**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

CAMILA AGNER D'AQUINO

**GERAÇÃO DE ENERGIA POR BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS:
ESTUDO DE CASO DA CIDADE UNIVERSITÁRIA DA USP**

**SÃO PAULO
2018**

CAMILA AGNER D'AQUINO

**GERAÇÃO DE ENERGIA POR BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS:
ESTUDO DE CASO DA CIDADE UNIVERSITÁRIA DA USP**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutora em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Ildo Luis Sauer

Versão Corrigida

SÃO PAULO

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

D'Aquino, Camila Agner.

Geração de energia por biogás a partir de resíduos orgânicos: estudo de caso da Cidade Universitária da USP. / Camila Agner D'Aquino; orientador: Ildo Luís Sauer. – São Paulo, 2018.

133 f.: il; 30 cm.

Tese (Doutorado em Ciência) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Biogás. 2. Energia elétrica. 3. Laboratórios I. Título.

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

Nome: D'AQUINO, Camila Agner

Título: Geração de energia por biogás a partir de resíduos orgânicos: estudo de caso da Cidade Universitária da USP

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutora em Ciências.

Aprovada:

Banca Examinadora

Prof. Dr.	_____	Instituição	_____
Julgamento	_____	Assinatura	_____
Prof. Dr.	_____	Instituição	_____
Julgamento	_____	Assinatura	_____
Prof. Dr.	_____	Instituição	_____
Julgamento	_____	Assinatura	_____
Prof. Dr.	_____	Instituição	_____
Julgamento	_____	Assinatura	_____
Prof. Dr.	_____	Instituição	_____
Presidente	_____	Assinatura	_____

*Dedico este trabalho àqueles que lutam pela
democracia e diversidade brasileira. Seremos
sempre resistência.*

AGRADECIMENTOS

Muitas foram as dificuldades encontradas até a finalização deste trabalho, no entanto, mais numerosas ainda foram as suas recompensas. Sempre enxerguei em mim o perfil e a ânsia pela pesquisa e entre o caminho deste trabalho pude conhecer pessoas e vivenciar situações que demonstraram que posso ser uma profissional mais completa aliando o perfil acadêmico e empreendedor que pude desenvolver em outras atividades durante esse período. E para todas as pessoas que me mostraram isso, aqui vão meus mais sinceros agradecimentos.

Institucionalmente, agradeço a Universidade de São Paulo e ao Instituto de Energia e Ambiente pelo suporte em termos não somente de estrutura, mas também de background e validação do trabalho em desenvolvimento. Aqui conheci pessoas que são absolutamente apaixonadas pelo que fazem, que muito me inspiraram. Ainda, agradeço ao CNPq, por ter financiado através de bolsa de doutorado e taxa de bancada a realização desta tese, sem o suporte que nos é dado pelo governo, para muitas pessoas seria impossível alcançar um título como esse. Reconhecendo o privilégio de estar entre as pessoas que tiveram acesso a esse recurso, espero ter contribuído em igual ou superior nível ao desenvolvimento da pesquisa no setor no Brasil. Que esse privilégio possa ainda alcançar muitas pessoas em nosso país.

Mas mais importante do que as instituições, são as pessoas que estiveram comigo durante esse trabalho e meu mais caloroso agradecimento se dirige a elas. Ao companheiro de laboratório, braço direito para todos os momentos e pessoa mais pró-ativa desse universo, Nil. Aos colegas de IEE que tornaram os dias mais leves, os bares com mais conteúdo e os dias menos pesados.

Em especial, agradeço meu orientador, Prof. Dr. Ildo Sauer, não apenas por sua magnífica orientação, mas por ser uma mente brilhante disposta a compartilhar todo seu conhecimento com quem o deseje. Você é sem dúvidas o melhor professor, orientador e mestre com quem já tive a oportunidade de trabalhar. Foi um grande prazer ser sua orientada.

Aos colegas da ABiogás, especialmente à Grazi, além de uma assistente das mais competentes, uma amiga, e ao Alessandro Gardemann, que me ensinou que o mundo corporativo tem sua beleza e que desenvolver políticas públicas é minha grande paixão. Obrigada por me ensinar e também por se deixar aprender comigo.

Àqueles fora do mundo do trabalho, agradeço aos amigos – os quais seria impossível citar nominalmente– pelos melhores momentos da vida, pelas risadas, pelo acalento em momentos conturbados. A vocês, os meus melhores brindes!

Agradeço à minha família, meus pais – Ieda e Everson – que tudo me ensinaram e que cultivaram o melhor de mim. Todos os títulos da minha vida são para vocês, sintam-se doutores junto comigo, pois essa vitória é de vocês! Obrigada por me ensinarem que o melhor que podemos ter não depende de nenhum diploma. Aos meus irmãos – Isa, Rafa e Bruno –, minha gratidão por terem estado sempre aqui, por me compreenderem mesmo dentro de nossas diferenças, por me fazerem orgulhosa das pessoas maravilhosas que são e por terem sido desde sempre os meus melhores amigos.

Por fim, mas não menos importante, aos grandes amores da minha vida, meu marido – Helder –, e minha filha, que ainda carrego no ventre. Vocês impulsionam, absolutamente todos os dias, o que há de melhor em mim. Por vocês, quero sempre superar as expectativas e entregar o que a vida tem de melhor a ofertar: amor. Meu ser é todo de vocês, sempre.

*“Não há limites para o que nós, enquanto mulheres,
consequimos conquistar”*

Michelle Obama

RESUMO

D'AQUINO. Camila Agner. Geração de energia por biogás a partir de resíduos orgânicos: estudo de caso da Cidade Universitária da USP. 2018. 113f. Tese (Doutorado) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, 2018.

A extinção dos recursos naturais, especialmente da água, é uma realidade cada vez mais próxima de uma sociedade de mais de sete bilhões de pessoas. Grande parte do aumento de consumo desses recursos está relacionado à apropriação de recursos energéticos e a mais crescente necessidade por energia e alimentos. Nesse sentido, o biogás aparece como uma solução economicamente e tecnicamente viável para a preservação dos recursos existentes, reciclagem de nutrientes e geração de energia de alto valor agregado.

O papel da Universidade nesse cenário está centrado na possibilidade de difusão da tecnologia, desenvolvimento e inovação e formação de mão de obra. Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi o levantar potencial de aproveitamento energético por biogás a partir dos resíduos orgânicos gerados na Cidade Universitária da USP, através da quantificação, caracterização e estudo do potencial energético em escala laboratorial, com a finalidade de sugerir uma planta conceito de produção de biogás.

Os resultados obtidos dão conta de que são gerados anualmente 710.650 m³ de esgoto sanitário, 22.774,13 toneladas de podas e 1.139,91 toneladas de restos de alimento na CUASO. Se aproveitado na forma de biogás, poderiam ser gerados até 2.363.405,15 m³ de biogás, o que significa uma geração elétrica desperdiçada na ordem de 4.949,36 MWh no ano, ou 1.313.295,74 m³ de biometano.

Estima-se que o recurso desperdiçado atualmente poderia suprir entre 5 e 6% da demanda por energia elétrica do campus, com um investimento entre 3,1 e 6,12 milhões de reais, com uma taxa de retorno de 3,6 anos.

Palavras-chave: *biogás, potencial, laboratório, energia elétrica*

ABSTRACT

D'AQUINO. Camila Agner. Energy generation by biogas from organic waste: case study from the University City of USP. 113p. Tese (Doutorado) – Institute of Energy and Environment, University of São Paulo, 2018.

The near extinction of natural resources, especially of water, is an even closer reality of a society of more than seven billion people. Much of the increase in consumption of these resources is related to the appropriation of energy resources and our increasing need for energy and food. In this sense, biogas appears as an economically and technically viable solution for the preservation of existing resources, nutrient recycling and the generation of energy of high added value.

The role of the University in this scenario is centered on the possibility of diffusion of technology, development and innovation and training. Therefore, the objective of this work was to raise the potential of biogas energy utilization from the organic residues generated in the University City of USP, through the quantification, characterization and study of the energy potential in laboratory scale, with the purpose of suggesting a concept plant of biogas production.

The results showed that 710,650 m³ of sanitary sewage, 22,774.13 tons of pruning and 1,139.91 tons of food waste are generated annually in CUASO. If used in the form of biogas, up to 2,363,405.15 m³ of biogas could be produced, which means an electric generation wasted in the order of 4,949.36 MWh in the year, or 1,313,295.74 m³ of biomethane.

The wasted resource could currently supply between 3 to 6% of the campus's electricity demand, with an investment between 3.1 and 6.12 million reais, with a return rate of 3.6 years.

Keywords: *biogas, potential, laboratory, electricity*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo sustentável da produção de energia a partir do biogás.	21
Figura 2. Avaliação do escopo de projetos.....	22
Figura 3. Eficiência nominal mínima para motores pelos padrões federais americanos (Motor TEFC 4-polos, 1800 RPM).	29
Figura 4. Funcionamento do RenovaBio.	30
Figura 5. Cadeia de produção do biogás e seus possíveis usos. Fonte: Autora.	32
Figura 6. Etapas básicas da digestão anaeróbia. Adaptado de: Chernicharo, 2007, 34	
Figura 7. Rendimento teórico de biogás para diversos substratos Adaptado de: Weiland (2010)	40
Figura 8. Sistema de determinação do potencial metanogênico via (A) AMPTS e (B) eudiômetros.....	41
Figura 9. Geração mensal de RSU na CUASO e EACH	44
Figura 10. Sistema de lagoa coberta instalado na granja Colombari.....	47
Figura 11. Diagrama esquemático do reator do tipo CSTR.....	48
Figura 12. Bidigestor do tipo CSTR em Langendorf (Alemanha).....	48
Figura 13. Representação de reator UASB.	49
Figura 14. Fluxograma de desenvolvimento do projeto	56
Figura 15. Triturador industrial utilizado para o processamento do resíduo de alimentos.	58
Figura 16. Amostras liofilizadas para análise elementar.....	59
Figura 17. Sistema de Fermentação em Batelada do Laboratório de Desenvolvimento de Biocombustíveis do IEE.....	60
Figura 18. Unidades do Sistema de Fermentação em Batelada: (I) Reator, (II) Medidor de gás (III) Software de aquisição de dados.....	61
Figura 19. Dispositivo para medição de pequenas vazões de gás da Ritter – MilliGasCounter.	62
Figura 20. Diferentes aparatos utilizados para análise do potencial de biogás ou de metano. (a) desenho esquemático de equipamento experimental utilizado na Itália; (b) equipamento de análise de potencial metanogênico da Universidade da Rainha de Beslfast e (c) equipamento da Bioprocess Control utilizado em diversos laboratórios	71

Figura 21. Medidor de vazão MilliGascounter, da Ritter, (a) detalhes do projeto e (b) equipamentos instalados no laboratório do IEE.....	71
Figura 22. Tela de aquisição de dados do software Rigamo. Fonte: Ritter, S/D.....	72
Figura 23. Projeto do reator UASB do IEE.....	73
Figura 24. Teste de estanqueidade do reator UASB.	74
Figura 25. Parâmetros mínimos de operação em função do tamanho da planta.....	75
Figura 26. Resíduos orgânicos coletados, analisados e testados.	76
Figura 27. Pontos de alimentação da CUASO. Fonte: PUSP-C, SD	77
Figura 28. Segregação do resto de alimento no Restaurante Central da CUASO. ..	78
Figura 29. Toneladas de resíduos comuns gerados na CUASO por mês e resíduos orgânicos sob responsabilidade da SAS, de abril de 2016 a março de 2017.....	79
Figura 30. Instalações do biodigestor localizado no CTH Fonte: Percora, 2006	80
Figura 31. Mapa da rede de esgoto da CUASO	82
Figura 32. Metros cúbicos de esgoto gerado na CUASO durante o período de um ano.	83
Figura 33. Leira de compostagem no viveiro da CUASO.	84
Figura 34. Composição elementar média dos resíduos orgânicos da CUASO, em porcentagem.....	88
Figura 35. Coleta de lodo na ETE Barueri.	92
Figura 36. Produção de biogás do reator RT01 da CUASO, durante 40 dias de ensaio e para as primeiras 48 horas, obtido no ensaio de potencial de biogás.	93
Figura 37. Produção de biogás do reator RT02 da CUASO, durante 40 dias de ensaio e para as primeiras 48 horas, obtido no ensaio de potencial de biogás.	94
Figura 38. Produção de biogás do reator RT03 da CUASO, durante 40 dias de ensaio e para as primeiras 48 horas, obtido no ensaio de potencial de biogás.	94
Figura 39. Produção de biogás do reator RT04 da CUASO, durante 40 dias de ensaio e para as primeiras 48 horas, obtido no ensaio de potencial de biogás.	95
Figura 40. Potencial mensal de biogás a partir dos restos de alimentos gerados na CUASO.....	98
Figura 41. Potencial mensal de biogás a partir do esgoto sanitário gerado na CUASO.	99
Figura 42. Concentrador Heartland.	102
Figura 43. Conceito da planta de aproveitamento de biogás a partir de resíduos orgânicos da CUASO..	104

Figura 44. Consumo de energia elétrica e custos total por mês durante o ano de 2017 na CUASO.....	106
Figura 45. Vista superior da Usina de Biogás.....	136
Figura 46. Plano Diretor da Usina de Biogás.....	137
Figura 47. Perspectivas da Usina de Biogás	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Indicadores de eficiência energética utilizados em diversos estudos e suas aplicações.....	27
Tabela 2. Diferentes métodos de pré-tratamento para diversos substratos	36
Tabela 3. Vantagens e desvantagens da pré-hidrólise.....	37
Tabela 4. Reações metanogênicas e energia liberada.....	39
Tabela 5. Porcentagem média de metano no biogás para diversos substratos.....	40
Tabela 6. Dados de literatura da composição elementar dos resíduos orgânicos típicos da Cidade Universitária.	45
Tabela 7. Características do biogás.	51
Tabela 8. Porcentagem de metano dissolvido em diversos tipos de reatores anaeróbios.....	53
Tabela 9. Volume de resíduos e efluentes coletados no Campus entre 2016 e 2017.	57
Tabela 10. Métodos analíticos utilizados na caracterização dos resíduos.	59
Tabela 11. Composição dos reatores utilizados no ensaio de potencial de produção de biogás.....	63
Tabela 12. Trabalhos relacionados ao biogás do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.	65
Tabela 13. Detalhamento dos equipamentos implementados no Laboratório de Desenvolvimento de Biocombustíveis.	76
Tabela 14. Custo estimado de gerenciamento de resíduos sólidos de acordo com a renda do país (US\$/tonelada).....	80
Tabela 15. Caracterização elementar dos resíduos orgânicos gerados na CUASO e utilizados para ensaio de potencial de produção de biogás.....	85
Tabela 16. Composição elementar considerada para o cálculo do potencial teórico de biogás dos resíduos da CUASO.	87
Tabela 17. Caracterização física dos resíduos orgânicos gerados na CUASO.	88
Tabela 18. Produtividade teórica de metano e biogás total e levando em consideração a degradabilidade.	91
Tabela 19. Caracterização físico-química dos reatores testados durante o ensaio de potencial técnico.	92

Tabela 20. Produtividade de biogás por sólidos totais, voláteis e matéria seca dos resíduos orgânicos da CUASO.....	95
Tabela 21. Produtividade de metano por sólidos totais, voláteis e matéria seca dos resíduos orgânicos da CUASO.....	96
Tabela 22. Potencial energético dos resíduos orgânicos da CUASO, de acordo com potencial teórico.....	99
Tabela 23. Potencial energético dos resíduos orgânicos da CUASO, de acordo com potencial de biogás.....	100
Tabela 24. Volumes propostos para as unidades operacionais.....	125
Tabela 25. Descrição das unidades principais da planta.....	125

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	23
1.1.1	Objetivo principal.....	23
1.1.2	Objetivos secundários	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1	Eficiência energética	25
2.1.1	Primeira Lei da Eficiência Energética.....	25
2.1.2	Segunda Lei da Eficiência Energética.....	26
2.1.3	Indicadores de Eficiência Energética	26
2.2	Eficiência energética na digestão anaeróbia.....	31
2.3	Fundamentos da digestão anaeróbia	33
2.3.1	Hidrólise.....	34
2.3.2	Metanogênese.....	38
2.3.3	Substratos de entrada	39
2.4	Resíduos orgânicos produzidos na Cidade Universitária	43
2.5	Reatores Anaeróbios.....	45
2.6	Parâmetros de operação.....	50
2.6.1	Tempo de retenção hidráulica	50
2.7	Biogás.....	51
2.7.1	Metano.....	52
2.8	Metano dissolvido da fase líquida	52
3	METODOLOGIA.....	56
3.1	Levantamento dos resíduos gerados no Campus	56
3.1.1	Coleta e preparação.....	57
3.1.2	Preservação das amostras.....	58
3.1.3	Caracterização	59
3.1.4	Cálculo do potencial teórico de produção de biogás	59
3.2	Determinação do Potencial Técnico de Produção de Biogás dos substratos ..	60
3.2.1	Descrição do equipamento.....	60
3.2.2	Produção de biogás	61
3.2.3	Descrição do ensaio.....	62
3.2.4	Cálculo da concentração de metano	63

3.3	Taxa de degradabilidade.....	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
4.1	Planejamento e implementação do Laboratório de Desenvolvimento de Biocombustíveis do Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEE)	65
4.1.1	Equipamentos e custos	68
4.2	Resíduos orgânicos gerados na Cidade Universitária.....	76
4.2.1	Restos de alimentos.....	77
4.2.2	Esgoto Sanitário	80
4.2.3	Resíduos de poda	83
4.3	Caracterização elementar e física dos resíduos orgânicos da CUASO	85
4.4	Cálculo do potencial teórico de produção de biogás.....	90
4.4.1	Poda e capina	90
4.4.2	Restos de alimento.....	90
4.4.3	Esgoto Sanitário	91
4.5	Determinação do potencial de produção de biogás e concentração de metano 92	
4.6	Potencial energético dos resíduos orgânicos da CUASO	97
4.7	Planta de aproveitamento energético a partir do biogás da CUASO.....	100
4.7.1	Concepção da planta	103
4.8	Usos finais do biogás e seu impacto econômico.....	106
4.9	Planta conceito de produção de biogás - Chamada Pública de Projetos Prioritário de Eficiência Energética PROPEE – 01/2016.....	107
5	CONCLUSÕES	108
5.1	Sugestões de trabalhos futuros.....	110
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
	ANEXO 1	124
	ANEXO 2	127

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ΔG	Variação na energia livre de Gibbs
ΔH	Variação da entalpia
ΔS	Variação da entropia
$^{\circ}\text{C}$	Graus celsius
a	Número de átomos de hidrogênio na molécula
ABiogás	Associação Brasileira de Biogás e Biometano
AGVs	Ácidos Graxos Voláteis
AMPTS	Automatic Methane Potential Test System
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AOV	Ácido Orgânico Volátil
b	Número de átomos de oxigênio na molécula
CBIO	Crédito de Descarbonização
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$	Etanol
CH_3OH	Metanol
CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de carbono
CONPET	Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados do Petróleo e do Gás Natural
CRUSP	Conjunto Residencial da Universidade de São Paulo
CSTR	Reator Contínuo de Tanque Agitado
CTH	Centro Tecnológico de Hidráulica
CUASO	Cidade Universitária Armando Salles Oliveira
DOE	Department of Energy (Estados Unidos)
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DVGS	Divisão Técnica de Gestão Socioambiental
e	Número de átomos de enxofre na molécula
$E_{\Delta H}$	Eficiência entálpica
EACH	Escola de Artes, Ciências e Humanidades
EISA	Energy Independence and Security Act
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes

FA	Filtro anaeróbio
GJ	Giga Joule
GWh	Gigawatt-hora
H ₂	Hidrogênio
H ₂ S	Ácido sulfídrico
HCO ₃ ⁻	Íon Bicarbonato
hp	Horse-Power
HU	Hospital Universitário
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEE	Instituto de Energia e Ambiente
kg	Quilograma
K _H	Constante da Lei de Henry
kWh	Quilowatt-hora
L	Litro
M	Massa
m ³	Metros cúbicos
mg	Miligrama
Mha	Mega hectares
mL	Mililitros
MM	Massa molar
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
n	Número de átomos de carbono na molécula
N	Número de mols
NH ₃	Amônia livre
NH ₄ ⁺	Íon amônio
Nm ³	Normal metro cúbico
P _a	Pressão da fase gasosa no momento da leitura, mbar
PEN	Política Energética Nacional
PIB	Produto Interno Bruto
P _L	Pressão da coluna de líquido acima do recipiente de medição
P _N	Pressão normal
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

PUSP-C	Prefeitura da USP, Campus Capital
P_v	Pressão parcial de vapor da água
Q	Vazão
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SAS	Superintendência de Assistência Social
SO_4^{-2}	Sulfato
ST	Sólidos totais
SV	Sólidos Voláteis
T	Temperatura
T_a	Temperatura do gás no interior do reator
T_N	Temperatura normal
ton	Tonelada
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
UASB	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo
USP	Universidade de São Paulo
V_i	Volume de gás produzido observado no dispositivo
V_N	volume do gás seco no estado normal
z	Número de átomos de nitrogênio na molécula

1 INTRODUÇÃO

O planeta tem que suportar a vida de mais de sete bilhões de pessoas, sendo que antes de se iniciar um período de declínio deste número, a população deve crescer em pelo menos mais três bilhões (CERVANTES et al., 2006; SANDERSON, 2013). Essa população necessita da produção de bens, serviços, alimentos, entre outros, e todos esses fatores são dependentes de um fluxo de energia, seja essa na forma de recursos disponíveis ou de métodos de extração e transformação dos mesmos, sendo que o processo de evolução da sociedade foi marcado sempre pela apropriação desses recursos e métodos (PONTING, 1991). No entanto, faz-se necessário compreender que eles – especialmente os recursos disponíveis – são finitos e que não vimos utilizando-os de maneira adequada, desrespeitando os limites do ambiente que os fornece e os repõe.

De acordo com estudo de Ercin e Hoekstra (2016), o crescimento da população, aliado com mudanças nos padrões de consumo, crescimento econômico e desenvolvimento tecnológico, poderá resultar em um crescimento da pegada hídrica de até 180% até 2050 - quando comparado com 2000, chegando à um consumo anual superior a 6.900 bilhões m³/ano.

No entanto, somente 2,5% da água total que cobre o planeta é doce e o uso intensivo de fertilizantes inorgânicos aliado à disposição incorreta de efluentes sanitários e agroindustriais nos corpos d'água tem diminuído drasticamente o volume utilizável desta parcela. Ou seja, além da baixa eficiência de aproveitamento deste recurso, outras atividades antropogênicas têm resultado em acelerada degradação do que está prontamente disponível.

No caso do uso do solo, as previsões são tão alarmantes quanto as referentes à água. Rapidamente, a ocupação do solo vem se expandindo não somente para a produção agrícola, mas também para a pecuária. Prevê-se que, no atual ritmo de crescimento, em 2030 não haja mais áreas florestais intactas, uma vez que a degradação do solo afeta negativamente de 1 a 2,9 Mha de área cultivável por ano (LAMBIN e MEYFROIDT, 2011).

Diversos economistas, tais como Malthus, Ricardo e Mill, previram que a escassez dos recursos naturais poderia levar a sociedade a menores níveis de crescimento econômico ou, eventualmente, ao seu recesso (BARNETT e MORSE, 2013).

De acordo com Mayumi (1991), a humanidade consome recursos que levaram um espaço de tempo muito grande para serem produzidos em uma taxa extremamente elevada. Este cenário resulta, além do consumo acima dos limites naturais de reposição, no aumento cada vez mais acelerado da entropia do planeta, bem como no acúmulo dos resíduos que, atualmente, são apenas parcialmente reaproveitados, tratados ou corretamente dispostos.

Com o advento da Revolução Industrial, além do incremento na taxa de consumo dos recursos naturais pelo homem, houve uma aglomeração da população nos centros urbanos. Como resultado, tem-se a extração de recursos do meio rural, seu consumo em centros majoritariamente urbanos, e, por fim, a produção concentrada de rejeitos – orgânicos e inorgânicos. Estando distantes dos locais de produção de alimentos, facilmente foram ignorados os problemas do campo, tais como erosão, decréscimo da produtividade, poluição dos corpos hídricos, entre outros. Destarte, é fácil compreender que os nutrientes removidos da terra não retornarão para a mesma em sua totalidade, uma vez que os rejeitos orgânicos são depositados em aterros sanitários, aterros controlados ou lixões localizados a grandes distâncias.

Tendo em vista a necessidade de retorno destes nutrientes para seu local de origem, ou seja, o campo, bem como a redução do impacto ambiental causado pelo atual sistema de produção e consumo, faz-se urgente a busca por tecnologias que propiciem um cenário, dentro da realidade do sistema capitalista, favorável ambiental, econômico e socialmente.

Neste sentido, a digestão anaeróbia da matéria orgânica (Figura 1) tem sido amplamente explorada, modelada, otimizada e aplicada em diversas partes do mundo, uma vez que é de conhecimento comum seu grande potencial energético ($1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 = 9,97 \text{ kWh}^1$). Este processo ocorre em um ecossistema onde diversos microrganismos trabalham interativamente na conversão de matéria orgânica em um efluente rico em nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, e em biogás, cujo maior e principal componente é o metano, que é uma fonte limpa e renovável de energia (VON SPERLING e CHERNICHARO, 2005).

¹ Em condições normais de temperatura e pressão (CNTp)

Figura 1. Ciclo sustentável da produção de energia a partir do biogás.

