

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONHECIMENTO: CIÊNCIAS TÉRMICAS

GUSTAVO VIEIRA GONDIM

**POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DOS RESÍDUOS
SÓLIDOS ORGÂNICOS E EFLUENTES LÍQUIDOS GERADOS EM
UMA UNIDADE AGROINDUSTRIAL**

Ilha Solteira

2017

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GUSTAVO VIEIRA GONDIM

**POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DOS RESÍDUOS
SÓLIDOS ORGÂNICOS E EFLUENTES LÍQUIDOS GERADOS EM
UMA UNIDADE AGROINDUSTRIAL**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia da UNESP – Campus de Ilha
Solteira, para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica.
Área de Conhecimento: Ciências Térmicas

Prof. Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos
Orientador:

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- G637p Gondim, Gustavo Vieira.
Potencial de geração de energia a partir dos resíduos sólidos orgânicos e efluentes líquidos gerados em uma unidade agroindustrial / Gustavo Vieira Gondim. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017
104 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas, 2017
- Orientador: Ricardo Alan Verdú Ramos
Inclui bibliografia
1. Biogás. 2. Co-Digestão. 3. Digestão Anaerobia. 4. Metano. 5. Abatedouro.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DOS
RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS E EFLUENTES LIQUÍDOS
GERADOS EM UMA UNIDADE AGROINDUSTRIAL

AUTOR: GUSTAVO VIEIRA GONDIM

ORIENTADOR: RICARDO ALAN VERDU RAMOS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA
MECÂNICA, área: CIÊNCIAS TÉRMICAS pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RICARDO ALAN VERDU RAMOS
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. CASSIO ROBERTO MACEDO MAIA
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. LEANDRO OLIVEIRA SALVIANO
Curso de Engenharia de Energia / UNESP - Câmpus Experimental de Rosana

Ilha Solteira, 24 de abril de 2017

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha querida esposa Lays Gondim, à minha filha Helena Gondim, que serviu de inspiração para que eu pudesse continuar nesta jornada, aos meus pais Divino Torres e Glaucirene Gondim e ao meu irmão Cauê Fernandes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

À BRF S/A, por ter contribuído com a continuidade dos meus estudos e por ter repassado os dados que foram essenciais no andamento deste trabalho.

À UNIRV, por ter feito a parceria com a UNESP, através do MINTER/CAPES, de modo a contribuir com o desenvolvimento técnico dos seus professores.

Aos meus pais, minha família e amigos, pelo incentivo e apoio dado ao longo de todo o percurso.

Ao professor e orientador Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos, por ter dedicado seu tempo na minha orientação.

Aos meus colegas de mestrado, que passaram por diversas dificuldades, mas que no final também saíram vitoriosos.

O conhecimento torna a alma jovem e diminui a amargura da velhice.

Colhe, pois, a sabedoria. Armazena suavidade para o amanhã.

Leonardo da Vinci

RESUMO

O presente trabalho tem como principal objetivo analisar o potencial de geração de energia a partir da queima direta e da decomposição anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos agroindustriais e dos efluentes líquidos, que tem se mostrado ao longo dos últimos anos técnicas viáveis para geração de energia neste segmento produtivo. Na grande maioria dos casos, os resíduos orgânicos agroindustriais não são destinados adequadamente ou geram grandes custos de tratamento, o que interfere diretamente na competitividade e no custo do produto a ser disponibilizado ao cliente. A Unidade Agroindustrial estudada é de grande porte, e está localizada no município de Rio Verde (GO), tendo como atividades principais o abate de aves e suínos, produção de produtos industrializados, incubatório e fábrica de rações. Foram levantados os principais resíduos orgânicos, bem como os principais parâmetros quantitativos e qualitativos dos efluentes líquidos gerados neste complexo industrial, e utilizadas as equivalências para determinação da geração de gás metano e biogás com base na literatura. O potencial médio mensal energético foi de 30.808 GJ/mês, e caso haja o aproveitamento energético, isto pode representar uma produção de energia térmica equivalente de 17.758 GJ/mês e um potencial médio mensal de produção de energia elétrica equivalente de 4.112 MWh. O custo orçado para implementar o sistema de aproveitamento energético foi de R\$ 11.564.000,00, o que corresponde a um *payback* descontado de 37 meses, sendo, portanto, viável a realização dos investimentos.

Palavras-Chave: Biogás. Co-digestão. Digestão anaerobia. Metano. Abatedouro.

ABSTRACT

The main objective of this work was to analyze the potential of energy from the direct burning and anaerobic decomposition of organic solid agroindustrial residues and liquid effluents, which has been shown over the last years viable techniques for the generation of energy in this productive segment. In the vast majority of cases, organic agro-industrial wastes are not properly destined or generate large treatment costs, which directly interfere with the competitiveness and cost of the product to be made available to the customer. The Agroindustrial Unit studied is of great size, and is located in the municipality of Rio Verde (GO), whose main activities are the slaughter of poultry and pigs, production of industrialized products, hatchery and feed mill. The main organic wastes were collected, as well as the main quantitative and qualitative parameters of the liquid effluents generated in this industrial complex, and the equivalences were used to determine the generation of methane and biogas from other published scientific works. The average monthly energy potential was 30,808 GJ / month, and in case of energy utilization, this can represent an equivalent thermal energy production of 17,758 GJ / month and an average monthly potential of equivalent electric energy production of 4,112 MWh. The budgeted cost to implement the energy recovery system was R\$ 11,564,000.00 which corresponds to a discounted payback of 37 months, showing it be possible to make the necessary investments.

