduos, como é comum na coleta de RSU, facilitando o processo de AD.

Dessa forma, abre-se uma oportunidade para os grandes produtores fazerem uso de biodigestores abastecidos com os restos de frutas que sobram do processo de fabricação dos sucos. Esse sistema facilita a estimativa de biogás que pode ser gerado pelo produtor tendo em vista a noção do potencial de geração de cada fruta.

Assim, com uma previsão de geração de biogás, os produtores podem usufruir dos seus benefícios para a própria produção, como combustível para as máquinas de transporte e colheita de frutas, energia elétrica para abastecer os galpões e até mesmo como energia térmica para controle de temperatura.

O biogás se mostra com alto potencial para se tornar um grande aliado na indústria da fabricação de sucos já que, em seu processo, os resíduos de frutas abrem espaço para o seu aproveitamento no alcance de processos mais sustentáveis para os grandes produtores. Sendo assim, a ideia de se investir em biodigestores é uma medida que vem sendo difundida visto seus benefícios nos âmbitos ambiental e econômico.

A utilização de biogás como fonte de energia sustentável é uma alternativa valiosa para a redução do uso de combustíveis fósseis. Dessa forma, como maior país da América Latina, o Brasil apresenta enorme potencial para a utilização de tratamento via digestão anaeróbia, que se mostra uma solução atrativa para o mesmo já que, além da vasta extensão territorial, se trata de um país com condições climáticas favoráveis para a produção de alimentos e frutas.

5.1 Sugestões para Futuros Trabalhos

Baseado nas conclusões obtidas, seguem abaixo algumas sugestões para futuros trabalhos, com intenção de se aprofundar cada vez mais nesse tema de extrema relevância para a gestão de resíduos sólidos e para o aquecimento global:

- a) realizar ensaios com frutas ainda não estudadas na literatura com a finalidade de se obter mais resultados de potencial de geração de biogás, expandindo o material e conhecimento disponível sobre o tema;

- b) analisar financeiramente a implantação e operação de biodigestores em áreas de grandes produções de frutas a fim de se obter valores de custo/benefício e *payback* do investimento;
- c) estudar a viabilidade de emprego do composto orgânico e/ou digestato nas estudadas culturas;
- d) estudar a viabilidade e o dimensionamento de um biodigestor na região onde as frutas são triadas, considerando grandes e pequenos produtores;
- e) estudar mais detalhadamente os períodos do ano em que a produção das frutas é maior e como tal variação influenciaria a viabilidade técnica de um projeto de implantação de biodigestores.

6

Referências bibliográficas

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas; 1986. **NBR 6.457/86 - Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**, 09p., 1986.

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 10.664/89 - Águas - Determinação de Resíduos (Sólidos) - Método Gravimétrico**, 07p., 1989.

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 8.419/92 – Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**, 07p., 1992.

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 10.004/04 - Resíduos Sólidos – Classificação**, 77p., 2004.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019**. 68p., 2018.

ABREU, T. C. C. de. **Avaliação do potencial de geração de biogás de resíduos sólidos urbanos de diferentes idades**. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 307p., 2014.

ACHINAS, S.; KROONEMAN, J.; & EUVERINK, G. J. W. **Enhanced Biogas Production from the Anaerobic Batch Treatment of Banana Peels**. Revista Engineering vol. 5, Issue 5, pages 970-978, 10p., 2019.

ALVES, I. R. F. S. **Avaliação da codigestão na produção de biogás**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 168p., 2016.

AMARAL, C. M. C.; AMARAL, L. A.; JÚNIOR, J. L.; NASCIMENTO, A. A.; FERREIRA, D. S.; MACHADO, M. R. F. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica**. Revista Cienc. Rural, vol.34, no.6, Santa Maria, nov./dec., p. 1897-1902, 2004.