São diversos os resíduos que podem ser tratados pela via anaeróbia, sendo que se destacam os seguintes:

- Efluentes Sanitários
- Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos
- Vinhaça
- Dejetos bovinos e suínos
- Resíduos de alimentos
- Efluentes de abatedouros e frigoríficos
- Resíduos orgânicos industriais

A utilização desta tecnologia para o tratamento dos resíduos gerados permite – além da gestão eficiente de recursos hídricos, através da redução do potencial poluidor de efluentes e resíduos orgânicos – a produção sustentável de energia e o abatimento de emissões de gases do efeito estufa (GEE) (KAPARAJU e RINTALA, 2003).

Apesar das inúmeras vantagens apresentadas, o biogás ainda possui muitas barreiras a serem enfrentadas para uma total disseminação no mercado brasileiro como um recurso energético. Para se entender essas barreiras e, consequentemente, explorar as soluções das mesmas, alguns passos devem ser seguidos em termos de compreensão de potencial (Figura 2).

Figura 2. Avaliação do escopo de projetos
Fonte: Deublein e Steinhauser (2011)

O potencial teórico pode ser definido como toda a energia que, teoricamente, pode ser gerada a partir de um determinado volume em um espaço de tempo determinado. No entanto o aproveitamento deste potencial está relacionado a limites físicos e biológicos, a partir dos quais é possível se definir do potencial técnico, que é o realizável nas condições existentes. Este, por sua vez, só será aplicável se houver um retorno financeiro, ou seja, potencial econômico. Por fim, o potencial deduzido, ou potencial realizável, às vezes pode ser ainda menor do que o potencial econômico, uma vez que existem diversas razões para se rejeitar algum projeto, especialmente legislativas (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2011).

Assim sendo, a disseminação de uma tecnologia passa obrigatoriamente por um aperfeiçoamento do potencial técnico, que poderá resultar em maior viabilidade econômica desses projetos. Nesse sentido, a importância da atuação da academia, em sinergia com o setor privado, fica ainda mais destacada. Historicamente, o Instituto de Energia e Meio Ambiente possui grande envolvimento e relevância no desenvolvimento e discussão de políticas e tecnologias para o setor de biogás. No

entanto, não havia até recentemente no Instituto nenhum tipo de estrutura que permitisse um aprofundamento tecnológico dos alunos e pesquisadores. Sendo que essa solução pode ser uma maneira de garantir que os profissionais envolvidos no debate e criação de política voltadas à inserção do biogás na matriz energética possam produzir ações com efeito externo ao sistema político.

Portanto, o objetivo deste trabalho está centrado na compreensão do potencial de biogás para geração de energia elétrica atualmente desperdiçado no Campus Capital da Universidade de São Paulo através do levantamento dos resíduos existentes, seu potencial teórico e técnico de biogás e, por fim, a concepção do projeto de uma planta experimental de aproveitamento de biogás através de resíduos.

De forma inédita, esse trabalho deverá resultar em um conceito não apenas de uma planta, mas também de parque tecnológico na área de biogás. Ele poderá servir de base para a interação entre diversos grupos internos e externos à Universidade para o desenvolvimento do setor, propiciando uma plataforma de colaboração de grande relevância para o biogás no Brasil.

Ainda, a partir do desenvolvimento desta tese foi possível o surgimento de uma colaboração entre esses três atores essenciais no fortalecimento de uma nova fonte na matriz: Universidade, Sociedade Civil Organizada e Entidades Públicas de desenvolvimento de políticas. Isso se deve ao fato de este trabalho teve um olhar não somente de desenvolvimento acadêmico, mas também de necessidades da indústria e visão atual dos desenvolvedores de políticas públicas,

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo principal

Estimar o potencial de aproveitamento energético por biogás a partir dos resíduos orgânicos gerados na Cidade Universitária da USP.

1.1.2 Objetivos secundários

- Implementar um laboratório de processo de produção de biogás no Instituto de Energia e Ambiente;
- Qualificar os laboratórios pertinentes da USP para trabalhar com caracterização de resíduos;

- Quantificar, qualificar e mapear os resíduos orgânicos gerados na Cidade Universitária;
- Avaliar o potencial energético, teórico e técnico dos resíduos orgânicos gerados na Cidade Universitária;
- Propor um conceito de planta de aproveitamento energético dos resíduos orgânicos através da biodigestão;
- Fortalecer a colaboração entre diversos grupos, internos e externos à USP, no desenvolvimento do biogás no Brasil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tendo em vista o objetivo deste trabalho, esta tese iniciará com uma discussão dos diversos conceitos que podem ser aplicados à eficiência energética, e como eles podem ser aplicados. Em seguida, serão explorados os fundamentos da digestão anaeróbia e, mais profundamente, as etapas limitantes e quais técnicas podem ser utilizadas para melhoria de eficiência da recuperação energética. As tecnologias mais conhecidas de biodigestores serão brevemente comentadas após uma discussão sobre os resíduos gerados no campus.

2.1 Eficiência energética

Eficiência energética é um termo genérico que, em geral, se refere ao menor uso de energia para a máxima produção de uma determinada quantidade de produto ou serviço (efeito útil).

Existem diversos indicadores de eficiência energética, sendo comumente utilizados indicadores termodinâmicos, uma vez que os mesmos levam em consideração variáveis físicas de relativa fácil determinação. Desta forma, termodinamicamente é possível se utilizar os indicadores descritos a seguir.

2.1.1 Primeira Lei da Eficiência Energética

A Primeira Lei da eficiência, também chamada de eficiência entálpica, mede a eficiência de um sistema através da calor contido na entrada e do efeito útil na saída de um processo, sendo que calor é medido em termos de variação entálpica (ΔH):

$$E_{\Delta H} = \frac{\Delta H_s}{\Delta H_e} \quad (6)$$

Onde,

$E_{\Delta H}$ = eficiência entálpica

ΔH_s = soma da energia útil das saídas do processo

ΔH_e = soma da energia útil das entradas do processo

Esse parâmetro, no entanto, é um indicador somente da energia útil do processo, que não diferencia a qualidade da energia (PATTERSON, 1996).

2.1.2 Segunda Lei da Eficiência Energética

Numericamente é possível corrigir, ao menos, a questão da qualidade da energia, através da Segunda Lei da Termodinâmica e a aplicação da energia livre de Gibbs (ΔG) – Equação 7. Quando o processo ocorre à temperatura e pressão constantes, o decréscimo da energia livre de Gibbs representa o máximo trabalho que pode ser realizado em um processo.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (7)$$

Onde,

ΔG = variação na energia livre de Gibbs

ΔH = variação da entalpia

T = temperatura do processo

ΔS = variação da entropia

Nesse mesmo sentido, é possível também usar outras variáveis, como exergia e trabalho – levando-se em conta as condições físicas reais existentes, que são variáveis mais fáceis de serem obtidas. No entanto, ainda assim, autores apontam que a solução não elucida completamente o problema da qualidade de energia (PATTERSON, 1996).

2.1.3 Indicadores de Eficiência Energética

Diversos conceitos de indicadores para eficiência energética têm sido propostos, podendo ser medidos termos termodinâmicos, físicos, ambientais, monetários, entre outros.

Indicadores monetários são usados quando a eficiência energética é medida em um nível tão elevado de parâmetros agregados que é difícil o isolamento de um parâmetro físico ao longo de toda a cadeia. Esse tipo de indicador, dado como uma razão entre o consumo de energia e uma unidade monetária.

Indicadores físicos são calculados em um nível desagregado, ou seja, relacionando-se o consumo de energia à termo físico mensurável, – toneladas de material, quilômetros por passageiro, área de uma quadra. Esses indicadores são

comumente usados para se obter relações como intensidade energética, consumo unitário de energia, consumo específico de energia, entre outros (ANG, 2006).

A escolha do tipo de indicador de eficiência energética deverá levar em conta a aplicação final do indicador, bem como os parâmetros mensuráveis e as barreiras a serem enfrentadas. Na

Tabela 1 a seguir estão alguns indicadores utilizados e suas aplicações.

Tabela 1. Indicadores de eficiência energética utilizados em diversos estudos e suas aplicações.

Tipo de indicador	Indicador	Descrição
Econômico	Intensidade Energética	Consumo de energia/termo econômico
	Intensidade Energética	Consumo de energia/PIB
	Eficiência energética econômica	Entrada de energia em termos monetários/saída em termos monetários
	Medição de eficiência energética	Consumo de energia/valor adicionado
Físico	Consumo específico de energia	Uso de energia/unidade física de produção
	Consumo específico de energia	GJ/ton
	Melhoria da eficiência energética final	Energia poupada por ano
	Eficiência térmica de um equipamento	Energia disponível para produção/energia de entrada
	Intensidade de consumo energético	Consumo de energia/valor físico de saída
Continua		
Tipo de indicador	Indicador	Unidade

Físico	Quantidade absoluta de consumo de energia	Valor energético
	Intensidade Energética Industrial	Uso de energia/unidade industrial de saída, i.e. GJ/ton
	Consumo específico de energia	Uso de energia/unidade industrial de saída, i.e. GJ/ton
Híbrido	Eficiência energética física-termodinâmica	Energia efetivamente utilizada/toneladas
	Eficiência energética econômica-termodinâmica	Energia em termos convencionais da termodinâmica/preço
Termodinâmico	Eficiência energética termodinâmica	Energia relacionada a uma ideia de processo
Estatístico	Indicador de performance energética	Ranking percentual da eficiência energética

Fonte: Bunse et al., 2011

De acordo com Tanaka (2008), a importância da adoção do conceito de eficiência energética em processos industriais reside não apenas nos impactos ambientais do uso e produção de energia. A definição de critérios claros para determinação da eficiência energética em diferentes cadeias produtivas também impacta na elucidação de características, vantagens e desvantagens de cada cadeia a fim de se criar políticas públicas voltadas para a promoção de processos mais eficientes em termos de produção e uso de energia.

Exemplos da aplicação de indicadores de eficiência na criação de políticas públicas são encontrados em diversos países. O consumo mundial de eletricidade por acionamento de motores elétricos na indústria é responsável por 45% do consumo global de energia, e mais de 70% do consumo industrial total, sendo essa então uma prioridade (REINE, 2015). Assim, os Estados Unidos foram pioneiros na criação de uma política de determinação de padrões mínimos de eficiência em motores elétricos através do US Energy Policy Act (Figura 3), sendo depois também aplicado em

diversos outros países, como China, Brasil, Austrália, Japão, entre outros (GYNTHER, MUSTINEN e SAARIVIRTA, 2016).

Figura 3. Eficiência nominal mínima para motores pelos padrões federais americanos (Motor TEFC 4-polos, 1800 RPM).

Fonte: EIA, 2014.

Nos últimos anos têm se fortalecido as políticas de baixo carbono, que têm como objetivo produzir e consumir eficientemente energia com a menor emissão de carbono equivalente. Nesse sentido, destacam-se as políticas pioneiras do Japão (Lei de Conservação de Energia do Japão de 1979) e Holanda (Aliança de Benchmarking de Eficiência Energética de 1999), além de diversas iniciativas mais modernas em outros países (TANAKA, 2008).

Nesses termos, também o Brasil se destaca na criação de políticas de eficiência energética, que se iniciaram em 1981, através do Programa Conserve, que foi ampliado em 1985 na criação do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel).

Outros programas que também tiveram grande relevância, como o Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados do Petróleo e do Gás Natural (Conpet), o Programa Brasileiro de Etiquetagem e a Política Energética Nacional (PEN). No entanto, somente em 2001 foi publicada a Lei nº 10.295, que lançou a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia que estabeleceu diretrizes claras e sólidas para o desenvolvimento e promoção da eficiência energética em diversos âmbitos o que, inclusive, fortaleceu os programas anteriormente criados (ALTÓE *et al.*, 2017).

Para o setor de biogás, entretanto, os dois mais importantes marcos regulatórios relacionados à eficiência energética foram a Resolução ANEEL n° 482/2012, que trata da Geração Distribuída em centrais consumidoras que possuam sistemas de micro ou mini geração - e foi atualizada posteriormente pela Resolução ANEEL n° 687/2015 - e a publicação da Lei 13.576/2017, que trata da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio).

A Resolução ANEEL, que trata do acesso da microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, representa um conceito global de eficiência no qual inclui maior confiabilidade no setor elétrico, com redução das perdas de transmissão e distribuição, redução da demanda de energia de pico, prestação de serviços ancilares, aumento da qualidade da energia, redução da vulnerabilidade do sistema e melhoria na infraestrutura (EPA, 2007).

O Programa RenovaBio (Figura 4), por sua vez, traz um importante conceito de eficiência energética para o setor de biocombustíveis.

Figura 4. Funcionamento do RenovaBio.

Fonte: Lacerda, 2018

De acordo com o conceito proposto pelo Programa, serão remunerados por seu serviço ambiental os biocombustíveis através da criação dos Créditos de

Descarbonização (CBIOs). A grande inovação da proposta é que cada rota de produção será, individualmente, certificada. Com isso, será induzida a eficiência na produção de biocombustíveis, a fim de o produtor obter maior CBIO em sua rota.

2.2 Eficiência energética na digestão anaeróbia

A busca pela eficiência energética em plantas anaeróbias tem como objetivo maximizar a conversão de matéria orgânica em metano, com o menor gasto energético possível, ou seja, a temperaturas mais próximas à temperatura ambiente e baixo – ou nulo – gasto com agitação, resultando na máxima recuperação energética (EnRec) da matéria orgânica disponível (HARTLEY E LANT, 2006).

Considerando os métodos usuais de análise de eficiência energética explicitados anteriormente, se pode concluir que sistemas de produção de biogás podem ser demasiadamente complexos para uma análise termodinâmica, uma vez que compreendem etapas complexas e diversas rotas possíveis. Portanto, o balanço de energia do sistema como um todo, através da aplicação de um indicador físico pode ser um método viável para se obter uma eficiência integrada do sistema, de maneira a ser facilmente replicado em outros sistemas, no sentido de redução de custos energéticos da planta e maior recuperação energética dos substratos utilizados.

Considerando-se as inúmeras possibilidades de substratos, tecnologias de digestão e aplicação que são encontradas, a análise da eficiência global de uma usina de biogás deve sempre levar em consideração cada caso. Entretanto, de maneira geral, a cadeia produtiva do biogás até seu uso final pode ser delineada conforme apresentado na

Figura 5.

Figura 5. Cadeia de produção do biogás e seus possíveis usos.
Fonte: Autora.

2.3 Fundamentos da digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia, ou biodigestão, consiste em um processo complexo e contínuo no qual estruturas orgânicas complexas são reduzidas a compostos minerais simples por diferentes populações microbianas (MALINA e POHLAND, 1992). Este processo de conversão ocorre devido a um ecossistema onde diversos microrganismos trabalham interativamente na conversão de matéria orgânica, e deste processo resulta, principalmente, a formação de metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia (VON SPERLING e CHERNICHARO, 2005).

Como é possível observar na Figura 6, a biodigestão é dividida em quatro – em alguns casos cinco –, etapas principais (AHRING, 2003; CHERNICHARO, 2007):

1. Hidrólise: realizada por bactérias hidrolisadoras é a fase na qual ocorre o ataque inicial aos polímeros e monômeros encontrados na matéria orgânica a ser degradada;
2. Fermentação: conhecida também como acidogênese, é um processo intermediário realizado pelas bactérias fermentativas, na qual os produtos da hidrólise são transformados principalmente em acetato e hidrogênio, uma parte em ácidos graxos voláteis (AGVs), tais quais propionato e butirato, além de alguns álcoois de cadeia curta;
3. Acetogênese: realizada por bactérias acetogênicas convertem propionato e butirato em acetato e hidrogênio;
4. Metanogênese: os organismos metanogênicos, conhecidos como arqueas metanogênicas, são responsáveis pela etapa final, na qual é produzido metano a partir do acetato, CO_2 e H_2 ;
5. Sulfetogênese: ocorre somente na presença do sulfato (SO_4^{2-}) e é realizada por bactérias redutoras de sulfato.

Figura 6. Etapas básicas da digestão anaeróbia.

Adaptado de: Chernicharo, 2007,

Entender como essas etapas ocorrem e de que forma elas podem ser afetadas pelas diferentes condições de operação é fundamental para o melhor aproveitamento energético do substrato, especialmente pelo fato de os microrganismos envolvidos na hidrólise e na metanogênese diferirem muito em termos de fisiologia, necessidade nutricional, cinética de crescimento e sensibilidade às condições ambientais (POHLAND e GOSH, 1971). Portanto, será realizada uma revisão aprofundada a respeito dos microrganismos e o que afeta sua performance na digestão anaeróbia.

2.3.1 Hidrólise

A melhoria do processo primário de digestão anaeróbia resulta em um efeito benéfico não somente em termos energéticos, como na redução do tamanho dos equipamentos necessários nos processos secundários de tratamento (HARTLEY e LANT, 2006).

Como a relação entre os microrganismos presentes nesta cadeia é sintrófica, a conversão do conteúdo em energia disponível depende primordialmente da hidrólise, uma vez que os microrganismos envolvidos nas etapas seguintes necessitam da solubilização da matéria orgânica complexa em matéria que possa atravessar a parede celular das bactérias fermentativas (ANGELIDAKI e SANDERS, 2004; CHERNICHARO, 2007, KEATING, 2015).

Diversos fatores são fundamentais para a maior eficiência desse processo, tais como pH do meio, tamanho das partículas, temperatura do processo, concentração de $\text{NH}_4^+\text{-N}$, concentração dos produtos da fermentação (ácidos orgânicos voláteis, especialmente), tempo de retenção hidráulica e composição do substrato (CHERNICHARO, 2007), assim, o planejamento de um processo eficiente passa necessariamente pela compreensão destes fatores e de seu impacto na qualidade final da recuperação energética de cada substrato.

De acordo com Lettinga et al. (1993), essa etapa é naturalmente realizada por exoenzimas – celulases, proteases e lipases – excretadas pelas próprias bactérias fermentativas. No entanto, estudos têm realizado essa etapa de forma preliminar, em processos que passam por dois estágios, através de adição de agentes químicos e/ou outros métodos que para acelerar a etapa da hidrólise (Tabela 2). A pré-hidrólise, como é conhecido esse procedimento, tem sido apontada como um avanço importante no aumento da eficiência energética da digestão anaeróbia, uma vez que os processos seguintes são limitados pela concentração de substratos biodegradáveis e pelo fato de esta etapa ser a mais lenta de todas, sendo considerada, portanto, como limitante. Estima-se que 50% do material orgânico que entra no processo de digestão permaneça no primeiro estágio, devido à lentidão do processo enzimático de hidrólise (KEYMER et al., 2013; ALI SHAH et al., 2014; ARIUNBAATAR et al., 2014; OMETTO et al., 2014; ABELLEIRA-PEREIRA et al., 2015).

Especialmente no caso de resíduos com alto conteúdo de sólidos, como Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), resíduos de alimentos e de plantações, dejetos e lodo de ETE, há indícios na literatura de que o processo de pré-hidrólise pode resultar em um aumento significativo na eficiência da biodigestão, além de reduzir o tempo de digestão, impactando positivamente no tamanho das plantas (MATA-ALVAREZ, MACE e LLABARES; 2000).

Tabela 2. Diferentes métodos de pré-tratamento para diversos substratos

Substrato	Pré-tratamento	Referência
Lodo de ETE	Tratamento térmico	Ferrer et al. (2008)
Resíduo de plantas	Tratamento termo-químico	Fernandes et al. (2009)
Folha do milho	Tratamento por enzimas	Romano et al. (2009)
Resíduo de alimentos	Moagem	Izumi et al. (2010)
Dejeto de suínos	Tratamento térmico, termo-químico e químico	Rafique et al. (2010)
Resíduo de alimentos	Acidificação, tratamento térmico, termo-acidificação, pressurização-despressurização e congelamento-descongelamento	Ma et al. (2011)
RSU	Pressurização, tratamento térmico, termo-químico e biológico	Güelfo et al. (2011)
Biomassa de algas	Tratamento térmico	González-Fernández et al (2012)
Biomassa de algas	Microondas	Passos et al. (2013)
Resíduo da indústria de papel e celulose	Tratamentos mecânicos	Elliott e Mahmood (2012)
Resíduos de madeira	Tratamento químico alcalino	Salehian et al. (2013)

O pré-tratamento tem como objetivo a redução do tamanho da partícula e, por consequência, aumento da superfície de contato do substrato com as bactérias, o que pode resultar no aumento significativo da produção de metano. Pesquisas demonstram, até agora, um aumento de até 25% da produção de

biogás para substratos com alto teor de fibras, como silagem e resíduos de poda com a utilização de tratamento mecânico (HARTMANN, ANGELIDAKI e AHRING, 1999² apud MATA-ALVAREZ, MACÉ E LLABRÉS, 2000), 52% para o pré-tratamento térmico de resíduos de alimentos (ARIUNBAATAR et al., 2014) e até 172,4% de aumento para o pré-tratamento alcalino da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (TORRES e LLORÉNS, 2008).

No caso de resíduos de alimento, o estudo de Izumi et al. (2010) demonstra que a pré-hidrólise reduz significativamente o impacto dessa etapa limitante, devido ao tamanho das partículas presentes nesse substrato, uma vez que a redução do tamanho da partícula próximo a 50% do tamanho original pode dobrar a produtividade de biogás, e a redução das fibras pode aumentar em até 22% o rendimento de metano.

Apesar de as técnicas de pré-tratamento apresentarem diversas vantagens, elas também podem impactar de maneira negativa no processo (Tabela 3), sendo que as desvantagens variam de acordo com a localização e tecnologia da planta, além do tipo de substrato digerido. Portanto, deve ser realizada uma avaliação preliminar cuidadosa que leve em consideração todos os aspectos envolvidos na utilização de um estágio anterior à biodigestão.

Tabela 3. Vantagens e desvantagens da pré-hidrólise

Tratamento	Vantagens	Desvantagens
Químico	Redução do acúmulo de AGVs no tratamento de substratos com alto conteúdo lipídico	Necessidade de grandes volumes de reagente, resultando em alto custo
Termoquímico	Aumento na quantidade de matéria solúvel e redução de AGVs no tratamento de substratos complexos	Alto custo e redução da eficiência energética do sistema
Continua		

² HARTMANN, H., ANGELIDAKI, I., AHRING, B. K. Increase of anaerobic degradation of particulate organic matter in full-scale biogas plants by mechanical maceration. Water Science and Technology, v. 41, n. 3, p. 145, 2000.

Tratamento	Vantagens	Desvantagens
Bioquímico	Redução do tamanho das partículas, especialmente de substratos fibrosos e com alto conteúdo lipídico	Alto custo e necessidade de controle fino de pré-processo
Mecânico	Redução do tamanho das partículas	Alto custo, e dificuldade de manutenção, superdimensionamento pode reduzir a produção de biogás

Adaptado de: Ward et al. (2008)

2.3.2 Metanogênese

Etapa na qual ocorre a conversão final da matéria orgânica em compostos químicos estáveis - metano e gás carbônico -, sendo que aproximadamente 70% utiliza como substrato o ácido acético e 30% é proveniente da reação de redução do hidrogênio e dióxido de carbono (JAIN et al., 2015). A metanogênese é realizada por organismos estritamente anaeróbios que, quando comparados a outros grupos microbianos, são extremamente sensíveis às condições desfavoráveis ao seu crescimento. Esses são classificados como *Archea*, que por sua vez estão distribuídas em cinco ordens: *Methanobacteriales*, *Methanococcales*, *Methanomicrobiales*, *Methanosarcinales* e *Methanopyrales*. As arqueas vivem em simbiose com os microrganismos acetogênicos, e quando há algum distúrbio na metanogênese, há acúmulo de produtos intermediários – majoritariamente ácidos – no reator, acarretando em um processo conhecido como *overacidification*, que afeta drasticamente os grupos acetogênicos (CHERNICHARO, 2007; DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008).

A metanogênese é classificada como um processo exergônico, ou seja, libera energia livre, e as principais reações envolvidas, bem como a energia específica liberada em cada uma, estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4. Reações metanogênicas e energia liberada

Reação química	$\Delta G'_f$ (kJ.mol ⁻¹)
$4\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$	-135,4
$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	-131,0
$4\text{HCOO}^- + \text{H}_2\text{O} + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{HCO}_3^-$	-130,4
$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^-$	-30,9
$4\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$	-314,3
$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-113,0
$2\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{CH}_3\text{COOH}$	-116,3

Adaptado de: Deublein e Steinhauser (2008)

Quando uma etapa de pré-tratamento é adicionada ao processo de biodigestão, a população metanogênica tende a ter maior facilidade de conversão do substrato em metano. No entanto, deve existir um planejamento adequado desse pré-tratamento para evitar inibição dessa população metanogênica devido a sua elevada sensibilidade a diversos fatores.

Resíduos com alta concentração de proteína, quando hidrolisados, resultam em amônia, basicamente em duas formas: livre (NH_3) ou íon amônio (NH_4^+). A amônia livre é relatada como uma das principais causas de inibição das populações metanogênicas, podendo também ser danosa à população acidogênicas em concentrações acima de 4 g $\text{NH}_3\text{-N.L}^{-1}$ (CHEN, CHENG e CREAMER, 2008).

2.3.3 Substratos de entrada

Apesar de diversas variáveis afetarem a composição do biogás, a mais relevante delas é a composição do substrato tratado. A degradação de lipídios resulta em uma produtividade de 1200-1250 $\text{Nm}^3_{\text{biogás}}/\text{tonST}$, concentração de metano entre 67-74%; enquanto a de proteínas resulta em um potencial de 700 $\text{Nm}^3_{\text{biogás}}/\text{tonST}$ com 50-71% de metano e a degradação de carboidratos pode render 790-800 $\text{Nm}^3_{\text{biogás}}/\text{tonST}$ com 50% de metano (XIE *et al.* 2012).

Desta forma, rendimento em biogás de um substrato varia de acordo com a sua origem e composição, conforme pode ser observado na Figura 7 e

Tabela 5.