Keywords: Biogas. Co-digestion. Anaerobic digestion. Methane. Slaughterhouse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cogeração com produção de energia térmica e eletromecânica em simultâneo.....	20
Figura 2. Matriz Elétrica Brasileira - Ano Base 2015.	22
Figura 3. Capacidade instalada de geração elétrica por fonte no Brasil (MW).....	23
Figura 4. Esquema do complexo agroindustrial.	25
Figura 5. Unidade motora simples a vapor que opera segundo o ciclo de Rankine.	31
Figura 6. Cogeração com ciclo Rankine.....	32
Figura 7. Cogeração com ciclo Brayton.	33
Figura 8. Cogeração com ciclo combinado.	34
Figura 9. Diagrama do funcionamento de uma turbina a gás.	35
Figura 10. Diagrama do processo de incineração de resíduos sólidos.	48
Figura 11. Biodigestor instalado no município de Rio Verde (GO).....	54
Figura 12. Vista aérea do complexo industrial.	58
Figura 13. Tela “z23e” do Sistema SAP/R3.....	59
Figura 14. Fluxograma das estações elevatórias presentes no complexo industrial.....	61
Figura 15. Lodo flotado após processo de separação bifásica.....	64
Figura 16. Valo de oxidação - Sistema de lodo ativado.	65
Figura 17. Resíduo de incubatório durante o descarte.....	68
Figura 18. Tripa celulósica após ser retirada da salsicha.	69
Figura 19. Efluente gerado durante a higienização dos caminhões transportadores de suínos.....	70
Figura 20. Resíduos de varrição da fábrica de rações.	71
Figura 21. Resíduo de restaurante.	72
Figura 22. Potencial energético do efluente pós-flotador.....	77
Figura 23. Potencial energético do lodo biológico.	79
Figura 24. Volume de lodo flotado gerado mensalmente.....	80
Figura 25. Potencial energético do lodo flotado.....	80
Figura 26. Potencial energético do resíduo de incubatório.	82
Figura 27. Potencial energético da tripa celulósica.	83
Figura 28. Potencial energético da cama de frango.....	84
Figura 29. Potencial energético dos dejetos de suínos.	86
Figura 30. Potencial energético dos resíduos de varrição da fábrica de rações.....	87
Figura 31. Potencial energético a partir dos resíduos do restaurante.	88

Figura 32. Comparativo do potencial energético entre os resíduos sólidos orgânicos e efluentes líquidos.....	89
Figura 33. Potencial médio mensal de geração de energia térmica a partir dos diversos resíduos orgânicos gerados na unidade agroindustrial.	90
Figura 34. Potencial médio mensal de geração de energia elétrica a partir dos resíduos orgânicos gerados no complexo industrial.	91
Figura 35. Consumo mensal de energia elétrica do complexo industrial.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Repartição da oferta interna de energia no Brasil - Ano Base 2015.....	21
Tabela 2. Características e composição típicas do biogás.	50
Tabela 3. Processos de tratamento escolhidos para os resíduos orgânicos e efluentes líquidos agroindustriais.	60
Tabela 4. Principais características do efluente líquido pós-flotador.	62
Tabela 5. Comparativo dos resultados físico-químicos do lodo flotado e do cavaco de eucalipto.	64
Tabela 6. Características físico-químicas do lodo biológico.	66
Tabela 7. Potencial de produção de biogás e metano a partir dos efluentes líquidos pós flotadores.	76
Tabela 8. Potencial mensal de geração de biogás e gás metano a partir do lodo biológico.	78
Tabela 9. Potencial mensal de geração de biogás e gás metano a partir do resíduo de incubatório.	81
Tabela 10. Potencial de geração de biogás e gás metano a partir da tripa celulósica.	83
Tabela 11. Potencial médio mensal de produção de biogás e gás metano a partir da cama de frango.	84
Tabela 12. Potencial mensal de geração de biogás e gás metano a partir dos dejetos de suínos.	85
Tabela 13. Potencial mensal de geração de biogás e gás metano a partir dos resíduos de varrição da fábrica de rações.	86
Tabela 14. Potencial mensal de geração de biogás e gás metano a partir dos resíduos do restaurante.	87
Tabela 15. Variação mensal do potencial energético dos resíduos sólidos orgânicos e efluentes líquidos (GJ/mês).	89
Tabela 16. Descrição dos principais equipamentos a serem instalados.	92
Tabela 17. Principais custos de operação e manutenção do novo sistema.	93
Tabela 18. Principais ganhos financeiros com a implantação do projeto.	93
Tabela 19. Indicadores financeiros do projeto.	94

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEM	Balanço Energético Nacional
CH ₄	Metano
CME	Conselho Mundial de Energia
CO ₂	Dióxido de carbono
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DBO _{5,20}	Demanda Bioquímica de Oxigênio – (Ensaio da amostra em 5 dias à 20°C)
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
H ₂ S	Gás sulfídrico
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PIB	Produto Interno Bruto
PROINFA	Programa de incentivo às fontes alternativas
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
UASB	<i>Upflow anaerobic sludge blanket</i>
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos/Subescritos

$Ano.$	Ano anterior à recuperação do capital
C_{DQO}	Concentração de DQO no efluente líquido (mg/l)
C_p	Carga poluidora (kgDQO/mês)
C_{SV}	Sólidos Voláteis presentes no lodo
E	Eficiência do sistema de tratamento anaeróbio
E_f	Eficiência do reator UASB (%)
E_q	Fator de conversão de kgDQO/mês para kgCH ₄ /mês
FC_0	Fluxo de caixa verificado no momento zero, podendo ser um investimento, empréstimo ou financiamento.
FC_1	Fluxo de caixa acumulado descontado no ano da recuperação
FC_r	Fluxo de caixa descontado acumulado antes da recuperação em módulo
FC_j	Fluxos de caixa previstos no projeto para cada intervalo de tempo
F_{incub}	Fator de conversão de toneladas de resíduo de incubatório para m ³ de biogás
Ha	Entalpia da água de entrada
H_v	Entalpia do vapor (kJ/kg)
i	Taxa de desconto
Mc	Vazão mássica do combustível (kg/s)
M_{CH_4}	Concentração de metano presente no biogás
$MTIR$	Taxa Interna de Retorno Modificada
M_v	Vazão mássica de vapor (kg/s);
N	Rendimento da caldeira
N	Número de fluxos de caixa
n	Período de tempo
n_{ele}	Rendimento do sistema de cogeração
N_{md}	Rendimento pelo método direto (%)
PC	Poder calorífico do combustível (kJ/kg)
PCI_{BS}	Poder Calorífico Inferior do lodo flotado
$Pot_{térmico}$	Potencial térmico (MJ/mês)
Q	Vazão (m ³)