AMORIM, M. B.; MAGALHÃES, G. V. V.; LIMA, A. C. A.; ALBUQUERQUE, L. V.; STEFANUTTI, R. **Co-digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos utilizando a casca do coco como co-substrato visando a produção de biogás**. Portal Tratamento de Água, 2018. Disponível em: <<https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/co-digestao-anaerobia-residuos-biogas/>>. Acesso em 24 de julho de 2019.

ARAÚJO, A. P. C. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Uberlândia, 42p., 2017.

BACKES, G. M. **Avaliação do processo de digestão anaeróbia na geração de energia a partir de dejetos suínos e bovinos de leite com suplementação de glicerina residual bruta da produção de biodiesel.** Dissertação de Mestrado. Centro Universitário UNIVATES, Rio Grande do Sul, 108p., 2011.

BAJPAI, P. *Basics of Anaerobic Digestion Process.* SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, p. 7–12, 2017.

BAPTISTA, M.; CARVALHO, R. V.; FAGUNDES, P. H. P. R. M.; NÓBREGA, M. J. R. **Análise de Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.** Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula, v.2, nº 1, p. 55-72, 2019.

BELO, A. P. M.; MORGADO, C. M. A.; SOUZA, E. R. B.; OGATA, T.; PEREIRA, C. C. O.; JUNIOR, L. C. C. *Comparative and organic analysis and characterization of varieties of tangerines.* Revista Scientia Horticulturae 240 (2018), p. 102–108, 2018.

BESINELLA, G. B.; RIBEIRO, C. B.; GUERI, M. V. D.; BURATTO, W. G.; STEFFLER, V.; VERONEZE, M. L. **Potencial dos subprodutos vinícolas da região sul do Brasil para a geração de biogás e energia elétrica.** II Seminário de Engenharia de Energia na Agricultura. Acta Iguazu, v. 6, n. 5, p. 253-261, 2017.

BOLTON, K.; ROUSTA, K. *Solid Waste Management Toward Zero Landfill.* Sustainable Resource Recovery and Zero Waste Approaches, p. 53–63, 2019.

BORBA, P. F. S.; MARTINS, E. M.; CORREA, S. M.; RITTER, E. **Emissão de gases do efeito estufa de um aterro sanitário no Rio de Janeiro.** Revista Eng. Sanit. Ambient., v.23, n.1, p. 101-111, 2018.

BRACKMANN, A.; PETERLE, M. E.; PINTO, J. A. V.; WEBER, A.; SAUTTER, C.; EISERMANN, A. C. **Temperatura e umidade relativa na qualidade da tangerina “Montenegrina” armazenada.** Revista Ciência Rural, Santa Maria, v.38, n.2, p.340-344, 2008.

BRASIL. **Lei 12.305 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).** Portal do Planalto, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em 23 de julho de 2019.

BRUNDLAND, Comissão. *Our Common Future*, 1987.

CAPA – Centro de Apoio e Promoção da Agroecologia. **Época de produção de citros.** Disponível em: <<https://capa.org.br/2019/12/epoca-de-producao-de-citros/>>. Acesso em: 11 de outubro de 2020.

CARAPINA, L. C. M. **Efeito de Alguns Pré-tratamentos na Digestão Anaeróbia Mesofílica de Resíduos de Casca de Batata**. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 92p., 2012.

CARVALHO, A.; FRAGOSO, R.; GOMINHO, J.; DUARTE, E. *Effect of Minimizing d-Limonene Compound on Anaerobic Co-digestion Feeding Mixtures to Improve Methane Yield*. Revista Waste and Biomass Valorization, p. 75-83, 2017.

CERVEIRA, G. S. **Remoção de CO₂ do biogás por permeação em membranas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 154p., 2016.

CHRISTO, G., L.; SANQUETTA, C. R.; PIVA, L. R. O.; CORTE, A. P. D.; MAAS, G. C. B. **Potencial de Produção de Biogás e Energia Elétrica a partir de Resíduos de Hortifruticultura em Colombo-PR**. Universidade Federal Do Paraná. Revista Biofix Scientific Journal, v. 3, n. 1, p. 72-83, 2018.