Figura 7. Rendimento teórico de biogás para diversos substratos
Adaptado de: Weiland (2010)

Tabela 5. Porcentagem média de metano no biogás para diversos substratos.

Substrato	CH ₄ (%)	Referência
Esgoto doméstico	61-65	Rasi, Veijanen e Rintala (2007)
Esgoto doméstico	57,8	Spiegel e Preston (2003)
Esgoto e lodo de cervejaria	63-72,9	Babel, Sae-Tang e Pecharaply (2009)
Lodo de esgoto	68,8-69	Boušková <i>et al.</i> (2005)
Lodo de esgoto	66	Boušková <i>et al.</i> (2005)
Lodo de esgoto	64,7±2,6	Song, Kwon e Woo (2004)
Lodo de esgoto	63,6±1,8	Song, Kwon e Woo (2004)

Continua

Substrato	CH ₄ (%)	Referência
Lodo de esgoto	64,1±1	Pastor <i>et al.</i> (2008)
Lodo de esgoto e microalga	77±1	Caporgno <i>et al.</i> (2015)
Lodo de esgoto e óleo usado	76,3±4,9	Pastor <i>et al.</i> (2013)
RSU e esgoto doméstico	68-72	Elango <i>et al.</i> (2007)
Restos de alimentos	86 – 88%	Cho, Park e Chang (1995)
RSU	70 – 80%	Hansen <i>et al.</i> (2007)
Lodo de esgoto	69%	Fitamo <i>et al.</i> (2016)
Lodo de esgoto, alimento e poda	59 – 68%	Fitamo <i>et al.</i> (2016)
RSU	64-72%	Campuzano e González-Martínez (2015)

Diversas metodologias podem ser aplicadas para a determinação do potencial energético de um determinado substrato, sendo experimentalmente mais comum a aplicação da Determinação de Potencial Metanogênico, seja por equipamentos sofisticados como AMPTS (Bioprocess Control) e o Biogas Batch Fermentation System (Ritter) ou de sistemas mais tradicionais, como os eudiômetros (Figura 8).

A

B

Figura 8. Sistema de determinação do potencial metanogênico via (A) AMPTS e (B) eudiômetros.

Fontes: Bioprocess Control e CIBiogás

Apesar dos excelentes resultados obtidos através de experimentos, esses demandam de grande investimento em capital e tempo, o que é muitas vezes inviável ou desnecessário.

Desta maneira, de modo preliminar, se pode calcular a produtividade teórica e a concentração de metano um determinado substrato através de sua análise elementar e aplicação dos valores em algumas fórmulas estequiométricas (HUOKA *et al.*, 2016), já conhecidas:

- Buswell e Mueller (1952)

- O'Rourke (1968)

- Boyle (1976)

- Sobotka (1983)

$$\%CH_4 = \frac{\left(4 + \frac{a}{n} - \frac{2b}{n} - 3\frac{z}{n}\right)}{8} \cdot 100 \quad (11)$$

1.3.1.1 Co-digestão

A co-digestão também tem sido aplicada como uma solução, não somente pela melhora na eficiência de conversão da matéria orgânica em biogás, mas também por viabilizar economicamente plantas menores. Em regiões com baixa disponibilidade de resíduos sólidos urbanos ou esgoto, é possível a construção de plantas centralizadas que recebam diversos resíduos de seu entorno, como dejetos animais, resíduos da agroindústria, entre outros, como já aplicado em países como Noruega e Reino Unido.

A grande vantagem da co-digestão, comparada com outras técnicas para otimização da produção de biogás, é que a aplicação de um modelo matemático simples pode otimizar as quantidades de mistura de resíduos a partir da necessidade ou limite de nutrientes do substrato principal, podendo chegar a 50% de aumento de eficiência somente com bom dimensionamento da operação da planta (BANKS *et al.*, 2011).

A co-digestão é vista por alguns autores, inclusive, como um dos mais efetivos métodos de pré-tratamento, uma vez que traz resultados significantes sem gasto energético (MARAÑÓN *et al.*, 2012). Isso por que a mistura entre substratos com elevado teor de nitrogênio, como resíduos de capina, pode equilibrar a relação C/N de resíduos de alimentos, que apresenta rápido acúmulo de Ácidos Orgânicos Voláteis (AOVs) e, portanto, limitação da etapa metanogênica (YE *et al.*, 2013).

2.4 Resíduos orgânicos produzidos na Cidade Universitária

A Cidade Universitária Armando Salles Oliveira (CUASO) está localizada na Cidade de São Paulo, com uma circulação de mais de 122 mil pessoas por dia, uma área total de 3.600.000 m² – sendo aproximadamente 25% desse total áreas verdes e ajardinadas – e uma rotina de serviços muito similar à uma pequena cidade. O Campus conta com serviço de bancos, circulação de mais de 50 mil veículos por dia, múltiplos restaurantes, hospital, habitação e outros diversos tipos de serviços (PUSP-C, 2016).

De acordo com Mellucci *et al.* (2015), a gestão dos resíduos da Universidade é um processo relativamente novo, uma vez que a Prefeitura do campus inseriu em sua estrutura uma área responsável por esse gerenciamento

em 2011, que ainda não possui uma política de gerenciamento delineada como um todo.

No entanto, a Divisão Técnica de Gestão Socioambiental (DVGS) já realizou um importante levantamento de dados gerais de geração de resíduos sólidos urbanos, a partir do qual foi possível compreender a sazonalidade (Figura 9), bem como o volume médio de produção *per capita*, de 0,16 kg/hab.dia.

Figura 9. Geração mensal de RSU na CUASO e EACH

Fonte: Mellucci *et al.* (2015)

Dentre os resíduos orgânicos com maior volume de produção estão: restos de alimentos gerados nas lanchonetes e restaurantes, podas e resíduos de jardinagem e esgoto sanitário.

A composição do resto de alimento é altamente propícia para a produção de biogás. Conforme exposto anteriormente, restos de alimentos possuem o terceiro maior potencial de produção de biogás e quanto maior a presença de gorduras nesse resíduo, melhor será seu potencial energético. Apesar de variar demasiadamente sua composição, resíduos de restaurante apresentam uma relação C/N de 11,4 a 36,4, matéria seca de 4 a 41%, uma boa degradabilidade - uma vez que do total de matéria seca, mais de 88% é volátil -, de 3,3 a 59% de carboidratos e de 1,4 a 22,8% de proteínas (XU *et al.*, 2018).

Podas e resíduos de jardinagem são ricos em lignina (10 a 50%), tornando o processo de biodigestão desse substrato mais lento. Comumente o resíduo de poda possui em torno de 40% de matéria seca - sendo mais de 90% orgânica -, uma relação C/N de 52, 1 a 5% de carboidratos e 1 a 15% de proteínas (BARATTA Jr., 2007; PUYUELO *et al.*, 2011; TAKATA *et al.*, 2013).

O esgoto sanitário, diferente dos dois outros resíduos estudados, possui baixa quantidade de matéria seca (0,1%), sendo em torno de 70% dessa matéria orgânica, dividida em 40 a 60% de proteínas, 25 a 50% de carboidratos e 10% de gordura (LAPUERTA, HERNÁNDEZ e RODRIGUEZ, 2014).

Tabela 6. Dados de literatura da composição elementar dos resíduos orgânicos típicos da Cidade Universitária.

Elemento	Restos de Alimentos ¹	Restos de Podas ²
	%	%
C	48	47,08
H	6,4	6,5
O	37,6	45,73
N	2,6	0,51
S	0,4	0,22

¹ Curry e Pillay, 2012

² Lapuerta, Hernández e Rodríguez, 2004

Diversos estudos têm apontado as vantagens da codigestão de resíduos de poda, com esgoto e restos de alimentos, especialmente para balanço da relação C/N, no sentido de maximizar a produção de biogás.

Brown e Li (2013), encontraram em sua pesquisa de bancada uma produção maior de biogás e maior concentração de metano quando foi adicionado 10% de restos de alimentos, em uma digestão em estado sólido de resíduos de poda, além de redução do TRH, uma vez que o resto de alimento proporcionou menos acúmulo e AOVs e quebra da lignina resultando, conseqüentemente, em recuperação do conteúdo energético da poda mais rapidamente.

No caso da adição de esgoto sanitário, a digestão é favorecida pelo aumento da capacidade de tamponamento da solução, e aumento da concentração de metano (ZHANG *et al.*, 2014).

2.5 Reatores Anaeróbios

Após a compreensão profunda das características do substrato a ser tratado, um planejamento adequado da planta tem como próxima etapa a determinação da tecnologia a ser utilizada. Nesta seção será realizada uma

revisão das principais tecnologias adotadas ao redor do mundo, suas vantagens e desvantagens.

Reatores anaeróbios podem ser entendidos, basicamente, como compartimentos fechados ausentes de oxigênio que criam o ambiente propício para o desenvolvimento dos grupos bacterianos apresentados anteriormente. Um bom dimensionamento desses equipamentos deve permitir, basicamente: elevadas taxas de carregamento orgânico, curtos tempos de retenção hidráulica, produzir o máximo de metano e, conseqüentemente, menor volume de lodo.

Os sistemas de tratamento podem ser classificados levando em consideração diversos aspectos, sendo os mais comumente utilizados:

- Quanto à **existência ou ausência de um sistema de retenção de biomassa**, sendo chamados *convencionais* os reatores que não possuem um sistema de retenção da biomassa, tais como os reatores do tipo CSTR (Reator Contínuo de Tanque Agitado, em inglês, *Continuous Stirred Tank Reactor*) , lagoas cobertas e fossas sépticas. No caso dos equipamentos que possuem um sistema de retenção, são chamados reatores de *alta taxa*. Dentre esses, pode-se citar o reator UASB (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo, em inglês, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor*), os reatores de leito fixo, reatores de leito fluidizado, dentre outros.

- Quanto ao **total de sólidos**, nesse tipo de classificação, mais comum na Europa, são nomeados “molhados” – *wet* – reatores que trabalham com percentuais de sólidos totais de até 16%, enquanto que reatores que trabalham com porcentagens entre 22 e 40% são nomeados “secos” – *dry*.

- Quanto à **alimentação**, sendo os reatores nos quais o substrato é carregado de maneira regular, sem interrupção, chamados reatores *contínuos* e aqueles em que a alimentação do substrato tem um intervalo são chamados reatores em *batelada*.

Os tipos mais rudimentares de sistemas anaeróbios são as conhecidas lagoas cobertas. Nos anos 70 foram muito disseminadas não apenas no Brasil, mas também em outros países da América, como Estados Unidos (LEUER, HYDE e RICHARD, 2008). Assim como aconteceu nacionalmente, nos EUA essa tecnologia falhou em suas expectativas, devido aos seguintes motivos:

- falta de conhecimento dos agricultores na operação e manutenção desses sistemas;
- equipamento inadequado para um bom aproveitamento energético;
- projetos não atentavam para as características particulares de cada projeto;
- pouco ou nenhum retorno financeiro

Figura 10. Sistema de lagoa coberta instalado na granja Colombari.
Fonte: UOL Economia (2013)

Além dos problemas usuais tratados acima, lagoas cobertas são adequadas, em sua maioria, para o tratamento de substratos com no máximo 2% de sólidos. Quando a carga de sólidos está acima do aconselhável, a operação do sistema é prejudicada, o que acontece usualmente na utilização de lagoas cobertas para o tratamento de dejetos animais, aplicação comum no Brasil.

Devido às limitações na retenção de biomassa e agitação, lagoas cobertas possuem baixa eficiência de conversão de matéria orgânica em biogás e necessidade de um alto tempo de retenção hidráulica, tornando esses sistemas pouco atrativos para plantas de valoração energética e mais adequados a sistemas que visem remoção de matéria orgânica e patógenos (VIANCELLI *et al.*, 2013) a custos relativamente baixos.

Ainda se tratando de reatores convencionais, são muito conhecidos os CSTRs, ou tanques agitados, representado na Figura 11. Esses reatores podem

ser empregados no tratamento de resíduos com maior conteúdo de matéria seca, como dejetos de bovinos, RSU, silagem, bagaço de cana-de-açúcar, palha, entre outros. O CSTR tem como característica o baixo custo e a simplicidade operacional, no entanto, não possui um sistema de retenção da biomassa, o que faz com que a conversão da matéria orgânica tratada em metano seja menor do que em reatores de alta taxa.

Figura 11. Diagrama esquemático do reator do tipo CSTR.

Ainda assim, é um reator de larga aplicação e tem recebido atenção de grupos de pesquisa pelo Brasil. Essa atenção deve-se basicamente à facilidade de operação e, por conseguinte, baixa necessidade de mão-de-obra especializada; alta estabilidade operacional, mesmo na ausência de mecanismos de automação mais sofisticados, permitindo uma fácil implementação, operação e manutenção, inclusive em comunidades mais afastadas.

Figura 12. Bidigestor do tipo CSTR em Langendorf (Alemanha)

Fonte: OWS (http://www.ows.be/organic_feedstock/cstr/)

Já no âmbito de reatores de alta taxa, se pode citar os seguintes mais conhecidos e difundidos: Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo (UASB), Filtro Anaeróbio (FA), Reator Anaeróbio de Leito Expandido (EGBS).

Figura 13. Representação de reator UASB.

Adaptado: Zheng *et al.* (2013)

Destes, o UASB (Figura 13) se destaca pela sua ampla utilização. Foi desenvolvido na Holanda, na década de 70 e tem como características principais os baixos tempos de retenção hidráulica (TRH) e elevados tempos de retenção de sólidos (VON SPERLING e CHERNICHARO, 2005), devido à utilização de um sistema separador trifásico. Quando o fluido em ascensão chega ao topo do

reator este é composto basicamente de efluente tratado, biogás e poucas partículas de lodo, mais leves. O separador trifásico então faz o direcionamento das bolhas de biogás contidas na fase líquida para a cavidade central, de forma que o líquido penetre a cavidade lateral propícia à decantação e as partículas de lodo sofram um impacto na zona refletora, retornando então para a manta de lodo.

Uma maneira de se melhorar a recuperação energética de resíduos complexos ou com elevada quantidade de sólidos é a digestão em duas fases, através da combinação dos reatores CSTR e UASB (JEIHANIPOUR *et al.*, 2013; DIAMANTIS *et al.*, 2014), que nada mais seria do que o processo de pré-tratamento da matéria orgânica complexa no reator CSTR para posterior tratamento fino no reator UASB.

2.6 Parâmetros de operação

A escolha dos parâmetros de operação tem influência direta na qualidade do efluente, eficiência energética e nos custos de implementação e de operação da unidade, ou seja, na sua viabilidade financeira.

Assim, a abordagem dos principais parâmetros de operação que será tratada aqui levará em consideração o conjunto técnico, ambiental e energético como critério, tendo em vista sempre a maior recuperação energética possível.

2.6.1 Tempo de retenção hidráulica

O Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) é a medida do tempo necessário para a entrada do substrato, passagem por todas as fases da digestão anaeróbia, até sua máxima conversão em biogás ou lodo.

Através da decisão do TRH ideal para o substrato a ser tratado, é possível se calcular o volume do reator, tendo em vista a disponibilidade de substrato, através da seguinte fórmula:

$$V_R = TRH \times Q \quad (12)$$

Na qual, V_R é o volume do reator, em m^3 ; TRH em dias (d), e Q é a vazão de substrato, em m^3/d .

No caso de reatores de mistura completa, quando o TRH aplicado é muito baixo, pode ocorrer acidificação do reator, resultando em baixa eficiência de remoção de matéria orgânica e, conseqüentemente, menor recuperação energética (KIM *et al.*, 2006). Em contrapartida, TRHs muito elevados podem encarecer demasiadamente a planta, uma vez que impactará no volume do reator, bem como de equipamentos acessórios.

Em estudo publicado em 2017, D'Aquino *et al.*, demonstrou que o aumento de 50% no TRH resulta em uma recuperação de energia 20% superior por grama de sólidos voláteis removidos. No entanto, o impacto de 50% no volume do reator resultará também na necessidade de maior gasto energético para manutenção da temperatura e agitação, o que deve ser cuidadosamente analisado na tomada final da decisão. Ainda, o mesmo estudo demonstrou que um TRH menor possui maior capacidade de absorção de alterações na Carga Orgânica Volumétrica (COV), uma vez que o rendimento de metano se manteve mais estável do que em um maior TRH (D'AQUINO, MELLO E COSTA, 2017).

2.7 Biogás

A composição do biogás é variável de acordo com o substrato a ser mineralizado, no entanto, há de 55 a 75% de metano (CH_4), 30 a 45% de dióxido de carbono (CO_2) e 5 a 15% de nitrogênio (N_2). Ainda, é possível que algumas composições apresentem traços de outros gases, como sulfeto de hidrogênio (H_2S) ou outros compostos sulfurosos, além de siloxanos e compostos halogenados (RASI, VEIJANEN E RINTALA; 2007).

O biogás com 65% de metano tem poder calorífico próximo a 5.339 kcal/m³. Comparativamente, 1 m³ de biogás com 65% de metano equivale a 0,6 m³ de gás natural; 0,882 litros de propano; 0,789 litros de butano; 0,628 litros de gasolina; 0,575 litros de óleo combustível; 0,455 kg de carvão betuminoso ou 1,602 kg de lenha seca (FEDALTO *et. al.*, 2011).

Tabela 7. Características do biogás.

	55 – 75% de metano (CH_4)
Composição	30 – 45 % de dióxido de carbono (CO_2)
	Traços de outros gases

Conteúdo energético	6,0 – 6,5 kWh.m ⁻³
Limite de explosão	6 – 12% de biogás no ar
Temperatura de ignição	650 - 750 °C
Pressão crítica	75 – 89 bar
Temperatura crítica	- 82,5 °C
Densidade normal	1,2 kg.m ⁻³
Massa molar	16,043 g.mol ⁻¹

Fonte: RASI, VEIJANEN, RINTALA, 2007; FEDALTO *et al.*, 2011

2.7.1 Metano

O metano é um gás incolor, principal produto da digestão anaeróbia e também o principal combustível do gás natural. É o hidrocarboneto mais simples e sua molécula (CH₄) é tetraédrica e apolar. O metano puro, nas condições normais de temperatura e pressão, possui poder calorífico inferior aproximadamente igual a 8,12 kcal.m⁻³.

A composição do biogás pode ser parcialmente controlada, de acordo com Deublein e Steinhauser (2008), dependendo de alguns fatores:

- Adição de quantidades adequadas de hidrocarbonetos de cadeia longa e substratos ricos em gorduras podem ajudar na melhoria da composição do gás, porém, em excesso, podem resultar em acidificação do reator;
- Gerenciamento cuidadoso com o TRH. Quando maior tempo de contato entre a matéria orgânica e as bactérias, maior será a produção de metano, no entanto, após o fim da matéria disponível para digestão, há um incremento da quantidade de CO₂, o que pode afetar drasticamente a etapa de hidrólise;
- A fermentação ocorre de maneira muito mais efetiva e eficiente se o inóculo utilizado for corretamente ativado, diminuindo o tempo de retenção, além de aumentar a qualidade do biogás;
- Manter a pressão interna do reator elevada melhora a qualidade do biogás, pois o CO₂ fica dissolvido na água.

Essas são estratégias que podem – e devem – ser exploradas ainda na etapa de planejamento de uma planta de aproveitamento energético de resíduos, pois, como foi exposto anteriormente, existe grande influência da característica específica de cada substrato no processo de digestão anaeróbia.

2.8 Metano dissolvido da fase líquida

Devido à sua baixa solubilidade, o metano produzido através de uma reação anaeróbia é liberado rapidamente da fase líquida. No entanto, estudos vêm comprovando que a solubilização do metano na fase líquida dos reatores anaeróbios tem sido um dos responsáveis pela diminuição drástica da sua recuperação nestes sistemas (MORAIS, 2012). O descarte deste metano dissolvido pode resultar, além de uma perda representativa de energia, em um problema ambiental, uma vez que o metano é um poderoso gás do efeito estufa (BANDARA *et al.*; 2011). Existem diversos estudos da oxidação do metano dissolvido no efluente, tendo em vista somente a redução de sua emissão, através, principalmente, de biofiltros (HATAMOTO *et al.*, 2010). No entanto, este processo não permite o aproveitamento energético do metano dissolvido, o que é uma variável importante na eficiência energética dos processos anaeróbios.

Tabela 8. Porcentagem de metano dissolvido em diversos tipos de reatores anaeróbios

Reator	Substrato	Metano dissolvido	Referência
Leito fixo	Sintético	30-70%	Hatamoto <i>et al.</i> (2010)
UASB	Sintético	11 ±3%	Bandara <i>et al.</i> (2011)
AMBR	Esgoto doméstico	3 – 11%	Hartley e Land (2006)

A transferência dos gases produzidos durante a digestão anaeróbia (metano, dióxido de carbono, entre outros) da fase líquida para a fase gasosa tem influência na eficiência das reações bioquímicas, uma vez que esses gases possuem um efeito inibidor sobre algumas das etapas (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008).

Portanto, para que se possa compreender este processo e sugerir melhorias no mesmo, faz-se necessário entender a Lei de Henry, que explica as leis de solubilidade de gases. A Lei de Henry estabelece que a massa dissolvida

de um gás em um determinado volume de líquido, a uma temperatura constante, é proporcional à pressão do gás em equilíbrio com a fase líquida (DUTTA, 2007). De maneira matemática:

$$K_H = \frac{C_{\text{equil}}}{P_{\text{gás}}} \quad (13)$$

Onde K_H é a constante da Lei de Henry para um gás a determinada temperatura ($\text{mg.L}^{-1}.\text{atm}^{-1}$), C_{equil} é a concentração do gás dissolvido no líquido (mg.L^{-1}) e $P_{\text{gás}}$ é pressão parcial do gás acima da interface (atm).

A pressão parcial do metano na fase líquida em equilíbrio com sua parcela dissolvida na fase líquida é que resulta na transferência entre as fases dentro de um sistema, até sua concentração de saturação. Não considerar a existência de uma interface de transferência entre estas fases pode levar a erros importantes no balanço de massa das espécies envolvidas no processo de digestão anaeróbia. Ainda, a capacidade de transferência entre as fases depende, além da natureza do gás, de fatores externos como propriedades físico-químicas diversas e condições de operação do reator. Dentre os principais fatores que alteram a solubilidade dos gases no meio aquoso, podemos citar temperatura, pH, matéria orgânica e compostos dissolvidos (MORAIS, 2012; SOUZA, 2010). Por exemplo, aplicando-se a Lei de Henry a um reator anaeróbio que opera a 35°C e produz biogás com uma concentração de 65% de metano, pode-se determinar que há $0,74 \text{ mmol.l}^{-1}$ de metano dissolvido no efluente deste reator (MATSUURA *et al.*, 2010).

A partir da combinação destes vários fatores ambientais e o entendimento da Lei de Henry, torna-se possível a concepção de sistemas para remoção do metano dissolvido na fase líquida em reatores anaeróbios, nos quais a força direcional de transferência da fase líquida para a fase gasosa é expressa como a diferença entre a concentração atual do gás dissolvido e sua concentração no equilíbrio considerando-se a pressão parcial de todas as espécies na fase gasosa (Pauss *et al.* (1990)).

Muitas são as teorias que buscam esclarecer os mecanismos de transferência de massa entre duas fases. Dentre as mais comumente utilizadas, destaca-se a teoria dos dois filmes, a qual assume que a difusão molecular

ocorre, e encontra resistência, nas camadas de gás e líquido existentes na região logo acima da interface entre as duas fases. Sendo que a resistência total na transferência entre as duas fases é a soma da resistência para o filme líquido e para o filme gasoso (SANTOS *et al.*, 2012; SOUZA, 2010).

De forma espontânea, a transferência de massa se dá pelo processo de difusão, no qual as partículas se movem de regiões mais concentradas para regiões menos concentradas. No entanto, este processo é lento, ocorrendo em uma velocidade de aproximadamente 10 cm.min^{-1} em líquidos, e pode ser acelerado por diversas técnicas.

Algumas alternativas de recuperação, tanto do metano quanto do ácido sulfídrico dissolvidos, têm sido testadas em reatores anaeróbios, tais como microaeração, membranas, *stripping* e pós-reator. No entanto, as técnicas atuais ainda têm se mostrado com pouca viabilidade econômica (GLÓRIA *et al.*, 2015). Ainda, como pôde ser observado na Tabela 8, gases dissolvidos são encontrados somente em reatores de alta taxa, que possuem taxa de mistura e carregamento constantes, a fim de se evitar distúrbios nos leitos que estão, em sua maioria, liofilizados ou em suspensão.

Essa situação não é encontrada em reatores de mistura completa nem de batelada, uma vez que esses reatores permitem agitação do meio, causando distúrbio entre as fases e remoção do metano contido na fase líquida.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão definidos os procedimentos para realização das coletas, a periodicidade e normas adotadas das análises quantitativas e qualitativas das amostras, os parâmetros dos ensaios de bancada e, por fim, o método científico aplicado para a projeção da planta conceito de aproveitamento de biogás.

Esse trabalho está dividido em quatro etapas que se complementam:

- I. Determinação qualitativa e quantitativa dos resíduos gerados e seu conteúdo energético;
- II. Determinação do potencial energético teórico dos resíduos;
- III. Determinação do potencial energético técnico máximo por meio de Teste de Potencial de Biogás;
- IV. Concepção de uma planta de aproveitamento energético de resíduos orgânicos por biogás.

Figura 14. Fluxograma de desenvolvimento do projeto

Uma das premissas desse trabalho é precisamente a defesa do trabalho factual e exploratório, no qual são coletados dados e medidas variáveis, com o mais amplo espectro possível, de maneira a estimular a compreensão do assunto pelo pesquisador (KAUARK, MANHÃES e MEDEIROS, 2010). A partir dos dados obtidos, sempre calçados por exploração documental e bibliográfica prévia, serão delineados os experimentos a serem realizados, a fim de determinar-se uma solução para a geração de energia a partir do biogás no estudo de caso da Cidade Universitária da USP.