$Q_{biogás}$	Total de biogás gerado no mês ($m^3/mês$)
$Q_{met.lodo}$	Volume de metano gerado por mês através do lodo biológico ($m^3/mês$)
Q_{metano}	Total de metano produzido por mês ($m^3/mês$)
Q_{metano}	Vazão de gás metano ($m^3CH_4/mês$)
Q_{metano}	Taxa de geração de metano
Res_{mensal}	Quantidade de resíduo gerado por mês (t/mês)
Res_{queima}	Quantidade de resíduos para queima direta em caldeira (kg/mês)
$STV_{destruídos}$	Sólidos Totais Voláteis removidos
$taxa\ f$	Taxa para financiamento
$taxa\ r$	Taxa para reinvestimento
tCO_2/hab	Tonelada de dióxido de carbono por habitante
V_{Lodo}	Quantidade de lodo biológico gerado por mês (kg/mês)
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	ASPECTOS HISTÓRICOS DE GERAÇÃO E COGERAÇÃO DE ENERGIA.....	18
1.2	DEFINIÇÕES DE GERAÇÃO E COGERAÇÃO DE ENERGIA.....	19
1.3	GERAÇÃO DE ENERGIA NO BRASIL.....	20
1.4	A BIOMASSA NO SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO	22
1.5	BIOGÁS E SUA IMPORTÂNCIA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA ..	23
1.6	O SETOR AGROINDUSTRIAL BRASILEIRO.....	24
1.7	REVISÃO DE LITERATURA	26
1.8	MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA DO TRABALHO	28
1.9	OBJETIVOS DO TRABALHO	29
2	CICLOS TÉRMICOS E DE POTÊNCIA	31
2.1	CICLO DE RANKINE.....	31
2.2	CICLO DE BRAYTON	32
2.3	CICLO COMBINADO	33
2.4	CICLO OTTO E DIESEL	34
2.5	COGERAÇÃO DE ELETRICIDADE E CALOR.....	35
3	EFLUENTES LÍQUIDOS INDUSTRIAIS.....	36
3.1	CONCEITOS E CARACTERIZAÇÃO DOS EFLUENTES LÍQUIDOS INDUSTRIAIS	36
3.2	FASES DO TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS	37
3.3	ASPECTOS LEGAIS.....	38
4	RESÍDUOS SÓLIDOS AGROINDUSTRIAIS	42
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS	42
4.2	RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS AGROINDUSTRIAIS.....	44
4.3	PANORAMA NACIONAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS AGROINDUSTRIAIS ..	45
4.4	POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS	46
4.5	QUEIMA DE RESÍDUOS PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA	47
5	BIOGÁS	49
5.1	ASPECTOS HISTÓRICOS	49
5.2	PROPRIEDADES QUÍMICAS DO BIOGÁS.....	49
5.3	MICROBIOLOGIA E BIOQUÍMICA NA FORMAÇÃO DO BIOGÁS.....	50

5.4	SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS	52
5.4.1	Biodigestão	53
5.4.2	Co-digestão de Resíduos Sólidos	54
5.5	PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS.....	55
6	CARACTERIZAÇÃO, FORMULAÇÃO E METODOLOGIA	57
6.1	CARACTERIZAÇÃO DA UNIDADE AGROINDUSTRIAL EM ESTUDO	57
6.2	BANCO DE DADOS RELACIONADOS À GERAÇÃO DE RESÍDUOS E EFLUENTES LÍQUIDOS.....	58
6.3	SISTEMAS DE GERAÇÃO E EQUACIONAMENTO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA.....	59
6.3.1	Efluente Líquido Pós-Flotador	60
6.3.2	Lodo Flotado	63
6.3.3	Lodo Biológico	65
6.3.5	Resíduo de Incubatório	67
6.3.6	Tripa Celulósica.....	69
6.3.7	Cama de Frango	70
6.3.8	Dejetos de Suínos.....	70
6.3.9	Resíduos de Varrição da Fábrica de Rações.....	71
6.3.10	Resíduos de Restaurante.....	71
6.3.11	Equivalência Energética dos Resíduos	72
6.3.11.1	<i>Resíduos Submetidos a Queima Direta em Caldeira</i>	72
6.3.11.2	<i>Resíduos Submetidos ao Processo de Decomposição Anaeróbia</i>	73
6.4	CÁLCULO DE VIABILIDADE ECONÔMICA E RETORNO DE INVESTIMENTO	74
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
7.1	POTENCIAL DE ENERGIA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS E EFLUENTES LÍQUIDOS.....	76
7.1.1	Potencial Energético do Efluente Líquido Pós-Flotador	76
7.1.2	Potencial de Energia do Lodo Biológico.....	78
7.1.3	Potencial de Energia do Lodo Flotado	79
7.1.4	Potencial de Energia do Resíduo de Incubatório	81
7.1.5	Potencial de Energia da Tripa Celulósica.....	82
7.1.6	Potencial de Energia da Cama de Frango.....	83
7.1.7	Potencial de Energia dos Dejetos de Suínos.....	84

7.1.8	Potencial de Energia dos Resíduos de Varrição da Fábrica de Rações.....	86
7.1.9	Potencial de Energia dos Resíduos de Restaurante.....	87
7.2	COMPARATIVO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ENTRE AS FONTES PRIMÁRIAS	88
7.3	ANÁLISE DA VIABILIDADE FINANCEIRA E ECONÔMICA DE IMPLANTAÇÃO DO PROJETO	92
8	CONCLUSÕES	95
	REFERÊNCIAS	96

Preâmbulo

Este trabalho foi desenvolvido no Instituto de Pesquisa em Bioenergia da UNESP (IPBEN) do Câmpus de Ilha Solteira e está inserido dentre da linha de pesquisa de Energia e Sistemas Térmicos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP), sendo que a seguir será apresentada a forma como está estruturado.

No Capítulo 1 é apresentada uma introdução sobre os temas a serem abordados ao longo do trabalho, explanando sobre o uso de biomassa no Brasil, a motivação que levou a escolha do tema, bem como a descrição dos objetivos propostos para a conclusão deste trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão sobre os ciclos termodinâmicos, tipos de ciclos e características de cada um, bem como os aspectos técnicos relacionados aos sistemas de cogeração de energia.

No Capítulo 3 são descritos os principais aspectos técnicos relacionados à geração e ao tratamento dos efluentes líquidos industriais, enfocando nos parâmetros qualitativos e quantitativos, bem como as principais etapas do tratamento.