COALLA, H. L.; FERNÁNDEZ, J. M. B.; MORÁN, M. A. M.; BOBO, M. R. L. *Biogas generation apple pulp*. Revista Bioresource Technology 100, p. 3843-3847, 2009.

CORDEIRO, N. K.; CARDOSO, K. P. S.; MATA, T. C.; BARBOSA, J. A.; GONÇALVES JR., A. C. **Gestão de Resíduos Agrícolas como forma de redução dos impactos ambientais**. Revista de Ciências Ambientais, Canoas, v. 14, n. 2, 2020.

COSTA, J. M. B. **Coprocessamento de CDR no processo de produção de cimento**. Dissertação de Mestrado. Universidade NOVA de Lisboa, 143p., 2014.

CYPRIANO, D. Z.; DA SILVA, L. L.; MARIÑO, M. A.; TASIC, L. **A Biomassa da Laranja e seus Subprodutos**. Rev. Virtual Quim., Vol. 9, No. 1, p. 176-191, 2017.

DEL VALLE TM. **Del Valle Brasil apresenta Sucolier | Episódio 1-4**. Video Institucional, 2015. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=AlgwkgsaW1c>>. Acesso em: 05 de dezembro de 2019.

DIN 38414, part 8. *Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser, Abwasser und Schlammuntersuchung. Schlamm und Sedimente (Gruppe S). Bestimmung des Faulverhaltens (S8)*. DIN 38 414. Teil 8., Juni., 1985.

DONADON, F. A. B.; SANTOS, D. F. L. **A relevância da eco-inovação para resíduos sólidos na agroindústria da fruticultura**. Revista Gestão & Tecnologia, Pedro Leopoldo, vol. 18, n. 3, p. 225-246, 2018.

EEA. *Diversion of waste from landfill*. European Environment Agency, Avaliação de Indicadores, 16p., 2019.

ELOÁ, D.; CAROLINE, R.; ARAÚJO, F.; SOUSA, G. **Alternativas Para o Reaproveitamento dos Resíduos do Processamento de Sucos de Frutas**. Portal Engenharia de Alimentos na Rede, 2018. Disponível em: <<http://engenhariadealimentosnarede.blogspot.com/2018/03/alternativas-para-o-reaproveitamento.html>>. Acesso em: 12 de março de 2020.

GOMEZ, C. C. **Biogas as an energy option: an overview**. Revista *Woodhead Publishing Limited, Fachverband Biogas*, Germany, p. 01-16, 2013.

GORAYEB, T. C. G. **Estudo das perdas e desperdício de frutas no Brasil**. Simpósio Nacional de Tecnologia em Agronegócio, v. 11, n. 1, p. 214-222, 2019.

GROSSO, M. **Solid Waste Management and Treatment – Anaerobic Digestion**. Master of Science in “Environmental and land planning engineering”, Politécnico di Milano, notas de aula, 2018.

GUERI, M. V. D.; SOUZA, S. N. M.; KUCZMAN, O.; SCHIRMER, W. N.; BURATTO, W. G.; RIBEIRO, C. B.; BESINELLA, G. B. **Digestão Anaeróbia de Resíduos Alimentares Utilizando Ensaio BMP**. Universidade Federal do Paraná. Revista *Biofix Scientific Journal* v. 3 n. 1 p. 08-16, 2018.

HANSEN, C. L.; CHEONG, D. Y. **Agricultural Waste Management in Food Processing**. Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering, p. 673–716, 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola - Lavoura Permanente**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/15/12046>. Acesso em: 14 de novembro de 2019.

IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*. **Global Warming of 1.5°C – Summary for Policymakers**. Documento Oficial, 34p., 2018.

JFS. **Ehime Prefecture to Manufacture Biofuel from Residue of Tangerine Juice Production**. Portal *Japan for Sustainability*. 2010. Disponível em: <https://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id030162.html>. Acesso em: 10 de março de 2020.