3.1 Levantamento dos resíduos gerados no Campus

Considerando-se o objetivo principal dessa tese, de estimar o potencial energético dos resíduos gerados no Campus Capital da USP, a primeira etapa

do trabalho consistiu no levantamento de quais os tipos de resíduos e efluentes orgânicos gerados, seus volumes e localização, a fim de compreende-se quais seriam utilizados na concepção da planta de biogás.

Tendo em vista a sazonalidade de geração de resíduos, resultante da ocupação do Campus ao longo do ano (período letivo *versus* férias), foram realizadas coletas de dados quantitativos da geração de restos de alimentos, podas e efluente sanitários, junto à prefeitura do Campus Capital da Universidade de São Paulo e à Superintendência de Assistência Social (SAS), em regime mensal. Todos os volumes apresentados nessa tese são resultantes da disponibilização de dados de contratos da SAS com empresas responsáveis pela coleta e disposição desses resíduos.

3.1.1 Coleta e preparação

Todos os ensaios realizados seguiram o cronograma apresentado na Tabela 9, sendo os volumes coletados definidos pelo volume dos recipientes de coleta utilizados.

As coletas podem ser simples ou compostas, sendo as amostras compostas um conjunto de amostras simples realizadas durante um período pré-definido. Os resíduos de alimentos e efluente sanitário foram coletados de maneira composta - mensalmente -, entre novembro e junho de 2017. A coleta composta consistiu no conjunto de coletas simples de um litro para alimentos e dois litros para efluente sanitário, realizadas no período de uma semana, a partir do mesmo ponto de amostragem, conforme cronograma apresentado na Tabela 9. As podas, por sua vez, foram coletadas em diversos pontos de amostragem do Campus, mas somente uma vez.

Tabela 9. Volume de resíduos e efluentes coletados no Campus entre 2016 e 2017.

	Nov/16	Dez/16	Fev/17	Mar/17	Mai/17	Jun/17
Resíduos de alimentos (L)	5	5	5	5	5	5
Podas (g)	0	0	0	0	0	300
Efluente sanitário (L)	0	0	10	10	0	10

Ao final de cada semana, as amostras de restos de alimentos foram então trituradas e homogeneizadas em um triturador industrial da marca Tridente (Figura 15) para serem encaminhadas para análise.

Figura 15. Triturador industrial utilizado para o processamento do resíduo de alimentos.

As podas e capinas, foram trituradas em liquidificador comercial. A coleta, realizada somente uma vez, foi realizada em diversas partes do campus, de maneira a garantir maior representatividade dessa fração de resíduos no Campus.

3.1.2 *Preservação das amostras*

Todas as amostras coletadas, quando não prontamente utilizadas, foram mantidas congeladas a -10°C e, no mínimo três dias antes do início do ensaio, mantidas resfriadas a 4°C .

Os substratos e inóculos foram encaminhados para caracterização no dia da montagem dos ensaios.

3.1.3 Caracterização

Os resíduos foram analisados de acordo com os métodos explicitados na Tabela 10.

Tabela 10. Métodos analíticos utilizados na caracterização dos resíduos.

PARÂMETRO	METODOLOGIA
Sólidos totais e voláteis	APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21 th ed. Washington, 2005 (Method 2540 – B e 2540 – C).
DQO solúvel	APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21 th ed. Washington, 2005 (Method 5220 – D).
Análise elementar	Equipamento Perkin Elmer, modelo 2400

Figura 16. Amostras liofilizadas para análise elementar.

3.1.4 Cálculo do potencial teórico de produção de biogás

A partir do resultado da análise elementar, foi possível calcular a produtividade teórica através da Fórmula de O'Rourke (1968):

O cálculo de mols (N) de cada componente elementar é realizado a partir da relação entre a massa molar (MM) e a massa (M) do componente obtido através da análise elementar.

$$N = \frac{M}{MM} \quad (2)$$

Os índices n, a, b e z, por sua vez, são calculados a partir da normalização do nitrogênio - ou seja, o N específico de cada elemento é dividido pelo N do nitrogênio -, resultando, portanto, sempre no índice z como 1.

3.2 Determinação do Potencial Técnico de Produção de Biogás dos substratos

3.2.1 Descrição do equipamento

O ensaio de Potencial Metanogênico foi realizado no Sistema de Fermentação em Batelada, da Ritter (Figura 17), que é dividido em três unidades, conforme Figura 18.

Figura 17. Sistema de Fermentação em Batelada do Laboratório de Desenvolvimento de Biocombustíveis do IEE.

Figura 18. Unidades do Sistema de Fermentação em Batelada: (I) Reator, (II) Medidor de gás (III) Software de aquisição de dados.

(I) No **Reator**, ocorre o processo de biodigestão do substrato a ser testado. O Sistema completo conta com 15 unidades de reação de 1000 mL, agitadas e com saída de gás.

(II) No **Medidor de Gás**, o volume de biogás resultante dos reatores é quantificado por meio de um aparato de deslocamento. Neste dispositivo, o líquido contido dentro das células (HCl) é expulso pelo biogás. Assim que um volume suficiente de gás produzido é capaz de levantar a borda da célula coletora, esta libera o volume de forma que a célula retorne à posição original. Cada unidade de captura é dotada de um sistema automático de registro, conectado à unidade (III). Portanto, pequenos volumes de gás podem ser contabilizados ao longo da duração do teste.

(III) O **Software de aquisição de dados** é um sistema eletrônico ligado ao banco de unidades medidoras de gás a fim de registrar, exibir e gerenciar os dados de produção de biogás, que são visualizados em tempo real no monitor do computador ligado ao sistema.

3.2.2 Produção de biogás

A produção de biogás foi medida através do dispositivo MilliGascounter (Figura 19) da Ritter, que é um medidor de fluxo de gás com precisão de 3%, vazão mínima de leitura de 1 ml/h e máxima de 1 l/h.

Figura 19. Dispositivo para medição de pequenas vazões de gás da Ritter – MilliGasCounter.

Fonte: Ritter

O volume observado no software já está normalizado de acordo com a Equação 3, proposta pelo fabricante, descrita a seguir.

$$V_N = V_i x \frac{P_a - P_V + P_L}{P_N} x \frac{T_N}{T_a} \quad (3)$$

Onde,

V_N = volume do gás seco no estado normal, em L_N

V_i = volume de gás produzido observado no dispositivo, em L

P_a = pressão da fase gasosa no momento da leitura, mbar

P_V = pressão parcial de vapor da água, mbar

P_L = Pressão da coluna de líquido acima do recipiente de medição, 1 mbar

P_N = pressão normal, $p_0 = 1013$ mbar

T_N = temperatura normal, $T_0 = 273,15$ K

T_a = temperatura do gás no interior do reator, em K

3.2.3 Descrição do ensaio

A metodologia utilizada na realização do ensaio de potencial de biogás foi a utilizada pelo Instituto Lactec, descrita no procedimento padrão operacional padronizado de intitulado “Determinação do Potencial Metanogênico”, de 2013 (LACTEC, 2013).

A metodologia prevê que o ensaio deve ser finalizado quando a produção de biogás é menor do que um pulso por dia, portanto, o ensaio realizado nesta

tese teve uma duração de 40 dias, iniciando dia 24 de novembro de 2017 e finalizando dia 03 de janeiro de 2018.

Dois reatores foram utilizados como branco, contendo somente 160 mL do inóculo utilizado, sem alteração das características naturais e água;

- Um reator foi utilizado como controle;
- Os outros três reatores restantes foram testados os resíduos com 160 mL de inóculo.

Abaixo estão descritos os conteúdos de todos os reatores.

Tabela 11. Composição dos reatores utilizados no ensaio de potencial de produção de biogás.

Identificação	Substrato	Volume do Substrato*
RT01	Água	340 mL
RT02	Restos de alimentos	40 mL
RT03	Esgoto sanitário	160 mL
RT04	Poda	10 g
RT05	Celulose microcristalina	5 g

* Todos os substratos foram diluídos em água que até acalçar um volume total de 500 mL

O ensaio foi realizado em condição de agitação constante, motorizada, em temperatura de 35°C e teve a duração de 39 dias.

3.2.4 Cálculo da concentração de metano

A concentração de metano foi determinada a partir da fórmula sugerida por Sobotka (1983), utilizando-se a sugestão:

$$\%CH_4 = \frac{\left(4 + \frac{a}{n} - \frac{2b}{n} - 3\frac{z}{n}\right)}{8} \cdot 100 \quad (4)$$

A produção total de biogás por tonelada de matéria seca foi determinada assumindo a densidade do CH₄ como 0,668 kg/m³ e do CO₂ como 1,8421 kg/m³ (a 20 °C, 1 atm) (The Engineering Toolbox, N.D.)

3.3 Taxa de degradabilidade

A fração biodegradável de cada mistura foi calculada a partir da relação entre sólidos totais e sólidos voláteis das amostras (LABATUT, ANGENENT e SCOTT, 2011):

$$f_D = \frac{S_V}{S_T} \quad (5)$$

Onde f_D é a biodegradabilidade do substrato, S_V é representa a fração degradável dos sólidos (g/g SV_{ad}) e S_T a sua fração total (g/g SV_{ad}).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados obtidos durante o desenvolvimento deste projeto.

4.1 Planejamento e implementação do Laboratório de Desenvolvimento de Biocombustíveis do Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEE)

De acordo com o acervo do IEE, o primeiro trabalho a respeito de biogás foi desenvolvido em 1994, sendo que os trabalhos que se seguiram são, em sua maioria, voltados para a pesquisa teórica conforme pode ser observado no levantamento apresentado na Tabela 12.

Tabela 12. Trabalhos relacionados ao biogás do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

Ano	Autor	Título	Tipo
1994	Reinaldo Alves Almança	Avaliação do uso da vinhaça da cana-de-açúcar na geração de energia elétrica (Estudo de caso)	Mestrado
		Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos	
2000	João Wagner Silva Alves	Energia no tratamento de esgoto: análise tecnológica e institucional para conservação de energia e uso do biogás	Mestrado
2005	Felipe Palma Lima	Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: estudo de caso.	Mestrado
2006	Vanessa Pecora		Doutorado
Continua			

Ano	Autor	Título	Tipo
2008	Juliana Gonçalves Justi	Geração de energia elétrica por meio de biogás extraído do aterro sanitário bandeirantes e o mecanismo de desenvolvimento limpo como indutor de investimentos socioambientais	Especialização
2009	Carlos Cezar da Silva	A atribuição de custos em sistemas energéticos agropecuários: uma análise em energia, termoeconomia e economia	Mestrado
2009	Rodrigo Chimenti Cabral	Aproveitamento do biogás em aterros sanitários: especificações construtivas beneficiando aspectos ambientais e energéticos.	Especialização
2010	Renato Mariano Barbosa	Contribuição dos créditos de carbono na viabilidade de projetos de eficiência energética térmica e de troca de combustíveis em cervejarias	Mestrado
2011	Natalie Jimenez Verdi de Figueiredo	Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica: estudo de caso	Mestrado
2013	Francisco do Espírito Santo Filho	Estimativa do aproveitamento energético do biogás gerado por resíduos sólidos urbanos no Brasil	Mestrado
2013	Claudio Moises Ribeiro	Análise energética, econômica e ambiental da biodigestão de resíduos agropecuários gerados por pequenos e médios produtores rurais da região sul do Espírito Santo	Doutorado
Continua			

Ano	Autor	Título	Tipo
2014	Tiago Alexandre Silva Zenaro do Prado	Mapeamento do potencial de biogás não aproveitado na mesorregião do Sul da Bahia como instrumento de fomento à adequação à política nacional de resíduos sólidos (PNRS)	Especialização
2014	Manuel Moreno Ruiz Poveda	Análise econômica e ambiental do processamento da vinhaça com aproveitamento energético	Mestrado
2014	Pâmela Addolorata Pinto	Projeto de aproveitamento de resíduo sólido orgânico com geração de energia: estudo de caso: Bayer S.A.	Especialização
2015	Thaís Carolina Ferreira Silva	Utilização de biogás de estações de tratamento de esgoto para fins energéticos	Mestrado
2016	Ana Paula Beber Veiga	Contribuição à avaliação das barreiras e oportunidades regulatórias, econômicas e tecnológicas do uso de biometano produzido a partir de gás de aterro no Brasil	Mestrado
2016	Naraísa Moura Esteves Coluna	Análise do potencial energético dos resíduos provenientes da cadeia agroindustrial da proteína animal no Estado de São Paulo	Mestrado
2017	Danilo Perecin	Comparação entre as estratégias de aproveitamento energético do biogás: geração de energia elétrica <i>versus</i> produção de biometano	Mestrado
2017	João Wagner Silva Alves	Cenários quantitativos de gases de efeito estufa e energia pela gestão de resíduos na Macrometrópole Paulista	Doutorado

Não há dúvidas quanto à relevância de todos os trabalhos desenvolvidos, no entanto, pouco se explorou ao longo dos últimos anos em termos de tecnologia no setor dentro do Instituto, exceto pelos trabalhos de Pecora (2006) e Figueiredo (2011). Esse fato se deve, em parte, à falta de estrutura de desenvolvimento tecnológico até então encontrado.

A grande vantagem do desenvolvimento de dados primários reside na possibilidade de controle dos parâmetros necessários para o caso específico de estudo. A existência de uma estrutura de desenvolvimento de dados primários permite um conhecimento mais aprofundado de todas as questões que envolvem a pesquisa teórica, uma vez que fundamenta através da vivência própria a construção de quaisquer teorias ou conceitos nas mais diversas áreas da ciência.

Apesar de existir a possibilidade de se trabalhar com a coleta de dados secundários, muitas vezes as condições ideais não são respeitadas, pode haver erro de interpretação e, ainda, baixa relação com a pesquisa em questão. Portanto, a existência de uma infraestrutura de desenvolvimento de dados primários é de extrema relevância para subsídio de dados econômicos, sociais, ambientais e políticos.

Conforme citado por Pekelman e Mello Jr. (2004), se faz necessário que o pesquisador se depare e manipule as mais diversas tecnologias e condições, a fim de subsidiar então modelos, que nada mais são do que simplificações da realidade, após o completo domínio de um processo ou sistema. O que corrobora com a necessidade explicitada nesta tese, de se criar uma infraestrutura de aprimoramento técnico.

Conforme expressado no Capítulo 2 dessa tese, um dos objetivos deste trabalho foi *“Implementar um laboratório de processo de produção de biogás no Instituto de Energia e Ambiente”*, com o intuito de iniciar uma estrutura de geração de dados primários na área de produção de biogás.

4.1.1 Equipamentos e custos

O primeiro passo desse trabalho foi prospectar as necessidades em termos de laboratório e definição de quais seriam os equipamentos a serem instalados bem como a finalidade do laboratório, tendo em vista sempre a existência prévia de serviços e análises na Universidade.

A prospecção do Laboratório de Desenvolvimento de Biocombustíveis se iniciou em 2014, a partir do lançamento da Portaria 02/2014, que criava o Laboratório de Desenvolvimento de Biocombustíveis, vinculado ao Serviço Técnico de Caracterização de Combustíveis e Desenvolvimento de Bioenergia.

A partir da criação do Serviço Técnico, foi dado um importante passo para o desenvolvimento de tecnologia de biogás dentro do IEE, com consolidação de uma equipe técnica e recursos voltados para o setor. A primeira iniciativa do grupo consistiu na implementação de uma pequena unidade de demonstração de produção em um sistema de baixo custo, a partir de um convênio com a Universidade de Borås (Suécia), para tratamento de restos de alimentos gerados na CUASO (SAUER et al., 2013).

Com a iniciativa, foram levantados os possíveis laboratórios que poderiam trabalhar em sinergia com o Laboratório de Desenvolvimento de Biocombustíveis, especialmente na realização de análises físico-químicas. Foram identificadas diversas unidades da USP que desenvolvem trabalhos no setor de biogás, a partir de inúmeros substratos, sendo uma das grandes expertises da Universidade o desenvolvimento de tecnologias para o tratamento de esgotos sanitários a partir da digestão anaeróbia e seu uso em diversas culturas. Nesse sentido, se destacam os trabalhos desenvolvidos pelos seguintes departamentos:

- Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Escola Politécnica, coordenado pelo Prof. Dr. Ronan Cleber Contreras
- Núcleo de Pesquisa em Geoquímica e Geofísica da Litosfera, coordenado pelos Profs. Drs. Adolpho José Melphi e Célia Regina Montes

Ambos laboratórios possuem infraestrutura, bem como capacidade técnica, no desenvolvimento de diversas análises. Portanto, foram realizados acordos de cooperação com os mesmos, a fim de o laboratório do IEE tornar-se um laboratório específico de processo. A partir dessa prerrogativa, foram levantados os equipamentos mínimos para o desenvolvimento de diversos trabalhos a partir de biogás. Sempre tendo em vista que o objetivo do laboratório seria o de trabalhar com o aproveitamento de resíduos e efluentes na geração de energia, foram estipuladas três linhas distintas e básicas: a) caracterização do potencial energético de resíduos e efluentes, b) biodigestão de resíduos com alta carga de sólidos em reatores convencionais, focando no grande potencial agroindustrial

brasileiro e nos resíduos de alimentos dos grandes centros urbanos e c) biodigestão de efluentes em reatores de alta taxa, tendo em vista efluentes industriais e esgoto sanitário.

No ano de 2015, já no âmbito da realização dessa tese, foi disponibilizada uma verba no valor de R\$94.371,00 através de uma Reserva FAPESP, a partir da qual foi possível a aquisição de equipamentos e infraestrutura de suporte laboratorial, de acordo com as linhas previamente levantadas, conforme especificados a seguir.

- Analisador de potencial de biogás

O processo de digestão anaeróbia é complexo em aspectos bioquímicos, físicos e microbiológicos. Conforme explorado na revisão bibliográfica, o processo completo passa por diversos estágios, que têm sua estabilidade altamente dependente do balanço entre o crescimento simbiótico de diversos microrganismos e os produtos intermediários das fases envolvidas (ANGELIDAKI *et al.*, 2009).

Nesse sentido, a exploração de tecnologias, métodos e procedimentos diversos para a inovação no campo da digestão anaeróbia, depende do conhecimento e exploração do potencial de geração de biogás dos diversos resíduos ou produtos existentes e suas mais infinitas combinações.

Dada essa importância, diversos aparatos foram desenvolvidos ao longo dos anos para se obter de forma mais segura e rápida possível esse potencial, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

O equipamento adquirido para o Laboratório de Desenvolvimento de Biocombustíveis é o *Biogas Batch Fermentation System*, desenvolvido pela alemã Ritter. Diferente de outros sistemas, o aquecimento do processo se dá pelo fato de os reatores estarem enclausurados em uma estufa, com uma extensão de temperatura que pode variar de 10°C à 300°C, permitindo uma grande variedade de estudos e controle apurado de temperatura.

Figura 20. Diferentes aparatos utilizados para análise do potencial de biogás ou de metano. (a) desenho esquemático de equipamento experimental utilizado na Itália; (b) equipamento de análise de potencial metanogênico da Universidade da Rainha de Beslfast e (c) equipamento da Bioprocess Control utilizado em diversos laboratórios

Único exemplar do equipamento no Brasil, o analisador de potencial de biogás da Ritter tem como principal diferencial o sistema de medição de vazão de gás, o MilliGascounter (Figura 21), desenvolvido pela Universidade de Ciências Aplicadas de Hamburgo. Esse sistema possui uma precisão de medição de 97%, mesmo em vazões baixas (1 mL/h).

Figura 21. Medidor de vazão MilliGascounter, da Ritter, (a) detalhes do projeto e (b) equipamentos instalados no laboratório do IEE.

³ <https://benthamopen.com/contents/pdf/TOENVIEJ/TOENVIEJ-5-1.pdf>

⁴

<http://questor.qub.ac.uk/AppliedTechnologyUnit/ATUServices/BiogasServices/BiochemicalMethanePotential/>

⁵ Bioprocess Control.

⁶ RITTER, S/D.

⁷ Autora: Laboratório de Desenvolvimento de Biocombustíveis.

Juntamente com o sistema foi adquirido o software Rigamo, que eleva a precisão de medição à 99% devido à correção automática do erro de medição do MilliGascounter. Ainda, o software faz a aquisição dos dados e gera gráficos (Figura 22) para melhor acompanhamento do ensaio.

Figura 22. Tela de aquisição de dados do software Rigamo.

Fonte: Ritter, S/D

– Reator UASB

Apesar dos equipamentos de bancada não terem sido utilizados neste trabalho, foram desenvolvidos, adquiridos e implementados dois reatores de bancada. Isso é devido à importância de diversos equipamentos, para a efetivação de trabalhos futuros.

O reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*, em inglês), desenvolvido pelo professor da Universidade de Wageningen, Gatzke Lettinga, na década de 80 possui alta difusão no Brasil.

O reator projetado para o Laboratório de Desenvolvimento de Biocombustíveis do IEE possui um volume útil de 20 litros e foi construído de acordo com o projeto demonstrado na Figura 23.

Figura 23. Projeto do reator UASB do IEE.

Fonte: autora

O aquecimento do reator é realizado através de uma serpentina interna na qual se circula água aquecida proveniente de um banho ultratermostático, com bomba de recirculação. O conjunto como um todo conta com duas bombas helicoidais – uma para alimentação do reator e outra para a recirculação –, da marca Netzsch, com vazão de 2 a 5 m³/h e equipadas com inversores de frequência WEG para controle fino da vazão.

O equipamento é inteiramente construído em acrílico, a fim de facilitar o acompanhamento visual do processo e é equipado com controle de temperatura do tipo PT100 e possibilidade de retirar amostra do interior do reator em diversas alturas, sem alterar a dinâmica do mesmo, uma vez que a retirada de amostra se dá por orifício central no topo do reator e não por saídas laterais, como comumente observado.

O reator foi projetado para operar com um TRH de 8 horas, resultando em uma altura de 1,4 metros e um diâmetro de 0,15 metros. O separador trifásico foi especialmente projetado com uma inclinação de 50%, ocupando um total de

75% da superfície do reator e uma distância entre o separador e os defletores de 21 mm.

Após construído, o reator foi testado em termos de vazão, estanqueidade (Figura 24) e foi verificado se o sistema de difusão, composto por peneira de distribuição, não possuía caminhos preferenciais.

Figura 24. Teste de estanqueidade do reator UASB.

Desta maneira, o reator UASB do Laboratório de Desenvolvimento de Biocombustíveis encontra-se implementado e em plena capacidade de funcionamento.

– Reator CSTR

Reator de grande relevância mundial, o CSTR ainda é pouco explorado no Brasil devido ao seu custo, quando comparado com as tradicionais lagoas cobertas. O baixo nível de conhecimento no país sobre as potencialidades desse reator resulta em projetos de baixa qualidade, especialmente no quesito de operação e controle desses sistemas.

De acordo com diretrizes da Associação Brasileira de Biogás e Biometano, mesmo sistemas com baixa capacidade instalada devem garantir a mínima

qualidade e disponibilidade energética, e isso passa por um bom planejamento e investimento em parâmetros mínimos de operação (Figura 25).

	MICROPRODUTOR <75 kW	MINIPRODUTOR 75 – 300 kW	PRODUTOR MÉDIO 300 – 1000 kW	GRANDE PRODUTOR > 1MW
Controle de alimentação	X	X	X	X
Controle de mistura	X	X	X	X
Controle de temperatura	X	X	X	X
Automação e controle				X
Composição do gás diária	X	X		
Composição do gás online			X	X
Dessulfurização	< 1000 ppm	< 1000 ppm	< 300 ppm	< 300 ppm
Eficiência Elétrica	30%	35%	40%	42%

Figura 25. Parâmetros mínimos de operação em função do tamanho da planta
Fonte: ABiogás (2018)

Portanto, o controle e automação de alguns parâmetros substanciais foram considerados para o planejamento e aquisição do reator do tipo CSTR implementado, com capacidade de 5 litros.

Dentre os principais parâmetros considerados, estão os acima indicados pela ABiogás: controles de alimentação, mistura e temperatura (camisa dupla para circulação de água quente de banho termostatizado). Além dos parâmetros mínimos, estão contemplados controle de pH, bocal para automação de adição de reagentes (ácido/base) com resposta automática e possibilidade de formação de vácuo.

O sistema possui controle microprocessado com detecção de mau-funcionamento de bomba. Possui entrada para controle remoto, permitindo ser ligada e desligada através de dispositivo externo com um rele. Saída RS 232, módulo de comunicação ASCII. A vazão máxima permitida na alimentação é de 1200 ml/min com uma exatidão de dosagem de até 0,01 ml.

O sistema teve um custo de R\$ 62.400,00.

Outros materiais e equipamentos acessórios, bem como os custos envolvidos na aquisição e implementação dos equipamentos acima especificado, encontra-se na Tabela 13.

Tabela 13. Detalhamento dos equipamentos implementados no Laboratório de Desenvolvimento de Biocombustíveis.

Equipamento	Características	Valor
Balança analítica, Shimadzu	Capacidade: 220g Precisão: 0,1 mg	R\$3.390,00
Capela de exaustão de gases, SPLabor	DIM: 68x49, bivolt	R\$1.370,00
Deionizador de água. SPLabor	Vazão: 50L/h	R\$835,00
pHmetro de bancada, Hanna Instruments	ORP/Temperatura, gama de -2,00 a 16,00 pH / $\pm 699,9$ mV; ± 2000 MV, 5 pontos de calibração, 220 V	R\$1.200,00
Agitador Magnético, Fisatom	Com aquecimento, capacidade para 4L	R\$1.280,00
Agitador Magnético Mod. 0851, Lucadema	Com aquecimento, capacidade para 10L	-

4.2 Resíduos orgânicos gerados na Cidade Universitária

Os resíduos e efluentes orgânicos utilizados para estudos foram os mais representativos em termos de geração, conforme

Figura 26.