No Capítulo 4 são descritos os conceitos relacionados aos resíduos sólidos orgânicos agroindustriais, mencionando quais os principais resíduos gerados, bem como suas principais características quantitativas.

No Capítulo 5 são apresentados os aspectos gerais quanto a geração e tratamento do biogás, mostrando os principais sistemas de geração do gás metano, dentro outros.

No Capítulo 6 são apresentadas as formulações, metodologias e sistemas de equacionamento utilizados para obtenção dos resultados deste trabalho.

No Capítulo 7 são apresentados os principais resultados deste trabalho, bem como as discussões de maior relevância para o entendimento. São demonstrados os potenciais energéticos e os cálculos de viabilidade econômica para implantação do projeto.

No Capítulo 8 são apresentadas as principais conclusões obtidas com a realização do presente estudo.

Por fim, é apresentada uma lista de referências bibliográficas.

1 INTRODUÇÃO

1.1. ASPECTOS HISTÓRICOS DE GERAÇÃO E COGERAÇÃO DE ENERGIA

O século XIX foi marcante para evolução do conceito de energia, onde passou a ser relacionada aos campos físicos e interligar os fenômenos térmicos, eletromagnéticos e mecânicos.

Em 1803, Carnot demonstrou seus estudos sobre eficiência das máquinas térmicas e, em 1807, Thomas Young, usou o termo energia no sentido que atualmente é conceituada, como a capacidade de realizar trabalho.

No ano de 1840, Joule e Helmholtz constataram em trabalhos independentes que a eletricidade era uma forma de energia, uma vez que se relaciona com o calor. Em 1862, Thomson (Lord Kelvin), usou o termo energia cinética pela primeira vez para representar a energia do movimento (ORNELLAS, 2006).

Por volta de 1850, foi estabelecido o princípio geral da conservação de energia, que originou a partir dos trabalhos de Galileu (1564-1642) e Isaac Newton (1642-1726). Este conceito resulta diretamente da segunda lei do movimento, estabelecida por Newton, onde trabalho é definido como o produto da força pelo deslocamento (SMITH; NESS; ABBOTT, 2007).

A prática de cogeração, segundo alguns estudos, surgiu em meados de 1870 com o uso de máquinas a vapor de eixo alternativo acopladas em geradores elétricos, localizadas, principalmente, em áreas urbanas com alta densidade populacional. Até 1909 havia nos EUA apenas 150 sistemas de aquecimento distrital, onde muitos deles operavam com baixa eficiência (BALESTIERI, 1994).

Por conta da elevação do preço dos combustíveis e a preocupação mundial pela conversão energética com menores emissões de CO₂, a cogeração voltou a ser nos anos 80, uma importante alternativa para geração de energia (SILVA; MORAIS, 2008).

Em 2001, a geração de energia no Brasil foi afetada devido à ausência de investimentos e recursos financeiros em energias alternativas, culminando em uma crise que provocou racionamentos forçados de energia à população em determinados horários do dia. Desde então, várias medidas têm sido tomadas para incentivar a geração descentralizada de energia e, também, a geração de energia proveniente de fontes alternativas (HENRIQUES; OLIVEIRA; COSTA, 2003).

As últimas décadas foram marcadas pelos discursos sobre a temática de renovação das fontes energéticas, onde diversas alternativas foram propostas, cada uma com suas particularidades e desafios, sejam elas renováveis ou não renováveis. Fontes renováveis, como a força das águas, dos ventos, da decomposição de resíduos e a energia do sol, estão entre os combustíveis usados para a geração alternativa de energia elétrica (GEHRING, 2014).

1.2 DEFINIÇÕES DE GERAÇÃO E COGERAÇÃO DE ENERGIA

Energia é um conceito básico em todas as disciplinas das ciências e das engenharias. Um dos princípios mais importantes é entendê-la como uma quantidade conservada, ou seja, a energia não pode ser criada e nem destruída, mas apenas convertida ou redistribuída em outras formas. Entender sobre energia significa entender sobre os recursos energéticos e suas limitações, bem como, as consequências ambientais de sua utilização (HINRICHS; KLEINBACH; REIS, 2012).

O conceito de energia é fundamental assim como o da massa e o da força, e apresenta dificuldade para ser definido com precisão, sendo entendido como a capacidade de produzir um efeito ou trabalho. Vale ressaltar que a energia pode ser acumulada num sistema e pode ser transferida, por exemplo, como o calor, de um sistema para outro (VAN WYLEN; BORGNAKKE; SONNTAG, 1995).

Diante destes conceitos, gerar energia é converte-la em suas diversas formas, como exemplo, as plantas, que captam a energia proveniente do sol, em forma de fótons (energia radiante) e convertem, através da fotossíntese, em energia química, essencial para nossa sobrevivência, assim como o corpo humano, que converte a energia química presente nos alimentos em esforço físico (movimento muscular).

De acordo com o Conselho Mundial de Energia (CME), cogeração significa a geração simultânea e sequencial de duas ou mais formas de energia, podendo utilizar um ou mais tipos de combustíveis (BARJA, 2006). Nas últimas décadas, seu uso tem apresentado uma forte tendência de crescimento e hoje se pode afirmar que o seu emprego mundial se deve às necessidades de calor para fins industriais (BALESTIERI, 1994).

A Figura 1 demonstra um sistema de cogeração onde a eficiência total é de 70%, produzindo energia térmica e eletromecânica simultaneamente.

Figura 1. Cogeração com produção de energia térmica e eletromecânica em simultâneo.



Fonte: Barja (2006).

1.3 GERAÇÃO DE ENERGIA NO BRASIL

Para demonstrar o processo de produção e consumo de energia do Brasil, foi criado o Balanço Energético Nacional (BEN), que é um documento sobre fluxos físicos anuais do setor energético brasileiro publicado regularmente desde 1970 pelo Ministério de Minas e Energia (MME), e a partir de 2004 por meio da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). As atividades compreendem produção, estoques, comércio externo, transformação, distribuição e consumo final por setores econômicos (MONTROYA; LOPES. GUILHOTO, 2014). Tal publicação é considerada, portanto, uma das mais completas e sistematizadas bases continuadas de dados energéticos disponível no país.