KIRAN, E. U.; TRZCINSKI, A. P.; NG, W. J.; LIU, Y. **Bioconversion of food waste to energy: A review**. Revista *Fuel*, vol. 134, pages 289-299, 11p, 2014.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. **Fundamentos da Digestão Anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Editora Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 209p., 2019.

LEITE, V. D.; SOUSA, J. T.; LOPES, W. S.; HENRIQUE, I. N.; BARROS, A. J. M. **Bioestabilização anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos: aspectos quantitativos**. Revista *Tecno-lógica*, Santa Cruz do Sul, v. 18, n. 2, p. 90-96, 2014.

LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C. **Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES**. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), 106p., 2012.

LIU, Z.; WANG, X.; WANF, F.; BAI, Z.; CHADWICK, D.; MISSELBROOK, T.; MA, L. *The progress of composting technologies from static heap to intelligent reactor: Benefits and limitations*. Revista *Journal of Cleaner Production*, 42p., 2020.

LUCENA, T. V. **Avaliação da geração de biogás sob diferentes condições de biodegradação de resíduos alimentares**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), 131p., 2016.

MACHADO, G. B. **Formas de uso do biogás**. Portal do Biogás. Disponível em: <<https://www.portaldobiogas.com/formas-de-uso-do-biogas>>. Acesso em: 20 de julho de 2020. 2016.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agenda Estratégica da Fruticultura 2010-2015**. Secretaria Executiva – Brasília, 60p., 2011.

MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. *Cradle to cradle: re-making the way we make things*. Editora: North Point Press; Edição: First, 192p., 2002.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Documento oficial, governo federal. 106p., 2012.

MMA (a) - Ministério do Meio Ambiente. **Gestão de Resíduos Orgânicos**. Disponível em: < <https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/gest%C3%A3o-de-res%C3%ADduos-org%C3%A2nicos.html>>. Acesso em: 27 de setembro de 2020.

MMA (b) – Ministério do Meio Ambiente. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos.html>>. Acesso em: 27 de setembro de 2020.

MONTEIRO, J. A. V. **Benefícios da Compostagem Doméstica de Resíduos Orgânicos**. Revista Educação Ambiental em Ação, n. 56, ano XV, 07p., 2016.

MORTIER, N.; VELGHE, F.; VERSTICHEL, S. *Organic Recycling of Agricultural Waste Today: Composting and Anaerobic Digestion*. Biotransformation of Agricultural Waste and By-Products, p. 69-124, 2016.

MOUSTAKAS, K.; PARMAXIDOU, P.; Vakalis, S. *Anaerobic Digestion for energy production from agricultural biomass waste in Greece: Capacity assessment for the Region of Thessaly*. Energy, 34p., 2019.

NÁSNER, A. M. L. **Modelagem de uma Planta Piloto de Gaseificação de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) em um Sistema Integrado a Motor**

Ciclo Otto, utilizando o Software Aspen Plus™. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), 162p., 2015.

NEVES, L. C. **Manual pós-colheita da fruticultura brasileira.** Livro digital, Londrina: Eduel, 2016.

OLIVEIRA, R. D. **Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás produzido pela Fermentação Anaeróbia de Dejetos em Abatedouros e as possibilidades no mercado de carbono.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de São Paulo, 98p., 2009.

PAIXÃO, S. K. S. **Produção de Biogás a partir de Resíduos de Alimentos: Uma Proposta para um Restaurante em Recife-PE.** Dissertação de Mestrado, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, 65p, 2018.

PARANÁ. **Lei 19.500/18 - Política Estadual do Biogás e Biometano.** Disponível em: < <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=360329>>. Acesso em: 26 de setembro de 2020.

PATTANAIK, L.; PATTNAIK, F.; SAXENA, D. K.; NAIK, S. N. **Biofuels from agricultural wastes.** Second and Third Generation of Feedstocks, p. 103–142, 2019.

PEREIRA, P. H. M.; MARQUARDT, L.; CORBELLINI, V. A.; BACCAR, N. M.; ROOHLFES, A. L. B. **Resíduos Citrícolas: uma breve revisão.** Revista Jovens Pesquisadores, Santa Cruz do Sul, vol. 8, n. 2, p. 11-19, 2018.