Figura 26. Resíduos orgânicos coletados, analisados e testados.

O gerenciamento da produção, transporte e disposição desses resíduos é de responsabilidade da Seção de Gerenciamento de Resíduos (SCGR), dentro do Serviço Técnico de Gestão de Resíduos e Recursos Naturais (SVRN).

4.2.1 Restos de alimentos

Dos 35 restaurantes existentes dentro da CUASO, 4 são operados pela Superintendência de Assistência Social (SAS) da USP – Restaurantes Central, da Física, PUSP-C e das Químicas - 13 são terceirizados e 16 são lanchonetes, também terceirizadas.

Figura 27. Pontos de alimentação da CUASO.
Fonte: PUSP-C, SD

De acordo com entrevista realizada com funcionários de diversas unidades da Universidade, não há nenhum tipo de controle ou responsabilidade da USP para com os resíduos gerados nos estabelecimentos terceirizados, bem como pouco se encontrou sobre o destino final e gerenciamento desse resíduo. Os restaurantes controlados pela SAS, por sua vez, possuem alto grau de gerenciamento, com separação adequada entre resíduo orgânico e inorgânico, já na fonte de produção do mesmo (Figura 28). No entanto, assim como os resíduos produzidos por terceirizados, esse resíduo não tem nenhum tipo de aproveitamento energético ou alimentar, tendo o aterro sanitário como seu destino final.

Figura 28. Segregação do resto de alimento no Restaurante Central da CUASO.

A DVGS mantém um controle dos resíduos que são responsabilidade da USP, mas como não há segregação de todos os resíduos gerados não se sabe exatamente qual é a fração orgânica correspondente.

Segundo contratos disponibilizados pela DVGS, a quantidade de resíduos gerados sob responsabilidade da USP é de, em média, 184,81 toneladas mensais, com um pico de geração no mês de março – 226,24 toneladas – e o menor volume em janeiro – 139,49 toneladas. Esse comportamento é esperado devido à variação da população que frequenta a Universidade de acordo com o período letivo.

Dados de 2013, disponibilizados na forma de contrato de disposição final de resíduos pela Prefeitura do Campus da Capital (PUSP-C), relevam que do total de resíduos sob controle da USP, aproximadamente 16,3% está concentrado nos quatro restaurantes geridos pela Universidade. Considerando-se que quase a totalidade do resíduo gerado nos restaurantes é orgânico, se pode estimar, aproximadamente, a geração de resíduo orgânico nos restaurantes da USP, sob gestão da SAS. A partir dessa informação, se estima que sejam produzidos de 22,7 (janeiro) a 36,9 (março) toneladas de resíduos orgânicos - média de 30,12 toneladas mensais - concentrados somente nos restaurantes universitários sob administração direta da USP.

Por outro lado, de acordo com IBGE (2010), 51,4% do resíduo coletado no Brasil é matéria orgânica. Desta forma, serão considerados dois cenários de geração de restos de alimentos no campus, um com base nos dados da SAS e outro no dado estimado pelo IBGE.

Figura 29. Toneladas de resíduos comuns gerados na CUASO por mês e resíduos orgânicos sob responsabilidade da SAS, de abril de 2016 a março de 2017.

Os custos com a disposição desse resíduo – de alto valor agregado em termos sociais e energéticos – durante o período de coleta dos dados acima foi de, em média, R\$ 157,65 por tonelada, podendo chegar à R\$187,70 por tonelada (fevereiro/2017). Isso significou, no período levantado, um gasto mensal médio de R\$28.771,50 e total de R\$345.257,99 para transporte e disposição dos resíduos gerados na CUASO.

De acordo com dados do Banco Mundial, os custos para transporte e diferentes métodos de tratamento e/ou disposição de resíduos varia de acordo com o desenvolvimento econômico do país (Tabela 14). No caso da disposição em aterro sanitário, o custo com a coleta desse resíduo é mais relevante para o custo final do que a própria disposição em aterro sanitário. Portanto, a redução do volume a ser transportado devido melhor gestão e, em especial, ao aproveitamento energético do resíduo, é ponto crucial a ser considerado no cálculo do potencial econômico de quaisquer rotas consideradas.

Tabela 14. Custo estimado de gerenciamento de resíduos sólidos de acordo com a renda do país (US\$/tonelada)

	Baixa renda	Renda média inferior	Renda média superior	Renda elevada
Coleta	20-50	30-75	40-90	85-250

Aterro sanitário	10-30	15-40	25-65	40-100
Lixão	2-8	3-10	NA	NA
Compostagem	5-30	10-40	20-75	35-90
Incineração	NA	40-100	60-150	70-200
Digestão Anaeróbia	NA	20-80	50-100	65-150

Adaptado: Banco Mundial (2012)

Desta forma, se considerando apenas o direcionamento dos restos de alimentos gerados e já corretamente segregados nos quatro restaurantes administrados pela USP na CUASO para aproveitamento energético interno – 361,49 toneladas por ano –, seria possível reduzir – somente com o custo com transporte e disposição em aterro sanitário - quase 57 mil reais por ano.

4.2.2 Esgoto Sanitário

A geração de esgoto sanitário na CUASO já foi instrumento de estudo para geração de biogás em trabalho realizado por Percora, em 2006. Na oportunidade, foi utilizado um biodigestor do tipo UASB, com volume útil de 25 m³, instalado no Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH) (Figura 30).

Figura 30. Instalações do biodigestor localizado no CTH

Fonte: Percora, 2006

O reator, que hoje encontra-se desativado, operava com uma vazão diária de 72 m³ de esgoto sanitário, proveniente do Centro Residencial da Universidade de São Paulo (CRUSP) e tinha uma vazão estimada de geração de biogás de 5,27 m³/dia.

O projeto fez parte do Programa de Uso Racional de Energia e Fontes Alternativas (PUREFA), instaurado em 2005, como complementar ao Programa Permanente para Uso Eficiente de Energia Elétrica na USP (PUREUSP).

Ambos programas possuem grande relevância no âmbito da Universidade, como esforço não apenas para incentivo de utilização de fontes alternativas de energia dentro do Campus, mas também da efficientização do consumo de energia.

Apesar dos esforços, poucos resultados efetivos dos programas, de forma sistemática e organizada, foram encontrados. De acordo com o site do Programa, o objetivo inicial era de transformar a USP em um “laboratório virtual”, no qual seriam realizadas pesquisas na área de biogás, energia fotovoltaica, aquecimento solar de água, criação de normas de eficiência energética, entre outros. No entanto, poucas ações em termos de eficiência energética, normatização e sistematização foram efetivamente implementadas. Ações de destaque dentro do PUREFA foram a implantação do sistema de geração de energia fotovoltaica de 3 kW no IEE, a implantação do sistema de aquecimento solar de água do restaurante universitário e do sistema experimental de biodigestão do CTH.

O levantamento da geração de esgoto sanitário no Campus como um todo pretende, para fins futuros, auxiliar no desenvolvimento de projetos dentro dos projetos mencionados e na reativação e ampliação do sistema experimental já existente. Nesse sentido, é importante destacar o esforço da equipe de Desenvolvimento de Biocombustíveis do IEE em preservar os investimentos já realizados para a implementação do atual sistema e sua melhoria e expansão, de maneira a garantir a melhor gestão dos recursos públicos anteriormente aplicados e futuramente direcionados para esse projeto.

Atualmente, o efluente sanitário gerado na CUASO é, em sua totalidade, encaminhado para tratamento através da rede de coleta de esgotos, demonstrada na Figura 31.

Figura 31. Mapa da rede de esgoto da CUASO

De acordo com dados da conta de esgoto, existem 1.717 pontos de recepção espalhados pelo Campus, em 30 diferentes unidades.

Como pode-se observar na Figura 32, são produzidos, em média, 58.705 m³ de esgoto por mês na CUASO, sendo o mês de menor produção fevereiro (46.952 m³) e o de maior produção abril (67.132 m³), somando um volume total de 704.461 m³ de esgoto produzidos em 2016. Apesar da sazonalidade de produção de esgoto sanitário variar de acordo com a ocupação da Universidade, tal qual ocorre na produção de alimento, essa variação ocorre em menor proporção, o que se deve especialmente ao fato de muitas atividades que consomem água continuam acontecendo mesmo fora do período de letivo, na qual os restaurantes universitários estão fechados. Ainda, o esgoto sanitário é mais fácil de quantificar, uma vez que o volume produzido no Campus é faturado pela SABESP.

Em termos de custo, os gastos com o tratamento de esgoto sanitário são incrivelmente superiores aos gastos com transporte de disposição dos resíduos sólidos. No ano de 2016, a USP gastou R\$ 8.720.078,71 com tratamento de efluente sanitário, o que significa uma média de R\$ 12,39 por metro cúbico de esgoto gerado.

O projeto apresentado nessa tese prevê o tratamento por via anaeróbia de 82% (serão excluídos do projeto os efluentes gerados no HU e Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, a fim de evitar problemas com descargas de antibióticos no processo biológico) do esgoto sanitário, com pós-tratamento, para devolução de água balneável para o córrego Pirajussara, o que significa uma redução de mais de 7 milhões de reais por ano.

Figura 32. Metros cúbicos de esgoto gerado na CUASO durante o período de um ano.

4.2.3 Resíduos de poda

Conforme levantado anteriormente no Capítulo 4, resíduos de poda podem ser uma grande ferramenta para correção da relação C/N de restos de alimentos, além de reduzir o acúmulo de AOVs e aumentar a concentração de metano no biogás.

De acordo com a Prefeitura do Campus Capital da USP, a SVGA é a responsável pela gestão - o que inclui plantio, poda e remoção de árvores - dos 701.385 m² de áreas verdes da CUASO (PUSP-C, S/D).

De acordo com Mellucci *et al.* (2015), existem três empresas terceirizadas responsáveis pela gestão, além de 24 jardineiros próprios da Universidade que realizam corte de grama e manutenção de jardins.

No entanto, levantamento dos contratos de gestão de resíduos de podas deram conta de que existiam em 2016 seis empresas terceirizadas, quatro com

contratos fixos e duas não fixos, que prestaram serviços de gestão das áreas verdes da CUASO.

Durante o processo de levantamento de geração dessa categoria de resíduo, foi observado o baixo gerenciamento desses contratos, sendo que em dois dos mesmos não havia dado de volume coletado, apesar de o valor pago ser atrelado à quantidade coletada.

A grande maioria das empresas utiliza-se de caçambas de 30 m³ para coleta e elas se dividem em diversas áreas de concessão. De acordo com os dados obtidos através dos contratos entre a USP e essas empresas, em 2016 foram coletados aproximadamente 22.774,125 m³ de resíduos de podas. Entretanto, esse valor pode ser considerado subestimado, uma vez que nem todos os contratos tem os volumes exatos coletados e transportados anualmente.

Figura 33. Leira de compostagem no viveiro da CUASO.

Aproximadamente 30 m³ dos resíduos de poda e capina do Campus é compostado e serve como adubo para a criação de mudas em viveiro dentro da Universidade (

Figura 33) e parte – em torno de 480 m³ por ano – vai para produção de pellets e queima para geração de energia.

A destinação do restante do resíduo de poda e capina não é descrita nos contratos disponibilizados.

Por fim, o custo total com a coleta, transporte e destinação desses resíduos, em 2016, foi de R\$ 2.485.356,00.

4.3 Caracterização elementar e física dos resíduos orgânicos da CUASO

Os resíduos coletados durante o ano de 2016, segundo cronograma apresentado no Capítulo 3, foram submetidos à caracterização físico-química. A Tabela 15 apresenta os dados de caracterização realizada nos resíduos utilizados no ensaio de potencial de produção de biogás, em duplicatas para cada coleta.

Tabela 15. Caracterização elementar dos resíduos orgânicos gerados na CUASO e utilizados para ensaio de potencial de produção de biogás.

Amostra	Período coleta	Resultados (% ST)			C/N
		Carbono	Hidrogênio	Nitrogênio	
Poda	jun/17	35,36	3,79	1,48	27,9
		37,13	4,14	1,67	25,9
Restos de alimento	nov/16	45,79	3,75	4,37	12,2
		45,1	4,17	4,38	12,0
	dez/16	40,4	3,91	4,13	11,4
		40,86	3,99	4,43	10,8
	fev/17	35,09	4,35	2,58	15,9
		34,88	3,99	2,44	16,7
	mar/17	43,82	4,17	5,24	9,8
		43,59	4,24	5,1	10,0
	mai/17	46,65	4,2	5,78	9,4
		46,48	3,94	5,89	9,2
	jun/17	48,45	3,95	4,74	11,9
		48,74	3,23	4,73	12,0
Esgoto Sanitário	fev/17	26,46	4,05	3,26	9,5
		26,74	3,6	3,37	9,3
	mar/17	24,14	3,77	3,08	9,1
		24,82	3,89	3,07	9,4
	jun/17	30,12	4,58	3,27	10,7
		31,68	5,18	3,47	10,7

Os valores de carbono encontrados para as amostras corroboram com dados encontrados na literatura, enquanto que alguns diferem dos resultados apresentados na tabela acima, especialmente para hidrogênio e nitrogênio de restos de alimentos. Estudos realizados anteriormente mostram uma composição média de $6,3 \pm 0,4\%$ de hidrogênio, o que leva a um desvio de 30% entre os valores encontrados; e de $3,0 \pm 0,4\%$ de nitrogênio, resultando em um desvio de 39% (ZHANG *et al.*, 2007; ZHANG, LEE e JAHNG, 2011; ZHANG *et al.*, 2013; FIRDAUS, SAMAH e HAMID, 2018).

No caso do resíduo de poda, o maior desvio entre os valores apresentados e dados da literatura foi o teor de hidrogênio, no qual foram encontrados valores de $6,3 \pm 0,8\%$, o que significa um desvio de 24% (AMIR *et al.*, 2010; LI *et al.*, 2013). Não foram encontrados resultados da análise elementar de esgoto sanitário, o que se deve à baixa concentração de sólidos dessa amostra, causando algumas barreiras na realização do ensaio.

As diferenças podem estar relacionadas ao método de análise, uma vez que a caracterização elementar de resíduos foi realizada pela primeira vez a partir desse estudo, sendo necessário, portanto, um período de desenvolvimento e amadurecimento das técnicas. Os valores de hidrogênio, em especial, demonstrados na tabela acima ocasionam erros de cálculo para o potencial teórico de biogás. Desta maneira, optou-se por utilizar dados da literatura para compostos com desvio significativo de valores da literatura. Ainda, os valores de oxigênio - parâmetro que não foi executado dentro do âmbito desta tese, devido à limitações técnicas – foram encontrados na literatura.

Para os resíduos de podas, foi utilizada a média dos resultados de oxigênio obtidos nos estudos de Parikh, Channiwala e Ghosal (2007), Amir *et al.* (2010) e Li *et al.* (2013). No caso dos restos de alimentos, foram utilizadas as médias de oxigênio encontradas nos estudos de Zhang *et al.* (2013), Zhang, Lee e Jahng (2011) e Zhang *et al.* (2007).

Os valores finais utilizados para cálculo do potencial teórico estão, portanto, demonstrados na Tabela 16.

Tabela 16. Composição elementar considerada para o cálculo do potencial teórico de biogás dos resíduos da CUASO.

Amostra	Período coleta	Resultados (% ST)				C/N
		Carbono	Hidrogênio	Nitrogênio	Oxigênio	
Poda	jun/17	35,36	6,3	1,48	35,3	27,9
		37,13	6,3	1,67	35,3	25,9
Restos de alimento	nov/16	45,79	6,3	4,37	33,9	12,2
		45,1	6,3	4,38	33,9	12,0
	dez/16	40,4	6,3	4,13	33,9	11,4
		40,86	6,3	4,43	33,9	10,8
	fev/17	35,09	6,3	2,58	33,9	15,9
		34,88	6,3	2,44	33,9	16,7
	mar/17	43,82	6,3	5,24	33,9	9,8
		43,59	6,3	5,1	33,9	10,0
	mai/17	46,65	6,3	5,78	33,9	9,4
		46,48	6,3	5,89	33,9	9,2
	jun/17	48,45	6,3	4,74	33,9	11,9
		48,74	6,3	4,73	33,9	12,0
Esgoto Sanitário	fev/17	26,46	4,05	3,26	33,9	9,5
		26,74	3,6	3,37	33,9	9,3
	mar/17	24,14	3,77	3,08	33,9	9,1
		24,82	3,89	3,07	33,9	9,4
	jun/17	30,12	4,58	3,27	33,9	10,7
		31,68	5,18	3,47	33,9	10,7

Figura 34. Composição elementar média dos resíduos orgânicos da CUASO, em porcentagem.

Além da análise elementar, os resíduos foram caracterizados em termos de sólidos totais e voláteis. Os resultados estão apresentados na Tabela 17. De acordo com Firmo (2013), substratos com relação de sólidos voláteis abaixo de 10% já se encontram estabilizados e, apesar de o resultado não ser a melhor componente em termos de biodegradabilidade, os valores são amplamente aceitos na literatura. A seguir foi realizada uma discussão sobre biodegradabilidade em termos de sólidos totais. Desta forma, reunindo-se esses dois parâmetros, foi possível compreender de maneira mais abrangente a biodegradabilidade real de cada substrato.

Tabela 17. Caracterização física dos resíduos orgânicos gerados na CUASO.

Amostra	Período coleta	Sólidos Totais	Sólidos Voláteis	Degradabilidade
%				
Poda	jun/2017	77,552	62,926	37% ¹
Restos de alimento	mar/17	18,942	17,858	25%
	abr/17	18,360	17,266	25%
	jun/17	25,436	23,346	25%
	ago/17	25,714	23,586	24%
	out/17	18,000	16,833	42%
	Média	21,291	19,778	28%
	Desvio padrão	3,927	3,388	

Continua

Amostra	Período coleta	Sólidos Totais	Sólidos Voláteis	Degradabilidade
mg/l				
Esgoto sanitário	mar/17	2.600	2.470	54%
	abr/17	2.800	2.690	51%
	jun/17	7.600	7.200	16%
	ago/17	7.000	6.580	13%
	nov/17	7.800	7.440	78%
	Média	5.560	5.276	43%
Desvio Padrão		2.628,31	2.482,24	

¹ Fonte: Li *et al.* (2013)

A caracterização física dos resíduos corroborou com dados da literatura. Para restos de alimentos, a média encontrada na literatura foi de $24,7 \pm 2,1\%$ de sólidos totais e $22,2 \pm 1,4\%$ de sólidos voláteis (NEVES *et al.*, 2008; CHEN, ROMANO e ZHANG, 2010; BANKS *et al.*, 2011; NEVES, OLIVEIRA e ALVES, 2009). Para o resíduo de poda, os valores na literatura possuem maior variação, de acordo com o tipo de resíduo de jardinagem, e também com a localidade e época do ano. Foi encontrada uma média de $70,7 \pm 31,2\%$ de sólidos totais e $63,6 \pm 34,7\%$ de sólidos voláteis (BROWN e LI, 2013; CHEN *et al.*, 2014; FITAMO *et al.*, 2016; SANGAMITHIRAI, JAYAPRIYA e MANOJ 2015), assim, os valores encontrados nesse estudo estão na média dos valores gerais encontrados na literatura.

No caso do esgoto sanitário, a amostra era coletada sempre após elevatória e gradeamento, resultando em uma característica diferenciada, uma vez que a carga de sólidos totais em esgotos varia comumente de 350 a 1.200 mg/L (Metcalf e Eddy, 1991) e os valores apresentados nesse trabalho encontram-se entre 2.600 e 7.800 mg/L.

O conteúdo de água é de extrema relevância para biodegradabilidade. Isso se deve ao fato de que a água é necessária para diversas reações, como na hidrólise de moléculas complexas. O conteúdo aquoso se faz necessário na forma de soluto para substratos e metabólitos, de maneira que o metabolismo das bactérias seja efetivo, além de servir como meio de transporte para a colonização.

Substratos altamente biodegradáveis contém, normalmente, entre 1,5 a 2,35 gH₂O.gMS⁻¹, enquanto que resíduos pouco degradáveis possuem em torno de 0,25 gHH₂O.gMS⁻¹ (POMMIER e LEFEBVRE, 2009). Firmo (2013), indicou que substratos com uma relação entre massa de água e massa de sólidos acima de 1,5 são rapidamente biodegradáveis, moderadamente biodegradáveis entre 0,4 e 1,5 e lentamente biodegradáveis ou não biodegradáveis quando estão abaixo de 0,3. Desta forma, é possível concluir que substratos com conteúdo de água superior a 60% são altamente degradáveis.

A partir dos resultados de sólidos totais acima apresentado, conclui-se que restos de alimentos e esgoto sanitário são altamente biodegradáveis, enquanto que restos de poda são considerados no limiar entre moderadamente e lentamente biodegradáveis. Portanto, a mistura entre os resíduos com elevado conteúdo de água e resíduos de poda pode ser altamente vantajoso na regulação deste importante componente na degradação biológica.

4.4 Cálculo do potencial teórico de produção de biogás

A composição molar dos resíduos utilizados durante este trabalho está expressa nas equações a seguir:

4.4.1 Poda e capina

4.4.2 Restos de alimento

4.4.3 Esgoto Sanitário

$$\begin{aligned} \text{fev/17} \quad C_{1,958}H_{116,035}O_{8,953}N - 5,777H_2O & \quad (21) \\ & = 0,370CH_4 + 1,587CO_2 \end{aligned}$$

$$\text{mar/17} \quad C_{9,284}H_{17,309}O_{9,652}N + 0,881H_2O = 4,018CH_4 + 5,266CO_2 \quad (22)$$

$$\text{jun/17} \quad C_{10,693}H_{20,124}O_{8,807}N + 2,009H_2O = 5,285CH_4 + 5,408CO_2 \quad (23)$$

A concentração média de metano para cada substrato, de acordo com as equações apresentadas, é de 56% para a poda, 54% para restos de alimentos e 46% para esgoto sanitário.

Como é possível observar na Equação 21, a amostra coletada em fevereiro de 2017 de esgoto sanitário apresentou uma inconsistência de cálculo, resultando em um consumo negativo de água. O dado foi mantido no presente trabalho, para fins de demonstração, mas não foi utilizado em cálculos posteriores.

A partir das fórmulas empíricas foi possível calcular o potencial teórico de produção de biogás, que está apresentado na Tabela 18.

Tabela 18. Produtividade teórica de metano e biogás total e levando em consideração a degradabilidade.

Amostra	Período coleta	CH ₄	CO ₂	Biogás total	Considerando degradabilidade
				Nm ³ /tonMS	
Poda	jun/17	512,974	397,463	910,437	331,399
	nov/16	540,582	466,393	1.006,975	423,048
	dez/16	515,926	436,320	952,245	400,056
Restos de alimento	fev/17	507,174	391,129	898,303	377,394
	mar/17	521,049	457,622	978,671	411,158
	mai/17	527,475	475,512	1.002,987	421,373
	jun/17	551,491	484,847	1.036,338	435,385
Esgoto Sanitário	fev/17	45,131	192,627	237,758	184,671
	mar/17	324,463	423,080	747,544	580,630
	jun/17	418,051	425,509	843,56	655,208

4.5 Determinação do potencial de produção de biogás e concentração de metano

O ensaio de potencial técnico de produção de biogás, foi realizado utilizando como inóculo⁸ o lodo coletado em digestor anaeróbio na Estação de Tratamento de Baureri, da SABESP (

Figura 35).

Figura 35. Coleta de lodo na ETE Barueri.

Os reatores montados para ensaio foram enviados para laboratório para caracterização em termos de sólidos totais e voláteis e Demanda Química de Oxigênio (DQO) total e solúvel, com exceção do reator controle. Os resultados encontram-se na Tabela 19.

Tabela 19. Caracterização físico-química dos reatores testados durante o ensaio de potencial técnico.

Amostra	Sólidos totais	Sólidos Voláteis	DQO Total	DQO Solúvel
RT01	5,09 %	2,78 %	46.545 mgO ₂ /L	12.000 mgO ₂ /L
RT02	10,78%	10,08%	338 mgO ₂ /L	142 mgO ₂ /L
RT03	7.800 mg/l	7.440 mg/l	524 mgO ₂ /L	407 mgO ₂ /L
RT04	77,55%	62,93%	-	-

⁸ Concentração de microrganismos adaptados à condições do experimento, que serão responsáveis pela degradação anaeróbia e produção do biogás.

O comportamento dos reatores em termos de produção de biogás está demonstrado nas Figura 36,

Figura 37, Figura 38 e Figura 39.

Se forem observadas as primeiras 48 horas de ensaio (Figura 38), o esgoto sanitário e o resíduo de alimento foram os primeiros resíduos a produzir biogás, com menos de um minuto de start do ensaio, seguido pelo reator branco (1,9 horas) e por último o reator contendo podas, que iniciou a produção de biogás após 3 horas e 15 minutos de início do ensaio. Isso se deve, provavelmente, ao elevado conteúdo de lignina, conforme apresentado no Capítulo 4 - Revisão Bibliográfica.

Figura 36. Produção de biogás do reator RT01 da CUASO, durante 40 dias de ensaio e para as primeiras 48 horas, obtido no ensaio de potencial de biogás.

Figura 37. Produção de biogás do reator RT02 da CUASO, durante 40 dias de ensaio e para as primeiras 48 horas, obtido no ensaio de potencial de biogás.

Figura 38. Produção de biogás do reator RT03 da CUASO, durante 40 dias de ensaio e para as primeiras 48 horas, obtido no ensaio de potencial de biogás.

Figura 39. Produção de biogás do reator RT04 da CUASO, durante 40 dias de ensaio e para as primeiras 48 horas, obtido no ensaio de potencial de biogás.