Analisando os dados do Balanço Energético Nacional, a matriz energética brasileira está entre as mais elevadas no mundo no que diz respeito à participação de fontes renováveis. De toda oferta interna de energia, 41,2% representa a participação de energias renováveis em nossa matriz energética que, quando comparada ao restante do mundo, esta proporção fica bem abaixo, próximo a 13% (EPE, 2016).

Devido à forte influência das energias renováveis na matriz energética brasileira, as emissões de CO₂ per capita no Brasil é uma das menores do mundo, acumulando um valor de 2,3 tCO₂/hab, enquanto que em países como os Estados Unidos e China, este valor fica em torno de 16,2 tCO₂/hab e 6,6 tCO₂/hab, respectivamente (EPE, 2016).

No ano de 2015 houve uma queda de 2,1% na oferta interna de energia, influenciada pelo comportamento da oferta interna do petróleo e de seus derivados, que retraíram 7,2% no mesmo período devido ao superávit no fluxo de importação e exportação. Outro fator que contribuiu para queda da oferta interna de energia foi o enfraquecimento da economia brasileira, que teve um recuo de 3,8% no PIB – Produto Interno Bruto (EPE, 2016).

Por outro lado, as fontes renováveis se destacaram no cenário, tendo como exemplo a geração eólica que teve um crescimento de 77,1% em relação ao ano de 2014, ultrapassando pela primeira vez a participação da geração de energia nuclear no Brasil. A Tabela 1 representa a repartição da oferta interna de energia no Brasil tendo como base o ano de 2015.

Tabela 1. Repartição da oferta interna de energia no Brasil - Ano Base 2015.

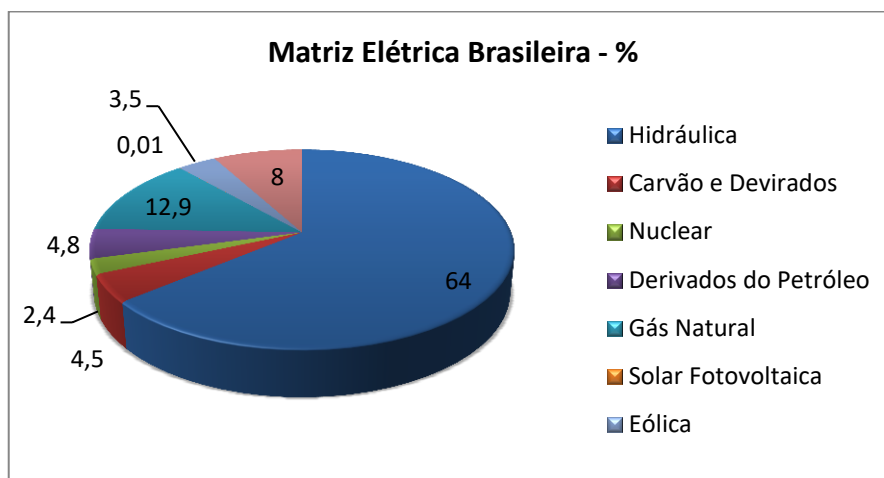
Fontes Renováveis	(%)	Não Renováveis	(%)
Biomassa de Cana	16,9	Petróleo e derivados	37,3
Hidráulica	11,3	Gás natural	13,7
Lenha e carvão vegetal	8,2	Carvão mineral	5,9
Lixívia e outras renováveis	4,7	Urânio	1,3
		Outras não renováveis	0,6
Total	41,2	Total	58,8

Fonte: Adaptado de EPE (2016).

O setor industrial é o que mais consome energia no Brasil, representando cerca de 32,5% de todo o consumo, seguido pelos setores de transportes e residencial, que representam 32,2 e 9,6%, respectivamente (EPE, 2016).

A matriz elétrica brasileira é predominantemente renovável, pois representa 75,5% de toda oferta interna de energia, sendo que 64% provêm da geração hidráulica. A Figura 2 demonstra a Matriz Elétrica Brasileira no ano de 2015 (EPE, 2016).

Figura 2. Matriz Elétrica Brasileira - Ano Base 2015.



Fonte: Adaptado de EPE (2016).

1.4 A BIOMASSA NO SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO

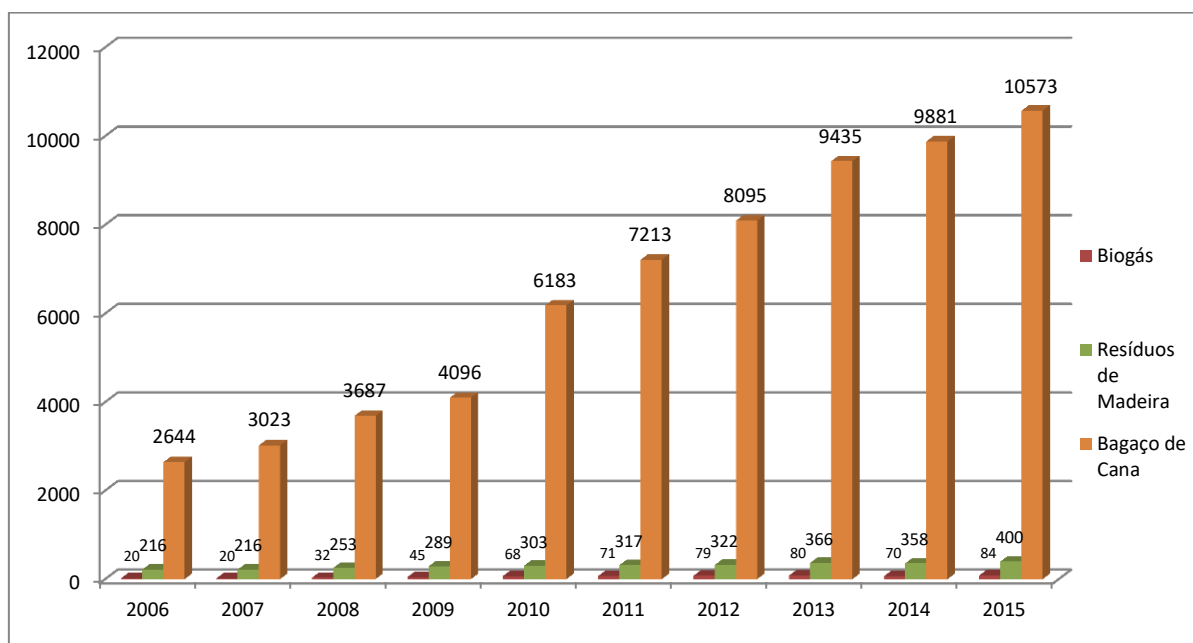
Biomassa é toda matéria orgânica, seja de origem vegetal ou animal, que pode ser utilizada na produção de energia. Ela sempre esteve presente na história da civilização, sendo que inicialmente era utilizada na forma de lenha ou carvão (CARDOSO, 2012).