PIO, R. M.; AZEVEDO, F. A.; NEGRI, J. D.; FIGUEIREDO, J. O.; CASTRO, J. L. **Características da Variedade Fremont quando Comparadas com as das Tangerinas ‘Ponkan’ e ‘Clementina Nules’.** Rev. Bras. Frutic., Jaboticabal - SP, v. 28, n. 2, p. 222-226, 2006.

PRATES, L. F. S.; PIMENTA, C. F.; RIBEIRO, H. F. **Alternativas Tecnológicas para o Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos.** Revista APPREHENDERE – Aprendizagem & Interdisciplinaridade, Vol. 1, nº 2 (Edição Especial), 06p., 2019.

RAPOSO, F.; DE LA RUBIA, M. A.; FERNÁNDEZ-CEGRÍ, V.; BORJA, R. **Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, n. 1, p. 861–877, 2012.

RICO, C.; MONTES, J. A.; LOBO, A. **Dry batch anaerobic digestion of food waste in a box-type reactor system: Inoculum preparation and reactor performance.** Revista Journal of Cleaner Production, no. 251, 10p. 2020.

RODRIGUES, M. S.; BARREIRA, L. P.; PIMENTA, E.; DANTAS, F. **Combustível Derivado de Resíduos (CDR): Definição, padronização e usos potenciais.** Revista Águas & Resíduos, vol. IV, n. 2, 9p., 2017.

ROTH, C. G.; GARCIAS, C. M. **A influência dos padrões de consumo na geração de resíduos sólidos dentro do sistema urbano.** Revista REDES, Santa Cruz do Sul, v. 13, n. 3, p. 5 -13, 2008.

RUSSO, M. A. T. **Tratamento de Resíduos Sólidos.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, 196p., 2003.

SÁ, C. D.; CAIXETA-FILHO, J. V. **A gestão logística da produção pode ajudar o bom clima no segmento de sucos de frutas brasileiro.** Revista de Agronegócios da FGV, p. 53-56, 2002.

SALAZAR, A. R. G. **Estudo da utilização do biogás como fonte de energia renovável no processo produtivo de indústrias de bebidas.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, 153p., 2014.

SAMPAIO, R. P. **Estudo de caso dos possíveis efeitos deletérios causados pelo combustível derivado de resíduo (CDR) em caldeiras voltadas a produção de energia elétrica queimando principalmente bagaço de cana.** Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo (USP), Escola de Engenharia, 162p., 2014.

SANTA CATARINA. **Lei 17.542/18 - Política Estadual do Biogás.** Disponível em: <http://leis.alesc.sc.gov.br/html/2018/17542_2018_lei.html>. Acesso em: 26 de setembro de 2020.

SANTOS, A. T. L; HENRIQUE, N, S; SHHLINDWEIN, J. A.; FERREIRA, E.; STACHIW, R. **Aproveitamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos para produção de composto orgânico.** Revista Brasileira de Ciências da Amazônia, v. 3, n. 1, p. 15-28, 2014.

SANTOS, L. A.; SANTOS, A. F. M. S.; VALENÇA, R. B.; JUCÁ, J. F. T.; OLIVEIRA, C. R. M. **Produção de biogás a partir de bagaço de laranja.** Revista GEAMA – Ciências Ambientais e Biotecnologia. Scientific Journal of Environmental Sciences and Biotechnology, p. 22-27, 2018.

SANTOS, K. F. T. dos; SANTOS, M. L. G. T. dos; CELLA, D.; SPADA, R. K. **FRUTICULTURA: estudo do comércio internacional do mamão.** Revista Interface Tecnológica, v. 15, n. 2, p. 323-335, 2018.

SCHALCH, V.; LEITE, W. C. A.; JÚNIOR, J. L. F.; CASTRO, M. C. A. A. **Gestão E Gerenciamento De Resíduos Sólidos.** Apostila. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Hidráulica e Saneamento, 97p., 2002.