O reator RT01, contendo somente água e o inóculo, parou a produção após 23 dias, tendo produzido um volume acumulado normal de 0,341 litros de biogás.

O reator RT02, contendo inóculo e restos de alimento, produziu biogás de forma contínua durante pouco mais de 25 dias, chegando à uma produção acumulada normalizada de 1,443 litros.

O reator RT03, contendo inóculo e esgoto sanitário, teve uma produção acumulada normalizada de 0,5173 litros de biogás, durante 24 dias.

Por fim, o reator RT04, contendo inóculo e podas trituradas, produziu biogás durante quase 25 dias, chegando à uma produção acumulada normalizada total de 1,076 litros.

A produtividade de biogás - já descontada a produção endógena do lodo – em relação à matéria seca e sólidos voláteis, para fins de comparação com a literatura e cálculo de potencial total, encontra-se na Tabela 20.

Tabela 20. Produtividade de biogás por sólidos totais, voláteis e matéria seca dos resíduos orgânicos da CUASO.

Amostra	Biogás acumulado (litros)	Biogás por sólidos totais I_N/g_{ST}	Biogás por sólidos voláteis I_N/g_{SV}	Biogás por matéria seca Nm³/tonMS
Branco	0,2598	-	-	-
Alimentos	1,1832	0,5340	0,5709	534,0381
Esgoto	0,2575	0,2063	0,1733	206,3188
Poda	0,8172	0,1053	0,1298	105,2821

Os resultados práticos apresentados ficaram distantes da produtividade teórica calculada anteriormente. Restos de alimentos obtiveram uma produtividade 22% superior ao maior valor obtido teoricamente, enquanto que a produtividade dos resíduos de poda ficou 68% inferior e do esgoto sanitário 65%(inferior ou superior?) ao potencial teórico.

A equação de Sobotka foi utilizada para calcular o percentual de metano de cada uma das amostras, conforme Tabela 21.

Tabela 21. Produtividade de metano por sólidos totais, voláteis e matéria seca dos resíduos orgânicos da CUASO.

Amostra	Metano (%)	Metano (litros)	I_N/g_{ST}	I_N/g_{SV}	Nm³/tonMS
Alimentos	54%	0,638	0,288	0,308	288,382
Esgoto	49%	0,118	0,094	0,080	101,096
Poda	56%	0,457	0,059	0,073	58,958

Grande parte dos trabalhos realizados na biodigestão de resíduos de alimentos trabalham com inóculos aclimatados. Com condições específicas, é possível alcançar produtividades de metano para restos de alimentos superiores a 0,5 l_N/g_{SV}, mas de maneira geral os valores encontrados no teste potencial de biogás encontram-se dentro dos padrões da literatura, entre 0,266 e 0,44 l_N/g_{SV}, portanto, são considerados satisfatórios (LIU *et al.*, 2009; LI, CHAMPAGNE E ANDERSON, 2011, ELBESHBISHY, NAKHLA E HAFEZ, 2012).

Os dados encontrados na literatura de produtividade de biogás por grama de sólido volátil adicionado para resíduos de poda apresentam grande variação, de 0,08 a 0,720 l_N/g_{SV} (PROCHNOW *ET AL.*, 2005⁹; MÄHNERT *ET AL.*, 2005¹⁰ apud LIU *et al.*, 2009), devido especialmente às diferentes composições – resíduo de grama, poda ou jardim.

É possível converter o conteúdo de celulose e hemicelulose dos resíduos de poda em metano e dióxido de carbono. Contudo, a taxa de degradação irá depender do quanto esses componentes estão incrustados na lignina, que não é degradável anaerobicamente. Caso a celulose esteja na forma cristalina, a hidrólise poderá ser relativamente rápida, resultando na formação de butirato e propionato (KLIMIUK *et al.*, 2010).

É possível observar na Figura 39 que aproximadamente 44 horas após o início do ensaio, a poda passa por um patamar de estabilização de geração de biogás, retomando somente após 12 dias. Esse fenômeno pode ser devido à diferente composição da amostra, uma vez que resíduos mais frescos podem ter sido consumidos primeiro, seguido por resíduos com conteúdo energético de mais difícil acesso.

⁹ PROCHNOW, A.; HEIERMANN, M.; DRENCKHAN, A.; SCHELLE, H. Seasonal pattern of biomethanisation of grass from landscape management. **CIGR e-journal**, v. 7, pp. 1-17, 2005.

¹⁰ MÄHNERT, P., HEIERMANN, M., LINKE, B. Batch- and semi-continuous biogas production from different grass species. **Agricultural Engineering International: The CIGR E-Journal**. V. 7, 11p., 2005.

4.6 Potencial energético dos resíduos orgânicos da CUASO

Para fins de cálculo do potencial total energético dos resíduos orgânicos da CUASO, serão considerados os potenciais individuais e o volume total de resíduos gerados levantados anteriormente.

No caso dos restos de alimento foram considerados dois diferentes cenários, um para a porcentagem de resíduos sob responsabilidade do SAS, de 16,3%, e outro considerando a estimativa geral gravimétrica de resíduos sólidos no Brasil, na qual a fração orgânica corresponde a 51,4%, foi considerada a média de 21,29% de sólidos totais obtidas na caracterização anteriormente discutida. Os dados mensais de produção de biogás estão na Figura 40 a seguir.

Figura 40. Potencial mensal de biogás a partir dos restos de alimentos gerados na CUASO.

Em um período de um ano o campus poderia produzir, somente a partir de resíduos de alimentos, entre 41.100 e 129.603,8 m³ de biogás, com uma média mensal de $3.425 \pm 482,956$ m³ para o cenário considerando somente o resto de alimento gerenciado pelo SAS e 10.800,317 m³ quando considerado todo o potencial de resto de alimento gerado no Campus.

Para o total de resíduos de poda gerados no campus em 2016, de 22.776 m³, considerando-se uma densidade de 148,319 kg/m³ (EPA, 2016), obtém-se um potencial desperdiçado de biogás de 275.788,90 m³ por ano.

No caso do esgoto sanitário, poderiam ser produzidos por ano 815.209,73 m³ de biogás por ano – devido ao elevado volume de esgoto gerado anualmente

–, com uma média mensal de $67.934,14 \pm 6.987,45 \text{ m}^3$, conforme demonstrado na Figura 41.

Figura 41. Potencial mensal de biogás a partir do esgoto sanitário gerado na CUASO.

Considerando-se as porcentagens de metano calculadas e o potencial energético do metano ($9,97 \text{ kWh/m}^3\text{CH}_4$), eficiência elétrica de 42% e conteúdo de metano de 90% no biometano (ANP, 2017), foi calculado o potencial energético para cada substrato. Os resultados encontram-se nas Tabela 22 e Tabela 23.

Tabela 22. Potencial energético dos resíduos orgânicos da CUASO, de acordo com potencial teórico

Amostra	Biogás Nm³/ano	Metano Nm³/ano	Energia Elétrica MWh/ano	Biometano Nm³/ano
Restos de alimento (SAS)	31.661,857	17.097,403	71,594	18.997,114
Restos de alimento (total)	99.841,683	53.914,509	225,762	59.905,010
Esgoto Sanitário	1.395.438,80	641.901,85	2.687,90	713.224,27
Poda	868.124,67	486.149,82	2.035,70	540.166,46

A partir dos dados de potencial teórico, pode-se estimar que a CUASO tem um potencial de produção de biogás a partir de resíduos orgânicos que varia entre 2.295.225,33 e 2.363.405,15 m³ por ano. Esse volume de biogás poderia gerar entre 4.795,19 e 4.949 MWh de energia elétrica por ano, com possibilidade de aproveitamento de energia térmica por cogeração, ou entre 1.272.387,84 e 1.313.295,74 m³ de biometano por ano, que poderia ser utilizado na frota da Universidade, comercializado para a rede de gás canalizado ou aplicado na cocção dos restaurantes do campus.

Quando são aplicados os fatores de produtividade obtidos no ensaio potencial de biogás, o potencial de geração de energia elétrica e térmica cai para entre 2.309,91 e 2.510,03 MWh e de geração de biometano para entre 612.924,75 e 666.017,01 m³ por ano.

Tabela 23. Potencial energético dos resíduos orgânicos da CUASO, de acordo com potencial de biogás.

Amostra	Biogás Nm³/ano	Metano Nm³/ano	Energia Elétrica MWh/ano	Biometano Nm³/ano
Restos de alimento (SAS)	41.100,038	22.194,020	92,935	24.660,023
Restos de alimento (total)	129.603,8	69.986,052	293,06	77.752,28
Esgoto Sanitário	815.209,73	374.996,48	1.570,26	416.662,75
Poda	275.788,90	154.441,78	646,71	171.601,98

4.7 Planta de aproveitamento energético a partir do biogás da CUASO

A partir dos dados de produtividade, segue o dimensionamento de uma unidade de aproveitamento energético por biogás a partir dos resíduos orgânicos da CUASO.

O dimensionamento do digestor central pode ser calculado de acordo com a equação a seguir:

$$V = TRH \times Q \quad (24)$$

Onde, V representa o volume total do digestor, em m^3 , Q é a vazão, em m^3/dia e TRH representa o Tempo de Retenção Hidráulica, em dias.

A vazão, neste caso, será considerada a produção volumétrica total, dividida pelo número de dias. Para garantia de uma alimentação constante, são propostas duas diferentes unidades pulmão, a primeira para condicionamento dos resíduos de alimentos triturados e uma para os resíduos de poda, que possuem flutuação mais acentuada de geração. O esgoto sanitário, por sua vez, que possui menor flutuação e maior volume de geração, será carregado em vazão constante de acordo com a geração.

O volume total de resíduos, anual, é:

- 361,49 a 1.139,91 toneladas de restos de alimento, ou seja, uma vazão diária entre 1,927 a 6,076 metros cúbicos¹¹;
- 22.774,125 m^3 de podas por ano, ou seja, uma vazão diária de 62,39 metros cúbicos;
- 710.650 metros cúbicos por ano de esgoto sanitário, com uma vazão diária entre 1.741,645 e 2.233,633.

A partir dos dados de vazão dos substratos, percebe-se que os volumes de resíduos com alta carga de sólidos – alimentos e podas – é irrisório, frente ao volume de esgoto sanitário. Portanto, duas estratégias distintas podem ser tomadas a partir desse panorama: trabalhar em um reator de alta taxa, para reduzir custos de implementação, ou redução do uso de esgoto, a fim de continuar com o uso de um reator convencional, mas com menor volume. A vantagem de se utilizar um reator de alta taxa reside na possibilidade de alta produtividade em um menor tempo de retenção. No entanto, reatores de alta taxa tem baixíssima flexibilidade operacional, alta instabilidade e a instalação de um reator de alta taxa poderia oferecer poucas vantagens em termos de pesquisa e desenvolvimento para a Universidade como um todo. Ainda, conforme discutido anteriormente, o Campus já possui um reator UASB instalado no CTH, que poderia ser utilizado tanto para pré-tratamento quanto pós-tratamento em um centro integrado que permitisse diversas configurações distintas, expandindo os conhecimentos técnicos dos pesquisadores e alunos.

¹¹ Densidade de restos de alimentos igual a 514 kg/m^3 , de acordo com dados da EPA-AU (S/D).

Desta forma, optou-se por um sistema de concentração de sólidos o que, além de reduzir os custos com a implementação, irá aumentar a carga orgânica volumétrica, trazendo maior eficiência para o projeto. Já existem no mercado diversas soluções para a concentração de sólidos, com possibilidade de utilizar a energia térmica remanescente da cogeração. Um exemplo de concentrador comercial é o LM-HT® Concentrator (Figura 42).

De acordo com o fabricante, o concentrador usa calor residual de turbinas a gás e flares para sua operação, reduzindo o OPEX da unidade, já tendo aplicação em unidades de biogás, inclusive.

Figura 42. Concentrador Heartland.
Fonte: Heartland Water Technology, SD.

Assim, sugere-se concentração mínima de 50% do efluente. Desta maneira, a COV, anteriormente de 2,537 kgSV/m³.dia, passaria a um patamar melhor de 4,928.

O parâmetro de COV é de extrema importância para o sucesso do processo de biodigestão. Uma vez que altas COVs podem resultar em instabilidade do processo devido ao acúmulo de AOVs e nitrogênio amoniacal (NH₄⁺). Em caso

de baixa COV, os microrganismos responsáveis pela fermentação podem ser prejudicados devido à falta de AOVs (JIANG *et al*, 2013).

No caso dos substratos utilizados nesse projeto, os restos de alimento são o componente com maior restrição em termos de COV, devido sua alta solubilização, o que permite uma rápida acidificação do meio. Quando se trata, especialmente, da co-digestão com alto volume de água, além da COV, devem ser evitados baixos TRHs, uma vez que poderá provocar um acúmulo irreversível de AOVs. Na literatura é possível encontrar taxas de COV sendo aplicadas entre 1 até 10 kg/m³.dia, dependendo do tipo de resíduo e característica (CURRY e PILLAY, 2012; NAGAO *et al.*, 2012). Em um estudo com diversas faixas de COV, NAGAO *et al.* (2012) demonstrou ser possível alcançar uma operação estável em altas taxas de COV, de 9,2 a 10,5 kgSV/m³.dia. Portanto, a COV a ser aplicada nesse projeto está dentro da faixa adequada, sendo conservadora, de maneira a permitir flexibilização futura.

Por fim, para o dimensionamento do reator, será considerada somente a vazão máxima de alimentos e uma vazão de 1.116,817 m³ de esgoto sanitário, levando em consideração uma concentração de 50% de sólidos. Assim, a vazão total diária de resíduos e efluente considerada é de 1.185,283 metros cúbicos.

De acordo com o ensaio potencial de biogás realizado, a estabilização de produção de biogás ocorreu em até 25 dias para todos os substratos. Considerando que o processo de co-digestão deve melhorar a eficiência deste processo, será considerado um TRH de 20 dias para o dimensionamento.

Desta forma, o volume total do digestor deverá ser de 26.076,215 m³, considerando um *headspace* de 10%.

4.7.1 Concepção da planta

A planta de biogás aqui sugerida (Figura 43) deve ser pensada não somente para a geração de energia. A unidade deve ampliar as possibilidades de pesquisa e desenvolvimento na área, tornando a USP referência também na busca por soluções sustentáveis, não somente em caráter especulativo, mas também na formação de profissionais com excelência técnica e que possam buscar na vivência e contato com tecnologias de ponta as melhores opções para sanar os problemas de seu entorno.

Figura 43. Conceito da planta de aproveitamento de biogás a partir de resíduos orgânicos da CUASO.

Fonte: Autora.

Desta maneira, as unidades operacionais e esquema de alimentação que estão demonstradas a seguir, tem como intuito sugerir um conceito de laboratório em escala real.

A partir do conceito apresentado, são possíveis os seguintes arranjos:

- Inclusão do UASB já existente como pós ou pré-tratamento;
- Utilização dos reatores CSTR em dois estágios (primário e secundário);
- PD&I em diversas formas de pós-tratamento do digestado, em sinergia com estudos que já estão ocorrendo no CTH;
- Estudo de despachabilidade relacionada à preço horário;
- Desenvolvimento de plantas flexíveis (energia elétrica e biometano)

A capacidade de estocagem dos substratos foi considerada para um período de 4 dias, enquanto que a vazão de esgoto deve ser considerada contínua. Restos de alimentos devem ser bombeados para o triturador, enquanto que resíduos de poda podem ser encaminhados via esteira.

A concepção da planta leva em conta a existência de dois reatores, de mistura completa, a fim de permitir possíveis manutenções, além do estudo de diferentes configurações.

Outro importante fator a ser considerado na concepção da planta, são os parâmetros mínimos de controle, já especificados na Figura 25. Sugere-se aplicação de todos os parâmetros de controle, para fins de pesquisa e desenvolvimento.

Dentro do projeto de concepção da planta surge, ainda, o debate sobre a melhor aplicação do digestado e como as normas brasileiras estão posicionadas em termos burocráticos e operacionais para uso final desse co-produto do processo de biodigestão.

É possível se utilizar o material biodigerido na função de biofertilizante, desde que observadas normas existentes, bem como consultados os entes reguladores pertinentes. As cargas máximas a serem aplicadas devem estar em acordo com a Resolução CONAMA nº 375/2006, sendo sempre observadas as necessidades em termos de nutrientes do solo que está recebendo o fertilizante. Para aplicação do material proveniente de esgoto sanitário, ainda deve ser observada a necessidade de higienização do digestado, para garantir a completa

destruição de patógenos. São diversas as opções de higienização, sendo mais comuns as opções de tratamento térmico, pré ou pós biodigestão, compostagem e calagem (FEAM, 2015). Uma vez que a carga térmica aplicada na higienização é de 70°C por uma hora, é possível que já sejam atingidas as especificações no processo de concentração de sólidos, prévio à biodigestão.

4.8 Usos finais do biogás e seu impacto econômico

Conforme discutido anteriormente, diversos são os indicadores utilizados ao longo da literatura para auxiliar na melhor aplicação dos recursos energéticos disponíveis.

De acordo com dados da PUSP-C, no ano de 2017 foram consumidos 79.039,786 MWh de energia elétrica no CUASO, à um custo total de 30,53 milhões de reais (Figura 44).

Figura 44. Consumo de energia elétrica e custos total por mês durante o ano de 2017 na CUASO.

Fonte: PUSCP-C, 2018

A média mensal de consumo é de 6,58 GWh, com pico de consumo em fevereiro, o que deve estar relacionado ao uso de ar-condicionado durante época de início do ano letivo.

De acordo com os dados apresentados nas Tabela 22 e Tabela 23, é possível gerar de entre 4.795,19 e 4.949,362 MWh – considerando sempre o volume total de orgânicos, não somente o controlado pelo SAS –, ou seja, o

volume de energia atualmente desperdiçado representa entre 5 e 6% da demanda de energia elétrica do Campus. Em termos de capacidade instalada, considerando um fator de capacidade de 85%, isso significa entre 644 kW e 665 kW e, de acordo com a ABiogás, o custo para implementação de uma planta eficiente é de R\$ 9,2 milhões por MW. Desta maneira, os custos para implementação da planta encontram-se entre 5,9 e 6,12 milhões de reais.

Com a economia anual entre R\$ 872,56 e 1,65 milhões, já considerando um autoconsumo de 10% para funcionamento da própria planta, o investimento seria pago em 3,6 anos. A energia térmica produzida seria utilizada no condensador, por isso não foi contabilizada para retorno do investimento.

O biometano, por sua vez, pode ser utilizado como substituto do diesel e da gasolina consumidos no campus. Não foram encontrados dados, no entanto, a respeito da frota atual e consumo de combustível no campus, portanto, não pode ser considerada a análise para essa aplicação final.

4.9 Planta conceito de produção de biogás - Chamada Pública de Projetos Prioritário de Eficiência Energética PROPEE – 01/2016

Como resultado no trabalho desenvolvido nessa tese, foi encaminhada proposta de Projeto à Elektro, dentro da Chamada de “Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior”. Junto com propostas de eficiência energética e instalação de uma planta híbrida biogás-fotovoltaica.

O projeto citado foi aprovado e já se encontra em andamento, e contará com uma unidade de demonstração de produção biogás. Os projetos conceituais e memória de cálculo apresentados se encontram nos Anexos 1 e 2 desta tese.

5 CONCLUSÕES

A Universidade de São Paulo é uma grande referência em termos de pesquisa, desenvolvimento, inovação e capacitação nos mais diversos setores. No entanto, ainda faltam iniciativas mais sólidas no que tange à capacitação de profissionais para atuar no setor de aproveitamento energético de resíduos orgânicos a partir do biogás.

As iniciativas relacionadas ao uso mais sustentável de energia e o desenvolvimento de técnicas e procedimentos que auxiliem a comunidade como um todo ainda carecem de continuidade e maior efetividade, uma vez que grande parte já foram abandonadas, ou tiveram poucas ações finalizadas, como é o caso do Programa Campus Sustentável.

Ainda, existe um esforço coletivo de funcionários para que a Universidade possa ser um ambiente sustentável, com especial atenção ao trabalho da SAS, que é a responsável pela gestão de resíduos da Universidade. No entanto, apesar dos esforços, o número de pessoas envolvidas e recursos disponíveis para efetivação de uma gestão mais adequada ainda carece de melhorias.

Desta maneira, a USP poderia usar da sua grande força-motora: a presença dos profissionais do futuro e de pesquisadores do mais alto nível, para criar programas que envolvam toda a comunidade acadêmica e do entorno, de maneira a se tornar um grande laboratório de sustentabilidade.

Durante o levantamento qualitativo e quantitativo de geração de resíduos da CUASO, foi possível verificar uma gestão adequada dos resíduos de poda e restos de alimento, o que é um grande aliado do aproveitamento energético por biogás, uma vez que reduz os custos com pré-tratamento, muitas vezes indispensável quando se extrapola esse caso para ambientes urbanos como um todo.

Essa tese faz parte de uma iniciativa do Instituto de Energia e Meio Ambiente de criar programas de longa data para estudo de assuntos relacionados à energia, especialmente eficiência energética e energias renováveis. A implementação do Laboratório de Desenvolvimento de Biocombustíveis passou por diversas dificuldades, tendo demorado mais de um ano para sua finalização. Apesar dessas dificuldades, o Laboratório encontra-se hoje em pleno funcionamento, com possibilidade de dar suporte ao

desenvolvimento de diversos trabalhos, especialmente àqueles relacionados ao desenvolvimento de biogás e biodiesel.

Outros laboratórios, que são auxiliares e parceiros do Laboratório de Desenvolvimento de Biocombustíveis, precisam ainda se capacitar e se aprofundar nas técnicas e metodologias envolvidas no estudo de energia a partir de resíduos. Destaca-se a necessidade de capacitação para análise de composição gasosa, análise elementar e caracterização físico-química.

Em termos técnicos, o levantamento do potencial teórico de biogás a partir da análise elementar pode ser uma interessante alternativa para compreender a eficiência de conversão da fração orgânica dos resíduos em biogás. Nesse estudo, a comparação entre o potencial teórico e valor obtido no ensaio de potencial de biogás demonstram que grande parte do conteúdo energético – especialmente de podas e esgoto sanitário – não foi convertida, havendo ainda grande potencial de produção.

O levantamento do potencial técnico de resíduos se mostrou uma importante ferramenta para compreensão da produtividade de biogás. Os resultados obtidos pela combinação das duas metodologias impulsionaram o desenvolvimento dessa tese, permitindo um levantamento mais aproximado do real potencial energético dos resíduos do campus. Em contrapartida, ambas metodologias demandam de atenção em termos de domínio das técnicas, de maneira a contribuir de forma ainda mais significativa para o desenvolvimento de estudos de biogás para outros resíduos.

Os dados e informações gerados em termos de potencial técnico e teórico de biogás demonstram que a USP possui um elevado potencial de produção de biogás, com suprimento de até 6% da demanda de energia elétrica da CUASO.

Além dos impactos financeiros relacionados à conta de energia elétrica – hoje no patamar de mais de 30 milhões de reais por ano –, podem ser contabilizados ainda: redução da despesa com coleta e disposição final dos resíduos do campus, redução de despesa com o consumo de fertilizantes, uma vez que parte da área verde poderia utilizar o digestado, devidamente tratado, como fertilizante, redução dos gastos com combustível para frota própria, caso seja produzido biometano. Ainda, a taxa de retorno do investimento é de grande atratividade, uma vez que o investimento seria pago em menos de 4 anos.

A concepção da planta sugerida nesse trabalho tem por objetivo congrega grupos de estudos em energia, engenharia, ciências ambientais, entre outros. No entanto, essa concepção não deve ser compreendida como um trabalho de engenharia, e sim como um fluxograma esquemático para demonstração das unidades que podem estar presentes na planta.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

Por fim, esse trabalho mostrou-se como o início de um trabalho conjunto entre diversas unidades da USP: IEE, Politécnico, SAS, ESALQ e Instituto de Química, e a partir dele podem ser desenvolvidos diversos estudos, apresentados aqui como sugestões para trabalhos futuros:

- Levantamento do potencial técnico com diferentes lodos;
- Aclimação do lodo, a fim de se obter melhor produtividade no ensaio de potencial de biogás;
- Estudo da codigestão em escala de bancada, a fim de compreender os impactos da técnica;
- Proposição de gerenciamento de resíduos orgânicos no campus tendo em vista o aproveitamento energético;
- Exploração dos atuais modelos matemáticos e sua melhoria, a partir da utilização de dados primários;
- Levantamento do impacto ambiental do aproveitamento dos resíduos do campus;
- Desenvolvimento de metodologias de pós-tratamento e aproveitamento do digestado;
- Captação de dados primários para o desenvolvimento de políticas públicas, como o exemplo da RenovaCalc, dentro do RenovaBio;
- Seleção de lodos e microrganismos para aumento da produtividade;
- Desenvolvimento do modelo conceito de planta;
- Automação e controle de plantas de biogás e seu impacto econômico e em termos de produtividade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABELLEIRA-PEREIRA, J. M., PÉREZ-ELVIRA, S. I., SÁNCHEZ-ONETO, J., DE LA CRUZ, R., PORTELA, J. R., NEBOT, E.. Enhancement of methane production in mesophilic anaerobic digestion of secondary sewage sludge by advanced thermal hydrolysis pretreatment. *Water research*, v. 71, p. 330-340, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 482/2012 de 17 de abril de 2012.

_____ Resolução Normativa nº 687/2015 de 24 de novembro 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Resolução ANP Nº 685 de 29 de junho de 2017.

AHRING, B. K.. Perspectives for Anaerobic Digestion. In: P.F. Pind; Birgitte K. Ahring; B. K. Ahring; *et al.* (Eds.); *Biomethanation I*. v. 82, p.1-30. Berlin: Springer-Verlag. doi: 10.1007/3-540-45838-7, 2003.