Atualmente, a biomassa representa em torno de 8,2% de toda oferta interna de energia bruta no Brasil, superando a oferta interna através de fontes de origem nuclear, dentre outras. A produção de lenha no ano de 2015 foi de aproximadamente 79 milhões de toneladas, enquanto que a produção do bagaço de cana foi de 162 milhões de toneladas (EPE, 2016).

No que diz respeito ao consumo final de biomassa, o setor industrial é o principal consumidor, representando cerca de 46,2% de todo o consumo, seguido pelos setores de alimentos e bebidas com 24,7% e pelo setor de transportes com 21,6% (EPE, 2016).

A capacidade instalada de geração de energia elétrica a partir do biogás é de 84 MW, e se manteve crescente nos últimos anos, superando a capacidade instalada a partir da energia solar e ficando abaixo da capacidade instalada a partir da energia eólica e de resíduos de madeira (EPE, 2016). Quando comparada as demais biomassas esta capacidade instalada ainda é pouco significativa, representando um percentual menor do que 1% em relação às demais fontes. A Figura 3 representa a capacidade instalada de geração de energia elétrica nos últimos anos, comparando o bagaço de cana, resíduos de madeira e o biogás.

Figura 3. Capacidade instalada de geração elétrica por fonte no Brasil (MW).



Fonte: Adaptado de EPE (2016).

1.5 BIOGÁS E SUA IMPORTÂNCIA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Desde 1970, com a crise energética do petróleo, a produção de energia através da utilização de biomassa se destacou no Brasil. Por apresentar uma geração significativa de resíduos agropecuários, bem como o aproveitamento destes, a atividade rural é o principal responsável pela produção de biogás no país (COELHO et al., 2001).

A partir da criação do Programa de Incentivo às Fontes de Energia no Brasil (PROINFA) em 2002, o qual tinha como objetivo aumentar a participação de energias renováveis para geração de eletricidade com a colaboração de produtores independentes, novas oportunidades para implantação de sistemas de geração de energia elétrica utilizando biogás como fonte primária de energia puderam ser implantadas para reduzir a participação na matriz energética do país de combustíveis fósseis e da água (NEVES, 2010).

O PROINFA criou em 2010 o Plano da Agricultura de Baixo Carbono (ABC), com a finalidade de destinar e ampliar os recursos para financiamento de custeio, comercialização e investimento para os produtores rurais adotarem técnicas agrícolas sustentáveis. A produção de biogás a partir da biodigestão de dejetos de animais foi englobada pelo ABC, e pretende tratar 4,4 milhões de metros cúbicos de dejetos, e, assim, evitar a emissão de 6,9 milhões de toneladas de CO₂ ao utilizar o biogás como fonte de obtenção de energia elétrica ou para aquecimento nas propriedades (MAPA, 2013).

1.6 O SETOR AGROINDUSTRIAL BRASILEIRO

A partir de 1970, o Brasil vivenciou um aumento no setor agroindustrial, especialmente no processamento de café, soja, laranja e cana-de-açúcar e, também, na criação de animais, principais produtos da época.

A agroindústria possui uma interdependência com relação a diversos ramos da indústria, pois necessitam de embalagens, insumos agrícolas, irrigação, máquinas e implementos. Esse conjunto de interações dá à atividade alto grau de importância econômica para o país, sendo que, no ano de 2014, o agronegócio representou entre 22,0 e 23,0% do Produto Interno Bruto (PIB) total da economia brasileira, atingindo um montante de R\$ 1,1 trilhão, sendo que, deste total, 70% está diretamente ligado à atividade agrícola, e os demais 30% estão relacionados à atividade de pecuária (MAPA, 2015).

Em suma, o agronegócio ocupa um lugar de destaque na economia mundial, principalmente nos países em desenvolvimento, garantindo o sustento de indivíduos e contribuindo para o crescimento da exportação do país.

O Brasil é um país com vocação natural para o agronegócio devido às suas características e diversidades, principalmente encontradas no clima favorável, no solo, na água, no relevo e na luminosidade. Com seus 8,5 milhões de km² o Brasil é o país mais extenso da América do Sul e o quinto do mundo com potencial de expansão de sua capacidade agrícola sem necessidade de agredir o meio ambiente. (ECOAGRO, 2016).

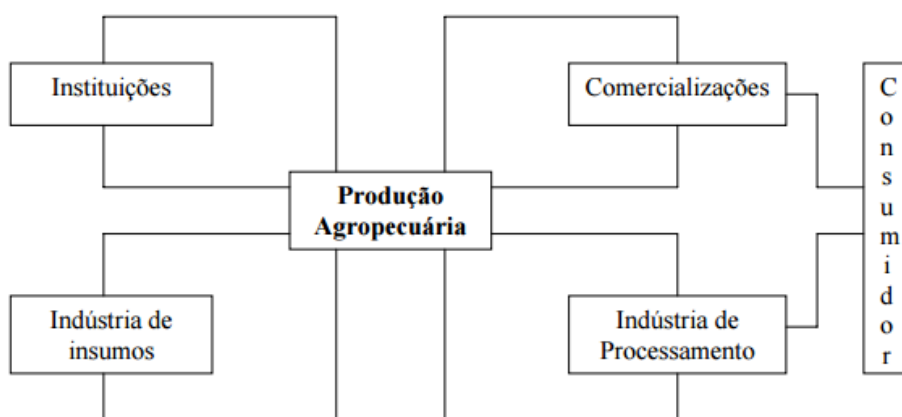
A agroindústria realiza a transformação dos produtos primários da agropecuária em subprodutos que podem ser inseridos na produção de alimentos, como os frigoríficos, indústria de enlatados, laticínios, indústria de couro, biocombustíveis, produção têxtil entre muitos outros.