SILVA, R. W. C.; PAULA, B. L. **Causa do aquecimento global: antropogênica versus natural.** Revista Terræ Didática, 5(1): 42-49, 2009.

SITORUS, B.; SUKANDAR; PANJAITAN, S. D. **Biogas recovery from anaerobic digestion process of mixed fruit-vegetable wastes.** Revista Energy Procedia, nº 32, p. 176-182, 2013.

SOUSA, R. C.; HALASZ, M. R. **Recuperação e Reaproveitamento de Rejeitos de Mamão**. Revista Educação e Tecnologia, Ano 2, nº 1, 12p., 2006.

SOUZA, O.; FEDERIZZI, F.; COELHO, B.; WAGNER, T. M.; WISBECK, E. **Biodegradação de resíduos lignocelulósicos gerados na bananicultura e sua valorização para a produção de biogás**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.14, n.4, p.438–443, 2010.

_____, FISCHER, G. A. A.; SOUZA, E. L.; SELLIN, N.; MARANGONI, C. **Produção De Biogás A Partir De Resíduo Agrícola Da Bananicultura**. III Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais, 05p., 2013.

SOUZA, F. M.; VIANA, E.; JAEGER, J. M. S.; CANDIANI, G.; SIMÕES, A. F.; FONSECA FILHO, H. **Influência do inóculo da co-digestão anaeróbia de resíduos alimentares e grama**. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.11, n.1, p.146-156, 2020.

STANDARD METHODS 2540G. *Total, Fixed, and Volatile Solids in Solid and Semisolid Samples*, 1992.

STEFANUTTI, R. **Ensaio de potencial bioquímico de metano (BMP) na digestão de resíduos sólidos orgânicos**. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental ABES, 06p., 2019.

SUÁREZ, K. L. R. *Producción de biogás a partir de biomasa de microalgas Scenedemos sp. procedente de diferentes procesos*. Tese de Doutorado, Universidade Politécnica de Madrid, 283p., 2014.

SZARBLEWSKI, M. S.; SCHNEIDER, R. C. S.; MACHADO, E. L. **Métodos para a remoção de sulfeto de hidrogênio de efluentes gasosos aplicáveis a reatores anaeróbios**. Revista Jovens Pesquisadores, Santa Cruz do Sul, n. 1, p. 62-74, 2012.

TOJO, G. C.; ROUEZ, M.; CREST, M.; STEYER, J. P.; DELGENÈS, J. P.; ESCUDIÈ, R. *Food waste valorization via anaerobic processes: a review*. Rev Environ Sci Biotechnol, p. 499-547, 2016.

VALENTE, B. S.; XAVIER, E. G.; MORSELLI, T. B. G. A.; JAHNKE, D. S.; BRUM JR., B de S.; CABRERA, B. R.; MORAES, P de O.; LOPES, D. C. N. **Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos**. Revista Archivos de Zootecnia, n. 58 (R), p. 59-85, 2009.

VDI 4630. *Fermentation of organic materials. Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests*. Germany: Verein Deutscher Ingenieure – VDI, 92p, 2006.

WIKANDARI, R. *Effects of fruit flavors on anaerobic digestion: inhibitions and solutions*. Tese de Doutorado, University of Borås, Sweden, 79p., 2014.

ZAGO, V., C., P.; BARROS, R. T. V. **Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade.** Revista Eng. Sanit. Ambient., v. 24, n. 2, p. 219-228, 2019.

ZHAO, C.; YAN, H.; LIU, Y.; HUANG, Y.; ZHANG, R.; CHEN, C.; LIU, G. **Bio-energy conversion performance, biodegradability, and kinetic analysis of different fruit residues during discontinuous anaerobic digestion.** Waste Management 52, p. 295-301, 2016.

ZHOU, X.; YANG, J.; XU, S.; WANG, J.; ZHOU, Q.; LI, Y.; TONG, X. **Rapid in-situ composting of household food waste.** Process Safety and Environmental Protection, n. 141, p. 259-266, 2020.