ALI SHAH, F., MAHMOOD, Q., MAROOF SHAH, M., PERVEZ, A., AHMAD ASAD, S.. Microbial ecology of anaerobic digesters: the key players of anaerobiosis. *The Scientific World Journal*, v. 2014, 2014.

ALTOÉ, L., COSTA, J. M., OLIVEIRA FILHO, D., MARTINEZ, F. J. R., FERRAREZ, A. H., VIANA, L. D. A. Políticas públicas de incentivo à eficiência energética. *Estudos Avançados*, v. 31, n. 89, p. 285-297, 2017.

AMIR, S., JOURAIPHY, A., MEDDICH, A., EL GHAROUS, M., WINTERTON, P., HAFIDI, M. Structural study of humic acids during composting of activated sludge-green waste: elemental analysis, FTIR and ¹³C NMR. *Journal of hazardous materials*, v. 177, n. 1-3, p. 524-529, 2010.

ANG, B. W. Monitoring changes in economy-wide energy efficiency: from energy–GDP ratio to composite efficiency index. *Energy Policy*, v. 34, n. 5, p. 574-582, 2006.

ANGELIDAKI, I., ALVES, M., BOLZONELLA D., BORZACCONI L., CAMPOS, J. L., GUWY, A. J., KALYUZHNYI, S., JENICEK, P., VAN LIER J. B. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water science and technology*, v. 59, n. 5, p. 927-934, 2009.

ANGELIDAKI, Irini; SANDERS, Wendy. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *ReViews in Environmental Science & Bio/Technology*, v. 3, n. 2, p. 117-129, 2004.

ARIUNBAATAR, J., PANICO, A., ESPOSITO, G., PIROZZI, F., LENS, P. N.. Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste. *Applied energy*, v. 123, p. 143-156, 2014.

ARIUNBAATAR, J., PANICO, A., FRUNZO, L., ESPOSITO, G., LENS, P. N., PIROZZI, F.. Enhanced anaerobic digestion of food waste by thermal and ozonation pretreatment methods. *Journal of environmental management*, v. 146, p. 142-149, 2014.

Associação Brasileira de Biogás e Biometano (ABIOGÁS). Nova Geração do Biogás. In: Seminário Técnico Nova Geração do Biogás. Maio 2018. São Paulo. 2018.

BABEL, S.; SAR-TANG, J.; PECHARAPLY, A.. Anaerobic co-digestion of sewage and brewery sludge for biogas production and land application. *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, v. 6, n. 1, p. 131-140, 2009.

BANDARA, W. M.K.R.T.W; SATOH, H.; SASAKAWA, M.; NAKAHARA, Y.; TAKAHASHI, M.; OKABE, S.. Removal of residual dissolved methane gas in an upflow anaerobic sludge blanket reactor treating low-strength wastewater at low temperature with degassing membrane. *Water Research*, v. 45, p. 3533-3540, 2011.

BANKS, C. J., CHESSHIRE, M., HEAVEN, S., ARNOLD, R. Anaerobic digestion of source-segregated domestic food waste: performance assessment by mass and energy balance. *Bioresource technology*, v. 102, n. 2, p. 612-620, 2011.

BANKS, C. J., SALTER, A. M., HEAVEN, S., E RILEY, K. Energetic and environmental benefits of co-digestion of food waste and cattle slurry: A preliminary assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 56, n. 1, p. 71-79, 2011.

BARATTA JR., A. P. Utilização do composto de resíduos da poda da arborização urbana em substratos para produção de mudas. 62f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), 2007.

BARNETT, H. J.; MORSE, C.. Scarcity and growth: the economics of natural resource availability. Routledge, 2013.

BIOPROCESS CONTROL. AMPTS II. Disponível em: <http://www.bioprocesscontrol.com/>. Acesso em: 12 de abril de 2018.

BOUŠKOVÁ, A.; DOHÁNYOS, M.; SCHMIDT, J.E.; ANGELIDAKI, I.. Strategies for changing temperature from mesophilic to thermophilic conditions in anaerobic CSTR reactors treating sewage sludge. *Water Research*, v. 39, n. 8, p. 1481-1488, 2005.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de Dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências.

BROWN, D.; LI, Y. Solid state anaerobic co-digestion of yard waste and food waste for biogas production. *Bioresource technology*, v. 127, p. 275-280, 2013.

BUNSE, K., VODICKA, M., SCHÖNSLEBEN, P., BRÜLHART, M., & ERNST, F. O. Integrating energy efficiency performance in production management-gap

analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 6-7, p. 667-679, 2011.

CAMPUZANO, R. GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, S. Extraction of soluble substances from organic solid municipal waste to increase methane production. *Bioresource technology*, v. 178, p. 247-253, 2015.

CAPORGNO, M.P.; TROBAJO, R.; CAIOLA, N.; IBÁÑEZ, C.; FABREGAT, A.; BENGIOA, C.. Biogas production from sewage sludge and microalgae co-digestion under mesophilic and thermophilic conditions. *Renewable Energy*, v. 75, p. 374-380, 2015.

Centro Integrado de Energia Renováveis – Biogás (CIBIOGÁS). CIBiogás apresenta case de produção de biogás no IV Fórum do Biogás. 14 de agosto de 2018. Disponível em: <https://cibiogas.org/participacaoabiogas>. Acesso em: 12 de abril de 2018.

CERVANTES, F. J.; PAVLOSTATHIS, S. G.; VAN HAANDEL, A. C.. Advanced biological treatment processes for industrial wastewaters. *Integrated environmental technology series*, v. 345, 2006.

CHEN, X., YAN, W., SHENG, K., SANATI, M. Comparison of high-solids to liquid anaerobic co-digestion of food waste and green waste. *Bioresource technology*, v. 154, p. 215-221, 2014.

CHEN, X.; ROMANO, R. T.; ZHANG, R. Anaerobic digestion of food wastes for biogas production. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v. 3, n. 4, p. 61-72, 2010.

CHEN, Y.; CHENG, J. J.; CREAMER, K. S.. Inhibition of anaerobic digestion process: a review. *Bioresource technology*, v. 99, n. 10, p. 4044-4064, 2008.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. *Reatores Anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. 2º ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 3 80 p. Vol. 5, 2007.

CHO, JAE KYOUNG; PARK, SOON CHUL; CHANG, HO NAM. Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food wastes. *Bioresource technology*, v. 52, n. 3, p. 245-253, 1995.

CONTRERA, Ronan Cleber. *Tratamento de lixiviados de aterros sanitários em sistema de reatores anaeróbio e aeróbio operados em batelada seqüencial*. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CURRY, N.; PILLAY, P. Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment. *Renewable Energy*, v. 41, p. 200-209, 2012.

CURRY, N.; PILLAY, P. Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment. *Renewable Energy*, v. 41, p. 200-209, 2012.

D'AQUINO, C.A., MELLO, T. C . de, COSTA JR., L. C. Efeito da variação da carga orgânica volumétrica natural na produção de biogás a partir de dejetos suíno

em diferentes tempos de retenção hidráulica. In: Congresso ABES FENASAN 2017. São Paulo. Anais. 2017.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction. Wiley-VCH, 2008.

DIAMANTIS, V. I., KAPAGIANNIDIS, A. G., NTOUGIAS, S., TATAKI, V., MELIDIS, P., & AIVASIDIS, A.. Two-stage CSTR–UASB digestion enables superior and alkali addition-free cheese whey treatment. Biochemical Engineering Journal, v. 84, p. 45-52, 2014.

DUTTA, B.K.; Principle of mass transfer and separation processes. Nova Deli. 3th ed. 2007.

ELANGO, D.; PULIKESI, M.; BASKARALINGAM, P.; RAMAMURTHI, V.; SIVANESAN, S.. Production of biogas from municipal solid waste with domestic sewage. Journal of Hazardous Materials, v. 141, n. 1, p. 301-304, 2007.

ELBESHBISHY, Elsayed; NAKHLA, George; HAFEZ, Hisham. Biochemical methane potential (BMP) of food waste and primary sludge: influence of inoculum pre-incubation and inoculum source. Bioresource technology, v. 110, p. 18-25, 2012.

ELLIOTT, A.; MAHMOOD, T.. Comparison of mechanical pretreatment methods for the enhancement of anaerobic digestion of pulp and paper waste activated sludge. Water environment research, v. 84, n. 6, p. 497-505, 2012.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). Minimum efficiency standards for electric motors will soon increase. 14 set. 2014. Disponível em: < <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=18151> >. Acesso em: 13 de março de 2018.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). The potential benefits of distributed generation and rate-related issues that may impede their expansion: of the energy policy act of 2005. Fev. 2007. Disponível em: < <https://www.ferc.gov/legal/fed-sta/exp-study.pdf> >. Acesso em: 27 de março de 2018.

_____. Volume-to-Weight Conversion Factors U.S. Environmental Protection Agency Office of Resource Conservation and Recovery. Abril 2016. Disponível em: < https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-04/documents/volume_to_weight_conversion_factors_memorandum_04192016_508fml.pdf >. Acesso em: 03 de novembro de 2018.

Environmental Protection Agency Victoria (EPA-VIC). Waste Materials – Density Data. Disponível em: < <https://www.epa.vic.gov.au/business-and-industry/lower-your-impact/~media/Files/bus/ERP/docs/wastematerials-densities-data.pdf> >. Acesso em: 03 de novembro de 2018.

ERCIN, A. Ertug; HOEKSTRA, Arjen Y. European water footprint scenarios for 2050. Water, v. 8, n. 6, p. 226, 2016.

FEDERAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). Guia técnico e ambiental de biogás na agroindústria. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2015.

FEDALTO, L.; TORRENS, J.C.L.; MENDES, M.A.; D'AQUINO, C.A.; COSTA JR., L.C. da; MELLO, T.C. de. Princípios da Digestão Anaeróbia: Revisão Bibliográfica. AES Uruguaiana; Jun. 2011. Contrato N°: 4619000052.

FERNANDES, T. V., BOS, G. K., ZEEMAN, G., SANDERS, J. P. M., VAN LIER, J. B.. Effects of thermo-chemical pre-treatment on anaerobic biodegradability and hydrolysis of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology*, v. 100, n. 9, p. 2575-2579, 2009.

FERRER, I.; PONSÁ, S.; VASQUEZ, F.; FONT, X.. Increasing biogas production by thermal (70 °C) sludge pretreatment prior to thermophilic anaerobic digestion. *Biochemical Engineering Journal*, v. 42, n. 2, p. 186-192, 2008.

FIRDAUS, A. R. M.; SAMAH, M. A. A.; HAMID, K. B. A. CHNS analysis towards food waste in composting. *Journal CleanWAS*, v. 2, n. 1, p. 6-10, 2018.

FIRMO, A. L. B. Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos. 285f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). – Universidade Federal de Pernambuco. 2013.

FITAMO, T., BOLDRIN, A., BOE, K., ANGELIDAKI, I., SCHEUTZ, C. Co-digestion of food and garden waste with mixed sludge from wastewater treatment in continuously stirred tank reactors. *Bioresource technology*, v. 206, p. 245-254, 2016.

GLÓRIA, R. M., MOTTA, T. M., SILVA, P. V. O., COSTA, P. D., BRANDT, E. M. F., SOUZA, C. L., CHERNICHARO, C. A. L. Stripping and dissipation techniques for the removal of dissolved gases from anaerobic effluents. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 33, n. 4, p. 713-721, 2016.

GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, C., SIALVE, B., BERNET, N., STEYER, J. P.. Thermal pretreatment to improve methane production of *Scenedesmus* biomass. *biomass and bioenergy*, v. 40, p. 105-111, 2012.

GÜELFO, L. F., ÁLVAREZ-GALLEGO, C., MÁRQUEZ, D. S., GARCÍA, L. R.. The effect of different pretreatments on biomethanation kinetics of industrial Organic Fraction of Municipal Solid Wastes (OFMSW). *Chemical engineering journal*, v. 171, n. 2, p. 411-417, 2011.

GYNTHER, L., MUSTONEN, S., SAARIVIRTA, E. Policies and Measures for Promoting Efficient Electric Motors in Industry. Final Report, 2016.

HANSEN, T. L.; LA COUR JANSEN, J.; DAVIDSSON, Å.; CHRISTENSEN, T. H.. Effects of pre-treatment technologies on quantity and quality of source-sorted municipal organic waste for biogas recovery. *Waste Management*, v. 27, n. 3, p. 398-405, 2007.

HARTLEY, K.; LANT, P.. Eliminating Non-Renewable CO₂ Emissions From Sewage Treatment: An Anaerobic Migrating Bed Reactor Pilot Plant Study. *Biotechnol Bioeng.*, v. 95, n. 3, p. 384-398. 2006.

HATAMOTO, M.; YAMAMOTO, H.; KINFAICHI, T.; OZAKI, N.; OHASHI, A.. Biological oxidation of dissolved methane in effluents from anaerobic reactors using a down-flow hanging sponge reactor. *Water Research*, v. 44; n. 5, p. 1409-1418, 2010.

HEARTLAND WATER TECHNOLOGY. Industrial Wastewater Treatment. Disponível em: < <https://www.heartlandtech.com/industrial-wastewater-treatment/>>. Acesso em: 03 de novembro de 2018.

HUPKA, J. CENIAN, A., PAULSRUD, B., SZATKOWSKA, B., ARANOWSKI, R., DEMBOWSKA, K. ORGANIC WASTE - A RENEWABLE ENERGY SOURCE: Process solutions for production and use of biogas and digestate resulting from organic waste in the Pomeranian voivodeship. Out. 2016. Disponível em: < http://www.pom-biogas.eu/sites/default/files/pom_biogas_final_publication_october_2016.pdf>. Acesso em: 12 abril 2018.

IBGE - 2011
http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1998&id_pagina=1. Acesso em 05, ago 2014.

IZUMI, K., OKISHIO, Y. K., NAGAO, N., NIWA, C., YAMAMOTO, S., TODA, T.. Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste. *International biodeterioration & biodegradation*, v. 64, n. 7, p. 601-608, 2010.

JAIN, S., JAIN, S., WOLF, I. T., LEE, J., TONG, Y. W.. A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 52, p. 142-154, 2015.

JEIHANIPOUR, A., ASLANZADEH, S., RAJENDRAN, K., BALASUBRAMANIAN, G., & TAHERZADEH, M. J.. High-rate biogas production from waste textiles using a two-stage process. *Renewable energy*, v. 52, p. 128-135, 2013.

JIANG, J., ZHANG, Y., LI, K., WANG, Q., GONG, C., LI, M. Volatile fatty acids production from food waste: effects of pH, temperature, and organic loading rate. *Bioresource technology*, v. 143, p. 525-530, 2013.

KAPARAJU, P.L.N., RINTALA, J.A., Effects of temperature on post-methanation of digested dairy cow manure in a farm-scale biogas production system. *Environ. Technol.* V. 24, p. 1315–1321. 2003.

KAUARK, Fabiana da Silva; MANHÃES, Fernanda Castro; MEDEIROS, Carlos Henrique. *Metodologia da pesquisa: um guia prático*. 2010.

KEATING, Ciara. Hydrolysis, methanogenesis and bioprocess performance during low-temperature anaerobic digestion of dilute wastewater. Tese (PhD). Universidade Nacional da Irlanda, 234p. 2015.

KEYMER, P., RUFFELL, I., PRATT, S., LANT, P.. High pressure thermal hydrolysis as pre-treatment to increase the methane yield during anaerobic digestion of microalgae. *Bioresource technology*, v. 131, p. 128-133, 2013.

KIM, J. K., OH, B. R., CHUN, Y. N., KIM, S. W. Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic digestion of food waste. *Journal of Bioscience and bioengineering*, v. 102, n. 4, p. 328-332, 2006.

KLIMIUK, E., POKÓJ, T., BUDZYŃSKI, W., DUBIS, B. Theoretical and observed biogas production from plant biomass of different fibre contents. *Bioresource technology*, v. 101, n. 24, p. 9527-9535, 2010.

LABATUT, R. A.; ANGENENT, L. T.; SCOTT, N. R. Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates. *Bioresource technology*, v. 102, n. 3, p. 2255-2264, 2011.

LACERDA, M. I. Realizando o Programa RenovaBio. In: Workshop Estratégico CTBE sobre o RenovaBio. Campinas. Apresentações. CTBE, 2018.

LAMBIN, E. F.; MEYFROIDT, P. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 108, n. 9, p. 3465-3472, 2011.

LAPUERTA, M., HERNÁNDEZ, J. J., RODRÍGUEZ, J. Kinetics of devolatilisation of forestry wastes from thermogravimetric analysis. *Biomass and Bioenergy*, v. 27, n. 4, p. 385-391, 2004.

LETTINGA, G.; MAN, A.; LAST, A.; WIEGANT, W.; KNIPPENBERG, K.; FRIJNS, J.; BUREN, J.. Anaerobic treatment of domestic sewage and wastewater. *Water Science & Technology*, v. 27, n. 9, p. 175-183, 1993.

LEUER, E. R., HYDE, J., RICHARD, T. L.. Investing in methane digesters on Pennsylvania dairy farms: Implications of scale economies and environmental programs. *Agricultural and Resource Economics Review*, v. 37, n. 2, p. 188-203, 2008.

LI, C.; CHAMPAGNE, P.; ANDERSON, B. C. Evaluating and modeling biogas production from municipal fat, oil, and grease and synthetic kitchen waste in anaerobic co-digestions. *Bioresource technology*, v. 102, n. 20, p. 9471-9480, 2011.

LI, Y., ZHANG, R., LIU, G., CHEN, C., HE, Y., LIU, X. Comparison of methane production potential, biodegradability, and kinetics of different organic substrates. *Bioresource technology*, v. 149, p. 565-569, 2013.

LI, Y., ZHANG, R., LIU, G., CHEN, C., HE, Y., LIU, X. Comparison of methane production potential, biodegradability, and kinetics of different organic substrates. *Bioresource technology*, v. 149, p. 565-569, 2013.

LIU, G., ZHANG, R., EL-MASHAD, H. M., DONG, R. Effect of feed to inoculum ratios on biogas yields of food and green wastes. *Bioresource technology*, v. 100, n. 21, p. 5103-5108, 2009.

LIU, G., ZHANG, R., EL-MASHAD, H. M., DONG, R. Effect of feed to inoculum ratios on biogas yields of food and green wastes. *Bioresource technology*, v. 100, n. 21, p. 5103-5108, 2009.

LIU, G., ZHANG, R., EL-MASHAD, H. M., DONG, R. Effect of feed to inoculum ratios on biogas yields of food and green wastes. *Bioresource technology*, v. 100, n. 21, p. 5103-5108, 2009.

MA, J., DUONG, T. H., SMITS, M., VERSTRAETE, W., CARBALLA, M.. Enhanced biomethanation of kitchen waste by different pre-treatments. *Bioresource technology*, v. 102, n. 2, p. 592-599, 2011.

MALINA, J. F. J.; POHLAND, F. G. Design of Anaerobic Processes for Treatment of Industrial and Municipal Waste, Volume VII (W. W. Eckenfelder, J. F. Jr. Malina, J. W. Patterson, Eds.). p.228. Boca Raton: CRC Press, 1992.

MARAÑÓN, E., CASTRILLÓN, L., QUIROGA, G., FERNÁNDEZ-NAVA, Y., GÓMEZ, L., GARCÍA, M. M. Co-digestion of cattle manure with food waste and sludge to increase biogas production. *Waste management*, v. 32, n. 10, p. 1821-1825, 2012.

MATA-ALVAREZ, J.; MACE, S.; LLABRES, P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource technology*, v. 74, n. 1, p. 3-16, 2000.

MATSUURA, N., HATAMOTO, M., SUMINO, H., SYUTSUBO, K., YAMAGUCHI, T., & OHASHI, A.. Closed DHS system to prevent dissolved methane emissions as greenhouse gas in anaerobic wastewater treatment by its recovery and biological oxidation. *Water Science and Technology*, v. 61, n. 9, p. 2407-2415, 2010.

MAYUMI, K.. Temporary emancipation from land: from the industrial revolution to the present time. *Ecological Economics*, v. 4, n. 1, p. 35-56, 1991. Routledge, 2013.

MELLUCCI, A. M., CICCOTTI, L., MARINHO, C. E., DIAS, S. L. F. G., GÜNTHER, W. M. R., MERCEDES, S. S., AMBRIZZI, T., PHILIPPI JR, A. Gestão integrada de resíduos no campus usp da capital - Programa Campus Sustentável Universidade de São Paulo, Brasil. In: II Encontro Latino americano de Universidades Sustentáveis. Porto Alegre. **Anais**. UFRGS, 2015.

METCALF & EDDY, Inc. "Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse". McGraw-Hill International Editions, 3rd ed., New York, 1991.

MORAIS, T.N.. Avaliação da transferência de metano no sentido gás-líquido a partir de biogás produzido em reator UASB. (Conclusão de Curso). Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Espírito Santo. 2012.

NAGAO, N., TAJIMA, N., KAWAI, M., NIWA, C., KUROSAWA, N., MATSUYAMA, T., TODA, T. Maximum organic loading rate for the single-stage wet anaerobic digestion of food waste. *Bioresource Technology*, v. 118, p. 210-218, 2012.

NEVES, L., GONCALO, E., OLIVEIRA, R., ALVES, M. M. Influence of composition on the biomethanation potential of restaurant waste at mesophilic temperatures. *Waste management*, v. 28, n. 6, p. 965-972, 2008.

OMETTO, F., QUIROGA, G., PŠENIČKA, P., WHITTON, R., JEFFERSON, B., VILLA, R.. Impacts of microalgae pre-treatments for improved anaerobic digestion: Thermal treatment, thermal hydrolysis, ultrasound and enzymatic hydrolysis. *Water research*, v. 65, p. 350-361, 2014.

OWS. Biogas Plants. Disponível em: <
http://www.ows.be/organic_feedstock/cstr/>. Acesso em: 10 de agosto de 2016.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. *Fuel*, v. 86, n. 12-13, p. 1710-1719, 2007.

PASSOS, F., SOLÉ, M., GARCÍA, J., & FERRER, I.. Biogas production from microalgae grown in wastewater: effect of microwave pretreatment. *Applied energy*, v. 108, p. 168-175, 2013.

PASTOR, L.; MARTI, N.; BOUZAS, A.; SECO, A.. Sewage sludge management for phosphorus recovery as struvite in EBPR wastewater treatment plants. *Bioresource Technology*, v. 99, n. 11, p. 4817-4824, 2008.

PASTOR, L.; RUIZ, L.; PASCUAL, A.; RUIZ, B.. Co-digestion of used oils and urban landfill leachates with sewage sludge and the effect on the biogas production. *Applied Energy*, v. 107, p. 438-445, 2013.

PATTERSON, M. G. What is energy efficiency?: Concepts, indicators and methodological issues. *Energy policy*, v. 24, n. 5, p. 377-390, 1996.

PAUSS A, ANDRE G, PERRIER M, GUIOT S R. Liquid-to-gas mass transfer in anaerobic processes: Inevitable transfer limitations of methane and hydrogen in the biomethanation process. *Appl Environ Microbiol*, v.56, n.6, p.1636–1643, 1990.

PECORA, V. Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP - estudo de caso. 153f. Tese (Doutorado em Energia). Universidade de São Paulo (USP). 2006.

PEKELMAN, H., MELLO JR, A. G. A importância dos laboratórios no ensino de engenharia mecânica. In: Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. Brasília. **Anais**. 2004.

PÉREZ-ELVIRA, S. I.; FDZ-POLANCO, M.; FDZ-POLANCO, F. Enhancement of the conventional anaerobic digestion of sludge: comparison of four different strategies. *Water Science & Technology*, v. 64, n. 2, p. 375-383, 2011.

POHLAND, F. G.; GHOSH, S. Developments in anaerobic stabilization of organic wastes-the two-phase concept. *Environmental letters*, v. 1, n. 4, p. 255-266, 1971.

POMMIER, S.; LEFEBVRE, X. Impact of moisture content on the biodegradation of heterogeneous solid waste: simulations by a new modelling framework. In: Third International Workshop Hydro-Physico-Mechanics of Landfills Braunschweig Germany. 2009.

PONTING, C.. A green history of the world. London: Sinclair-Stevenson, 1991.

PREFEITURA DA CIDADE UNIVERSITÁRIA DA USP (PUSP-C). CUASO em números. 2016. Disponível em: <<http://www.puspc.usp.br/wp-content/uploads/sites/159/2016/08/Campus-USP-da-Capital.pdf>>. Acesso em: 11 de outubro de 2018.

_____. Consumo de energia – Unidades. Disponível em: <<http://www.puspc.usp.br/consumo-de-energia-unidades/>>. Acesso em: 03 de novembro de 2018.

PUYUELO, B., PONSÁ, S., GEA, T., SÁNCHEZ, A. Determining C/N ratios for typical organic wastes using biodegradable fractions. Chemosphere, v. 85, n. 4, p. 653-659, 2011.

RAFIQUE, R., POULSEN, T. G., NIZAMI, A. S., MURPHY, J. D., & KIELY, G.. Effect of thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatments to enhance methane production. Energy, v. 35, n. 12, p. 4556-4561, 2010.

RASI, S.; VEIJANEN, A.; RINTALA, J. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. Energy, v. 32, n. 8, p. 1375-1380, 2007.

REINE, P.. Industrial Motors and Drives: Global Market Update. In: EEMODS'15 Conference, Helsinki, 2015.

RITTER. Software – Interface. Disponível: <https://www.ritter.de/en/products/software/>. Acesso em: 10 de maio de 2017.

ROMANO, R. T., ZHANG, R., TETER, S., MCGARVEY, J. A.. The effect of enzyme addition on anaerobic digestion of Jose Tall Wheat Grass. Bioresource technology, v. 100, n. 20, p. 4564-4571, 2009.