Para poder melhor captar as transformações estruturais e qualitativas, geralmente, um complexo agroindustrial apresenta um esquema como o mostrado na Figura 4, sendo formado pelos seguintes setores (SZMRECSÁNYI, 1983):

- Produção agropecuária: engloba os vários tipos de cultivo e criações.
- Instituições: envolve os vários serviços prestados ao setor agropecuário (crédito, assistência técnica, extensão, pesquisa, etc...).
- Indústria de insumos: abrange os ramos industriais e comerciais que se orientam para o atendimento das necessidades produtivas agropecuárias (corretivos, fertilizantes, defensivos, implementos, equipamentos, etc...).

- Comercialização: diz respeito aos serviços de estocagem e comercialização dos produtos agropecuários (cooperativas, atacadistas, varejistas, redes de comercialização, etc...).
- Indústria de processamento: inclui os ramos industriais com produção predominantemente baseada em matérias-primas de origem agropecuária.

Figura 4. Esquema do complexo agroindustrial.



Fonte: Szmrecsányi (1983).

Segundo Pinazza (2006), uma cadeia produtiva agropecuária seria composta por elos que englobariam as organizações supridoras de insumos básicos para a produção agrícola ou agroindustrial, as fazendas e agroindústrias com seus processos produtivos, as unidades de comercialização atacadista e varejista e os consumidores finais, todos conectados por fluxos de capital, materiais e de informação.

O Brasil é o quinto maior consumidor de carne suína do mundo e o quarto maior exportador deste produto. A expectativa do mercado suinícola brasileiro para os próximos anos é de crescimento, principalmente da exportação. Em 2015, foi produzido, mais de 3,6 milhões de toneladas de carne suína, superando em 200 mil toneladas a produção do ano de 2014 (ABPA, 2016).

A avicultura de corte brasileira é reconhecida como uma das mais desenvolvidas do mundo, com índices de produtividade excepcionais, fato que se deve às pesquisas em todos os elos da cadeia nos últimos anos (SUNADA, 2011). A produção de aves em 2015 foi de 13,1 milhões de toneladas representando um crescimento de 3,4% em relação a 2014. Com este resultado, o Brasil se consolidou como segundo maior produtor de carne de frango do mundo, superando a China, que produziu 13 milhões de toneladas em 2015 (ABPA, 2016).

1.7 REVISÃO DE LITERATURA

Nos últimos anos, têm surgido diversos trabalhos relacionados à geração de energia a partir dos resíduos sólidos orgânicos e efluentes líquidos, o que demonstra a preocupação dos pesquisadores com o tema. A seguir serão apresentadas resumidamente algumas publicações que serviram como referência para o desenvolvimento do presente trabalho.

Santos e Júnior (2004) avaliaram o fluxo energético de um galpão de frangos de corte no município de Sertãozinho (SP). Eles avaliaram 08 lotes de criação em um galpão comercial da empresa Frango Sertanejo e concluíram que da energia direta de entrada, 10,2% correspondia a maravalha, 0,3% as aves, 86,5% a ração e 0,8% a eletricidade. No que diz respeito à energia de saída, 46,7% poderia retornar na forma de biogás, por meio da biodigestão anaeróbia da cama de frango. Para obtenção destes resultados, eles utilizaram o poder calorífico de cada componente utilizada neste processo de produção, dividindo-se em energia direta, indireta, entrada e saída.

Pinto (2006) avaliou a bioestabilização de resíduos sólidos orgânicos, lodos de tanques sépticos, dejetos suínos e lixiviado. Neste trabalho foi avaliado os processos de co-digestão e qual seria a melhor proporção de dejetos em relação aos resíduos orgânicos a ser adotado. O reator UASB foi utilizado no processo, apresentando eficiências de 85 a 95% na remoção da Demanda Química de Oxigênio (DQO). Quanto ao inóculo adicionado, chegou-se à conclusão de que este não iria resultar necessariamente em uma maior produção de biogás.

O IPCC (2006) publicou um guia de referência para elaboração de trabalhos com foco na geração de biogás. Foram abordadas as gerações de CH_4 provenientes da decomposição anaeróbia de resíduos sólidos urbanos, de efluentes líquidos domésticos e industriais e da incineração de resíduos sólidos. Para os efluentes líquidos industriais foi considerada uma taxa de 0,25 kg de CH_4 /kg de DQO.

Rosário (2007) avaliou a disposição de lodo gerado numa Estação de Tratamento de Água (ETA) em reator UASB. Foram construídos dois reatores em escala piloto, e o esgoto utilizado para alimentar o sistema foi obtido de um Conjunto Residencial da USP, já o lodo utilizado foi obtido da ETA da cidade de Juquitiba (SP). Conclui-se que não havia interferência no funcionamento do reator UASB com a adição de lodo de ETA.

Zanin et al. (2010) calcularam a viabilidade econômico-financeira de implantação de um biodigestor, como alternativa para reduzir os impactos ambientais causados pela suinocultura. O projeto foi desenvolvido em dois núcleos de uma propriedade rural em Santa Catarina, onde foi estudado a implantação de dois biodigestores, um de 800 m³ e o outro com

1.400 m³. O investimento inicial previsto foi de R\$ 634.000,00 e o *payback* simples do projeto foi de 5 anos e 9 meses.

Ferrarez et al. (2011) avaliaram o potencial de geração de energia térmica e elétrica a partir do biogás na cadeia produtiva de frango de corte na Zona da Mata de Minas Gerais. Por meio desse estudo, verificaram um potencial de produção de biogás de aproximadamente 2,13 milhões de botijões de 13 kg e um potencial elétrico disponível de aproximadamente 14,37 MW, considerando a utilização do biogás em uma turbina a gás.

Matter (2011) avaliou a co-digestão de resíduos de incubatório de aves e águas residuárias agroindustriais na cidade de Cafelândia (PR). Foi utilizada uma bateria de 20 biodigestores, confeccionados com tubos de PVC, e com capacidade de aproximadamente 60 litros cada. Após os estudos, verificaram a geração de 55,73 m³ de biogás para cada tonelada de resíduo de incubatório submetido à decomposição anaeróbia.