SALEHIAN, P., KARIMI, K., ZILOUEI, H., & JEIHANIPOUR, A.. Improvement of biogas production from pine wood by alkali pretreatment. Fuel, v. 106, p. 484-489, 2013.

SANDERSON, W. C.. The end of world population growth in the 21st century: New challenges for human capital formation and sustainable development.

SANGAMITHIRAI, K. M., JAYAPRIYA, J., HEMA, J., MANOJ, R. Evaluation of in-vessel co-composting of yard waste and development of kinetic models for co-composting. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, v. 4, n. 3, p. 157-165, 2015.

SANTOS, J.M.; KREIM, V.; GUILLOT, J.M.; REIS Jr., N.C.; SÁ, L.M de; HORAN, N.J.. An experimental determination of the H₂S overall mass transfer coefficient

from quiescent surfaces at wastewater treatment plants. *Atmospheric Environ*, v. 60, p. 18-24, 2012.

SAUER, I.L.; JORGE, W.; GOMES, E.; da SILVA, O.C.; BISPO, N.; da SILVA, N.; ALVES, J.W.; CAMPOS, F.; BUENO, R.. Biodigestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos: uma medida integrada à gestão de resíduos sólidos no Campus da Capital. Projeto, São Paulo, 2013. Disponível em: www.sga.usp.br. Acesso em: 12 de dezembro de 2018.

SOBOTKA, M., VOTRUBA, J., HAVLIK, I., MINKEVICH, I. G. The mass—energy balance of anaerobic methane production. *Folia Microbiologica*, v. 28, n. 3, p. 195-204, 1983.

SONG, Y.C.; KWON, S.J.; WOO, J.H.. Mesophilic and thermophilic temperature co-phase anaerobic digestion compared with single-stage mesophilic- and thermophilic digestion of sewage sludge. *Water Research*, v. 38, n. 7, p. 1653-1662, 2004.

SOUZA, C. L.. Estudo das rotas de formação, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogênio resultantes do tratamento de esgotos domésticos em reatores UASB. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais. 147p. 2010.

SPIEGEL, R.J.; PRESTON, J.L.. Technical assessment of fuel cell operation on anaerobic digester gas at the Yonkers, NY, wastewater treatment plant. *Waste Management*, v. 23, p. 709-717, 2003.

SYMONS, G. E.; A. M. BUSWELL. The methane fermentation of carbohydrates. *Journal of the American Chemical Society*, v. 55, n. 5, p. 2028-2036, 1933.

TAKATA, M., FUKUSHIMA, K., KAWAI, M., NAGAO, N., NIWA, C., YOSHIDA, T., TODA, T. The choice of biological waste treatment method for urban areas in Japan—An environmental perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 23, p. 557-567, 2013.

TANAKA, K. Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy. *Energy policy*, v. 36, n. 8, p. 2887-2902, 2008.

THE ENGINEERING TOOLBOX. Gases- Density. Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/gas-density-d_158.html>. Acesso em: 21 de agosto de 2018.

THE WORLD BANK. What a Waste: A global review of solid waste management. Editores: Daniel Hoornweg Perinaz Bhada-Tata. N. 15. 2012.

TORRES, M. L.; LLORÉNS, M. del C. E.. Effect of alkaline pretreatment on anaerobic digestion of solid wastes. *Waste Management*, v. 28, n. 11, p. 2229-2234, 2008.

TRIOLO, J. M., PEDERSEN, L., QU, H., SOMMER, S. G. Biochemical methane potential and anaerobic biodegradability of non-herbaceous and herbaceous

phytomass in biogas production. *Bioresource technology*, v. 125, p. 226-232, 2012.

UOL

Economia:

<http://economia.uol.com.br/agronegocio/album/2013/11/05/pequenos-agricultores-do-parana-geram-energia-com-fezes-de-animais-veja.htm?imagem=1>

VIANCELLI, A.; KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; KICH, J. D.; SOUZA, C. K.; CANAL, C. W.; COLDEBELLA, A.; ESTEVES, P. A.; BARARDI, C. R. M.. Performance of two swine manure treatment systems on chemical composition and on the reduction of pathogens. *Chemosphere*, v. 90, n. 4, p. 1539-1544, 2013.

VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. DE L. *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions Vol. 1 e 2*. 1st ed., p.1496. International Water Association, 2005.

WARD, A. J., HOBBS, P. J., HOLLIMAN, P. J., JONES, D. L.. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource technology*, v. 99, n. 17, p. 7928-7940, 2008.

WEILAND, P.. Biogas production: current state and perspectives. *Applied microbiology and biotechnology*, v. 85, n. 4, p. 849-860, 2010.

XIE, S., WU, G., LAWLOR, P. G., FROST, J. P., ZHAN, X. Methane production from anaerobic co-digestion of the separated solid fraction of pig manure with dried grass silage. *Bioresource technology*, v. 104, p. 289-297, 2012.

XU, F., LI, Y., GE, X., YANG, L., LI, Y. Anaerobic digestion of food waste—challenges and opportunities. *Bioresource technology*, v. 247, p. 1047-1058, 2018.

YE, J., LI, D., SUN, Y., WANG, G., YUAN, Z., ZHEN, F., WANG, Y. Improved biogas production from rice straw by co-digestion with kitchen waste and pig manure. *Waste Management*, v. 33, n. 12, p. 2653-2658, 2013.

ZHANG, C., SU, H., BAEYENS, J., TAN, T. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 38, p. 383-392, 2014.

ZHANG, L.; LEE, Y. W.; JAHNG, D. Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: focusing on the role of trace elements. *Bioresource technology*, v. 102, n. 8, p. 5048-5059, 2011.

ZHANG, R., EL-MASHAD, H. M., HARTMAN, K., WANG, F., LIU, G., CHOATE, C., GAMBLE, P. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresource technology*, v. 98, n. 4, p. 929-935, 2007.

ZHANG, Y., ARNOLD, R., PAAVOLA, T., VAZ, F., NEIVA CORREIA, C., CAVINATO, C., HEAVEN, S. Compositional analysis of food waste entering the

source segregation stream in four European regions and implications for valorisation via anaerobic digestion. 2013.

ZHENG, C.; ZHAO, L.; ZHOU, X.; FU, Z.; LI, A.. Treatment technologies for organic wastewater. INTECH Open Access Publisher, 2013

ANEXO 1

Memória de cálculo da planta de aproveitamento energético a partir do biogás

Nesse projeto serão utilizados dois reatores do tipo CSTR, indicado no tratamento de resíduos com maior conteúdo de matéria seca, como dejetos de bovinos, RSU, silagem, bagaço de cana-de-açúcar, palha, entre outros. O CSTR tem como característica o baixo custo e a simplicidade operacional, sendo largamente aplicado ao redor do mundo.

Figura 1. Diagrama esquemático do reator do tipo CSTR

O reator CSTR consiste em um tanque cilíndrico, no qual o diâmetro corresponde a duas vezes a altura.

Parâmetros de cálculo

Potencial energético do metano	9,97	kWh/m ³
Eficiência elétrica de conversão do motor	38%	
Potencial de biogás resíduo orgânico	411,4	m ³ biogás/tonMS
%MS do resíduo orgânico	21,29%	
Concentração de metano	54%	
Densidade resíduo	0,514	ton/m ³
Headspace	10%	

Operação por dia	15	horas
------------------	----	-------

$$V_r = TRH \times Q$$

Onde,

V_r = volume do reator, m³

TRH = tempo de retenção hidráulica, d

Q = vazão de substrato, m³/d

Tabela 24. Volumes propostos para as unidades operacionais

REATOR			
TRH	VOLUME	DIÂMETRO	ALTURA
20	212	5,13	2,56
	212	5,13	2,56
RECEPÇÃO			
TRH	VOLUME	DIÂMETRO	ALTURA
4	10,0	5,6	2,8
PÓS-TRATAMENTO			
TRH	VOLUME	DIÂMETRO	ALTURA
5	116,7	6,7	3,3

Tabela 25. Descrição das unidades principais da planta

Recepção	Setor reservado para recepção das amostras, que deverá ocorrer via caminhões, via elevada.
Pré-tratamento	Uma unidade pulmão para resíduos de alimentos e leira para acondicionamento de resíduos de podas, que poderão ser eventualmente utilizadas como pré-tratamento
Tanque pulmão	Tanque necessário para equalização da alimentação, tendo em conta a sazonalidade semanal de produção.

Tanque 1	Um bom planejamento deve levar em consideração mais de uma unidade de digestão. Confirmar disponibilidade financeira.
Tanque 2	
Pós-tratamento	Grupo de pesquisa que trabalhe com pós-tratamento, visando aplicação em áreas verdes.
Gasômetro	Necessário para estudo de despachabilidade – planta híbrida com solar USP
Unidade de Geração de Energia Elétrica	Motogerador de 100 kVA.

ANEXO 2

Descrição técnica – (ER-BR)

Componentes do sistema, etapas do processo e estruturas auxiliares

1. A USINA DE BIOGÁS

O conceito de planta de biogás é utilizado para referir-se a uma instalação onde ocorre a fermentação de um substrato, sendo este decomposto por ação de microrganismos na ausência de oxigênio. Durante este processo, os microrganismos produzem biogás, cuja composição majoritária é de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). A concentração de metano neste gás varia entre 50 e 70% Vol. dependendo do substrato utilizado. Dado que o metano tem um poder calorífico ao redor de 55,5 MJ/kg (10,1 kWh/Nm³), é especialmente indicado para seu aproveitamento energético.

Destaca-se especialmente o digestado produzido (material restante após o processo de fermentação), que possui excelentes propriedades fertilizantes, como por exemplo grande estabilização e rápida absorção pelas plantas. Isto permite que este fertilizante seja “devolvido” aos solos dos quais os substratos são provenientes. Estes substratos podem consistir em resíduos agrícolas, dejetos animais ou resíduos industriais e urbanos.

1.1. Resumo da planta proposta

1. Tanque de recepção e alimentação
2. Reator primário - biodigestor
3. Tanque de digestado

4. Sala de controle e casa de máquinas
5. Filtro de dessulfurização
6. Grupo motogerador com cogeração qualificada
7. Biodigestor secundário

2. TANQUES DE RECEPÇÃO, BIODIGESTÃO E DIGESTADO

Os tanques de armazenamento e processamento poderão ser construídos em PRFV ou concreto, prezando-se a simplicidade construtiva, flexibilidade, alta resistência mecânica, leveza, durabilidade, rápida instalação/montagem e os baixos custos de transporte e montagem.

Os tanques deverão prever o posicionamento dos acessórios, sistema de entrada e saída de efluentes, localização das janelas de inspeção e dos sensores definidos no projeto. Ainda, deverão ser considerados eventuais reforços necessários, a depender do tipo de material escolhido para construção, bem como reforços estruturais a serem realizados após estudo prévio do solo do local de instalação.

Deverão ser apresentadas garantias quanto à estanqueidade e vida útil dos materiais sugeridos no projeto.

3. DETALHAMENTO DA USINA PROPOSTA

3.1. Tanque de recepção e alimentação

Para garantir uma mistura homogênea, o tanque deverá contar com uma unidade de trituração dos materiais recebidos antes da adição ao tanque e bomba de deslocamento positivo com triturador em linha para recirculação do material no tanque. A alimentação dos substratos ao biorreator deverá ser programável de acordo com os substratos utilizados.

As características técnicas da unidade de alimentação são as seguintes:

Tanque $\varnothing=3,0\text{m}$ x $H=3,0\text{m}$ com fechamento superior, a fim de se evitar a emissão de odores indesejados, poderá ser instalado a 1,5m abaixo do solo para facilitar o manuseio durante as operações diárias;

Triturador elétrico específico para restos vegetais e restos alimentares;

Bomba de deslocamento positivo e triturador em linha específicos para fluídos com alto teor de sólidos, com funcionamento programável.

3.2. Reator primário

O substrato entra pelo reator primário, o qual deverá ser capaz de operar em temperaturas de até 55 °C, ou seja, em condições termofílicas. Este reator, deverá poder operar com altos teores de sólidos, sendo o limite em torno de 20%.

O reator deverá ser equipado com agitadores mecânicos para garantir a homogeneização do material dentro do tanque, bem como deverá contar com um sistema de aquecimento, que tem como objetivo manter uma temperatura constante dentro do biorreator. A parte superior do reator deverá contar com gasômetro em membrana dupla, a fim de atuar no armazenamento do biogás produzido na etapa. No caso de baixa produção de biogás, a membrana interior descansa sobre uma estrutura de cordas que se estendem de um extremo ao outro da parte superior. A membrana externa, por sua vez, mantém sempre a mesma posição graças a uma película de ar introduzido mediante compressor. O reator deverá dispor de segurança contra pressão positiva e negativa.

As características técnicas do biorreator são as seguintes:

- Dimensões: $\varnothing=10,0\text{m} \times H=6,0\text{m}$;
- Altura máxima do substrato: 5,5 m;
- Volume de trabalho (VT): 420 m³;

- Aquecimento com tubos laterais em PEX;
- Agitador mecânico específico para misturas com média/alta viscosidade;
- Compressores de ar para membrana dupla.

3.3. Tanque de digestado

Para garantir uma digestão completa do substrato, deve-se atender o tempo de retenção que cada material necessita. Neste caso o tanque de digestado, logo após o reator, supre essa demanda garantindo a manutenção de uma atmosfera livre de oxigênio para que a fermentação anaeróbia continue e consuma toda a matéria orgânica residual. Além disso, o tanque de digestado serve como gasômetro provendo grandes volumes de armazenagem de biogás.

O tanque de digestado deverá ser equipado com agitadores mecânicos para evitar a estratificação do material dentro do tanque. Pode ser equipado com um sistema de aquecimento para manutenção de uma temperatura interna constante. O tanque de digestado deverá dispor de gasômetro em membrana dupla e válvula de segurança contra pressão positiva e negativa.

As características técnicas do biorreator são as seguintes:

- Dimensões: Ø=10,0m x H=6,0m;

- Altura máxima do substrato: 5,5 m;
- Volume de trabalho (VT): 420 m³;
- Agitador mecânico específico para misturas com baixa/média viscosidade;
- Opcional: sistema de aquecimento interno.
- Compressores de ar para membrana dupla.

3.4. Filtro de dessulfurização

Para que os parâmetros de qualidade do biogás se ajustem aos requisitos de performance da unidade de cogeração, o biogás passa pelo filtro de dessulfurização que retira os H₂S residual. Após o refino no filtro, o biogás é refrigerado para remoção da água presente no gás na forma de vapor e direcionado à cogeração por compressor radial.

Especificações mínimas do filtro:

Pressão do gás para o motor:	5 psi;
Entrada H ₂ S:	< 5.000 PPM (0,5%);
Saída H ₂ S:	< 50 PPM (0,005%).

3.5. Cogeração

O sistema de cogeração consiste na produção de energia elétrica e térmica útil a partir de um único fluxo de combustível, sendo utilizado como combustível o Biogás. Em grupos motogeradores de eletricidade, a energia térmica é considerada um subproduto intrínseco ao seu funcionamento. O aproveitamento desta energia térmica é que caracteriza a cogeração, transformando esta energia, que seria desperdiçada ou descarregada na atmosfera, em energia térmica útil, ou seja, calor recuperado. Este calor recuperado na cogeração é utilizado para produzir: água quente, vapor baixa pressão, água gelada através de chiller de absorção, fluido térmico aquecido, etc.

A unidade de cogeração transportável e modular consiste em reunir em uma carenagem todos os elementos necessários ao perfeito funcionamento da unidade. Os principais objetivos para a unidade ser montada em uma carenagem são a sua transportabilidade e isolamento termoacústico para redução de ruído, permitindo seu funcionamento em ambientes urbanos ou rurais próximo a propriedades e instalações fabris. O conceito modular se aplica à possibilidade de instalar mais que uma unidade de cogeração, operando de

forma conjunta, ou seja, em paralelo, para que seja atingida a potência elétrica e/ou térmica total necessária da instalação como um todo. Por ser uma unidade compacta e facilmente transportável em carenagem, pode ser instalada em curto espaço de tempo e atender a necessidade de energia elétrica e térmica (calor) de diversos setores da sociedade, principalmente os que requerem elevado consumo elétrico e térmico.

A cogeração tem como diferencial a utilização de componentes totalmente nacionais, oferecendo um menor custo de aquisição e, principalmente, de operação do mercado brasileiro. Sempre mantendo os mais altos níveis de eficiência elétrica e térmica, podendo chegar a elevar o aproveitamento total do sistema para a faixa de 85 a 90% da energia fornecida pela queima do combustível.

As características técnicas da cogeração, neste projeto, são as seguintes:

Potência elétrica: 75 kW_{el}

Potência térmica: 70 kW_{th} (pode variar de acordo com o regime de funcionamento)

Características Técnicas do Sistema de Cogeração			
Potência	Emergência 120 kVA / 96 kW	Principal 108 kVA / 87 kW	Contínuo 24 hrs 96 kVA / 77 kW
Tensão Nominal	220V ou 380V		
QCC Automático	- Controlador WOODWARD EASYGEN Gerenciamento, Sincronismo e monitoramento remoto		
Rotação	1800 rpm		
Frequência	60 Hz		
Fator de Potência	0,8 (mínimo)		
Nº de fases	3 fases + neutro + terra		
Ligação	Estrela Aterrada com terminais acessíveis		
Nº de polos	04		
Regime de Operação	Contínuo por tempo indeterminado		
Modo de Operação	Automático - individual e paralelo entre grupos motogeradores e paralelo permanente com a rede de distribuição de energia da concessionária		
Eficiência / Rendimento	de 32% a 35% a 100% de carga		
Acoplamento	Alternador no motor: rígido direto por flange		
Chassi	Perfis de chapa de aço carbono, dobrados em “U”, soldados com tecnologia MIG, com pintura esmaltada ou epóxi pó, com conectores terminais para aterramento de 70 a 120 mm.		

Isoladores de Vibração	de	Instalados entre o chassi e o conjunto motogerador/arrefecimento podendo ser instalado também entre o chassi e o piso (opcional)
Sistema Escape	de	Equipado com silenciador industrial para atenuação de ruído, com fluxo de gás de escape em 0,39Kg/seg a uma temperatura máxima de 654 °C
Içamento		Equipamento dotado de pontos içamento
Proteção elétrica		Disjuntor motorizado
Dimensões CxLxA		2550 mm X 960 mm X 1500 mm
Peso (Kg)		1.150 (com óleo sem água)
Instalação		Carenagem silenciada – 85 dB@1,5 m±3dB
Trocador Calor	de	Trocador de calor casco tubo Vazão de gases de descarga: 625 Kg/h (418.000 lts/min) Pressão de trabalho: 20 a 50 mmc.a., não podendo haver restrição a passagem dos gases. Temperatura de entrada dos gases de descarga: 550°C (+/- 50°C)

Características técnicas do MOTOR		
Ciclo		OTTO
Combustível		Biogás
Kit Controle de Gás		Válvulas mecânicas, eletromecânicas, sensores eletrônicos para proteção do conjunto motogerador contemplando dispositivos de segurança para interrupção automática do fornecimento do gás em caso de não conformidades com sinalização no IHM local e remoto.
Pressão do Gás		5 psi na entrada do sistema de admissão.
Aspiração		Turbo alimentado
Filtro de AR		Elemento Seco
Combustão		Estequiométrica controlada por sonda lambda
Ignição Eletrônica		Sim
Rotação		1800 rpm
Arrefecimento		Refrigeração a água nos circuitos primário e secundário, com radiador a prova de corrosão e ventilador acoplado ao eixo do motor com fluxo de ar no sentido do motor para o radiador, com bomba de circulação de água mecânica e válvula termostática para controle de vazão; Sistema de proteção por termostato promovendo parada do motor com sinalização no IHM local e remoto.
Lubrificação		Sistema com bomba de óleo e refrigeração por trocador de calor interno ao motor
Regulador velocidade	de	Tipo Isócrono - L-SERIES (Woodward) Regulador automático eletrônico de velocidade, capaz de manter, quando em regime, a velocidade em +/- 5% da velocidade nominal, para qualquer carga de até 40% da nominal. Regulador está calibrado para parar o motor em caso de sobrevelocidade de 20%, com sinalização no IHM local e remoto na sala de operação.
Volante Inércia	de	Montado no motor e balanceado para velocidade constante
Sistema Elétrico		24Vcc / duas Baterias Chumbo ácida 60 AH; Capacidade superior a 3 partidas consecutivas no motor de no máximo 15 segundos de duração para cada partida;
Alternador		Alternador acionado pelo motor com tensão de 24 Vcc
Carregador de bateria	de	Tensão de saída constante com corrente limitada; Opera em regime de flutuação à tensão constante ou em regime de equalização a uma tensão constante mais alta.

		A bateria, totalmente descarregada, será recarregada em menos de 24 horas
Sistema Partida	de	Permite acionamento automático programado, manual no local ou acionamento remoto da sala de operações; Não será permitida a partida em caso de ocorrência de não conformidades sendo as mesmas sinalizadas local e remotamente.
Sistema Parada	de	Permite acionamento da parada individual ou geral dos grupos motogeradores de maneira automática programada, automática por não conformidades sendo elas sinalizadas local e remotamente, manual no local ou remota da sala de operações.

Características técnicas do Gerador (Alternador)		
Norma Técnica		ABNT NBR 5117
Excitação		Eletrônico – Brushless com bobina auxiliar
Sistema Ligação	de	Trifásico
Refrigeração		Ventilação – Ventilador centrífugo montado no próprio eixo
Acoplamento		Acionamento direto no motor – tipo rígido com flange
Potência de saída		Potência nominal de 77 kW Contínuo (Base Load)
Tensão de saída		127/220V ou 220/380V
Frequência		60 Hz
Fator de Potência		0,8 (mínimo)
Rendimento		94,1% com 100% de carga
Velocidade Síncrona		1800 rpm
Classe isolamento	de	“H”
Sobrevelocidade		2250 RPM (25%)
Sobrecarga		50 % durante 1 minuto
Ligação Estator	do	Estrela com Neutro acessível
Limite Vibração	de	Conforme normas ABNT – NBR 7094 e IEC 60034-14
* Grau proteção	de	IP-21
Regime Operação	de	Contínuo a plena carga por tempo indeterminado
Excitação Regulação	e	<p>Autoexcitação estática com ponte retificadora contendo diodos;</p> <p>Sistema de regulação eletrônica automática de tensão com variação máxima 1% da tensão nominal na saída do gerador, para qualquer carga até a capacidade nominal do gerador, com fator de potência 0,8, contendo dispositivo manual, para ajuste do valor de referência;</p> <p>Sistema de controle de tensão permite o controle da tensão ajustada constante ou fator de potência constante este controle é realizado pelo Módulo controlador em conjunto com o AVR do Alternador;</p> <p>Os sistemas de excitação e controle de tensão possibilitam uma faixa de operação em condição normal de 95% a 105% da tensão nominal;</p> <p>O regulador de tensão admite até 110% da tensão nominal;</p> <p>O sistema de excitação possui limitadores de sobreexcitação e subexcitação. Este controle é realizado pelo Módulo controlador em conjunto com o AVR do Alternador;</p>

Distorção harmônica	Abaixo de 4% (média de 3,5%)
Normas Técnicas	IEC 60034 / NBR 5117 / NBR 5052 / NBR 7094 / NEMA MG1 / VDE530 / ISO8528
Certificações	UL / CSA
Preparado para funcionamento em regime contínuo à plena carga por um período indefinido de tempo	
Caixa de ligação com bornes terminais para circuitos de força e controle

Planta baixa

04	01	A4	20,501	Tanque recepção	Diversos	ø 3 x 3 m
03	01	A4	20,201	Tanque de digestado	Diversos	ø 10 x 6 m
02	01	A4	20,200	Reator 2	Diversos	ø 10 x 6 m
01	01	A4	20,200	Reator 1	Diversos	ø 10 x 6 m
POS	QT.	A4	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	MATERIAL	DIMENSÕES
Projeto: FILTRO H2S MODULAR - ø 160 MM
Título: CHAPA APOIO PARA 1 TORRE DO CHASSI DO	Proj.: 11/2018	Nome: Elsner
				FILTRO H2S	Des.: 11/2018	Carlos
					Rev.	
					Esc.: Sem esc.	
					Peça:	435-A/2018

Figura 45. Vista superior da Usina de Biogás.

Planta baixa Escola Politécnica da USP

01	01	AR	SO 301	2m x 10m	Reator	Vidro opaco
02	01	AR	SO 303	Gerador 75 kw	Reator	Vidro opaco
03	01	AR	SO 303	Unidade de Membr.	Reator	Vidro opaco
POS. QT. AR				Nº DA FICHA	DESCRIÇÃO	MATERIAL
Projeto: USINA DE BIOGÁS 75 KW						Dimensões
Data: 11/2018 Elab: 11/2018 Rev: Sem esc. Folha: 435/2018

Figura 46. Plano Diretor da Usina de Biogás.

Vista frontal

Vista lateral

Perspectiva 2

Perspectiva 1

04	01	A4	20.501	Tanque recepção	Diversos	ø 3 x 3 m
03	01	A4	20.201	Tanque de digestão	Diversos	ø 10 x 6 m
02	01	A4	20.200	Reator 2	Diversos	ø 10 x 6 m
01	01	A4	20.200	Reator 1	Diversos	ø 10 x 6 m
POS	QT.	A4	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	MATERIAL	DIMENSÕES
Projeto: FILTRO H2S MODULAR - ø 160 MM
Título: CHAPA APOIO PARA 1 TORRE DO CHASSI DO	Proj: 11/2018	Nome: Elsner
				FILTRO H2S	Des: 11/2018	Carlos
					Rev:	
					Est: 4	Sem esc.
					Peça:	435-B/2018

Figura 47. Perspectivas da Usina de Biogás.