Leite (2011) avaliou a digestão anaeróbia mesofílica de lodo adensado de Estação de Tratamento de Esgoto, submetido a uma temperatura de 35°C em digestor piloto. Nas condições testadas, o biogás produzido apresentou constituição média de 60% de CH₄ e 34% de CO₂. Foi constatado que o digestor piloto tinha capacidade de remover a matéria orgânica presente no lodo adensado, gerando um subproduto com menor massa de sólidos e com característica predominantemente inorgânica.

Baldin (2013) avaliou tecnicamente e economicamente o aproveitamento energético da cama de aviário em uma propriedade localizada no Sudoeste do Paraná. O aproveitamento energético foi dimensionado a partir do processo de biodigestão anaeróbica da cama de frango para o atendimento das necessidades térmicas e elétricas do próprio aviário. A quantidade de biogás gerado foi de aproximadamente 90,13 m³/dia e o *payback* em um dos cenários foi de 167 meses.

Konrad et al. (2014) avaliaram a digestão anaeróbia de dejetos de suínos e tripa celulósica para geração de biogás. Após os trabalhos, concluiu que a tripa celulósica, quando adicionada aos dejetos de suínos, pode proporcionar altos percentuais de CH₄ no biogás. A taxa de geração de biogás média encontrada foi de 36,77 m³ biogás por m³ de tripa celulósica e o percentual de metano em relação ao biogás foi de 54,6%.

Barros (2015) estudou a cogeração de energia com biogás a partir de lodo biológico na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Arrudas, em Sabará (MG). O sistema avaliado foi capaz de gerar aproximadamente 1200 m³/h de vazão de biogás e, através de 3 microturbinas a gás, a potência instalada atingiu 2,4 MW.

A Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental publicou uma coletânea de séries compostas por guias técnicos no ano de 2015, como parte do programa criado pelo Ministério das Cidades denominado Probiogás, que surgiu a partir de uma parceria entre o governo brasileiro e o governo alemão, com intuito de enriquecer tecnicamente os profissionais brasileiros que atuam neste segmento. O material aborda toda a concepção de projeto para geração de biogás, desde a decomposição de efluentes líquidos até a decomposição de resíduos sólidos orgânicos. A coletânea é dividida em quatro séries, cada uma agrupando um conjunto de publicações que contribuem para uma determinada área do conhecimento, sendo:

- **Série 01 – Biogás:** Composta por 06 cadernos que abordam os temas voltados para o licenciamento ambiental de usinas de biogás; o catálogo de tecnologias e empresas voltadas ao mercado de biogás; a relevância da digestão anaeróbia para o Brasil; o biometano como combustível veicular; as principais barreiras e soluções para o mercado de biogás no Brasil; e uma capacitação em qualidade, saúde e meio ambiente para as atividades relacionadas ao aproveitamento do biogás.

- **Série 02 – Resíduos Sólidos Urbanos:** Esta série aborda especificamente a utilização energética do biogás que pode ser gerado a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos.

- **Série 03 – Estações de Tratamento de Esgoto (ETE):** Nesta série os cadernos abordam as principais recomendações para a licitação de uma usina de biogás em ETE, a viabilidade técnico-econômica da utilização do biogás e exemplos práticos da utilização de biogás em Reatores Anaeróbios.

- **Série 04 – Resíduos Agrosilvopastoris:** Esta série aborda a utilização do biogás na atividade agrícola, pecuária e agroindústria, exemplificando opções de tratamento de efluentes para este segmento.

1.8 MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

O setor agroindustrial brasileiro tem contribuído de forma significativa para o crescimento econômico do país, fortalecendo o aumento da produção e também da oferta de alimentos e matérias-primas para o mercado interno, participando ativamente da exportação, ampliando a disponibilidade de divisas, e, ainda, consumindo bens produzidos no setor industrial. Por outro lado, esse segmento contribui sistematicamente para a geração de grandes quantidades de resíduos, sólidos e líquidos, provenientes dos processos produtivos e de transformação (SILVA; MORAIS, 2008).

As agroindústrias, principalmente aquelas situadas próximas aos centros urbanos, produzem quantidades consideráveis de resíduos sólidos e líquidos que, em alguns casos, são dispostos em aterros sanitários ou simplesmente estocados próximos às áreas de produção, sem uma alternativa de destino final definida, gerando problemas sanitários e ambientais (FIORI; SCHOENHALS; FOLLADOR, 2008).

Quando os efluentes líquidos de uma agroindústria são descartados num corpo hídrico sem tratamento, provocam o desequilíbrio do ecossistema, pois são constituídos, preponderantemente, de materiais orgânicos. À medida que a matéria orgânica aumenta o consumo de oxigênio por microrganismos no ambiente passa a ser maior, tornando a reposição através dos processos de aeração natural e fotossíntese insuficientes, resultando na falta de oxigênio para peixes e outros animais aquáticos, ocasionando grande impacto ambiental (ARCHELA et al., 2003).

As unidades agroindustriais também demandam grande quantidade de energia, cerca de 80 a 85% da energia total necessária num abatedouro é energia térmica na forma de vapor para os processos de cozimento, digestão e secagem das matérias-primas e de água quente para esterilização e limpeza, sendo a mesma produzida pela queima de combustíveis nas caldeiras da unidade industrial. O restante, 15 a 20% do consumo de energia em um abatedouro, ocorre na forma de eletricidade, que é utilizada na operação de máquinas e equipamentos para produção de refrigeração, ventilação, iluminação e ar comprimido (PACHECO, 2006).

Diante deste cenário, é evidente a importância do setor agroindustrial para o Brasil, portanto aperfeiçoar o processo produtivo através de técnicas de aproveitamento energético dos resíduos orgânicos e efluentes líquidos, além de melhorar a eficiência do sistema de tratamento, é uma excelente alternativa para o desenvolvimento sustentável deste setor econômico, contribuindo para a redução do consumo de combustíveis não renováveis e fortalecendo o uso da biomassa na matriz energética brasileira.

1.9 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal desta dissertação é analisar o potencial de geração de energia a partir dos resíduos orgânicos e efluentes líquidos gerados em uma indústria alimentícia situada no município de Rio Verde (GO), a qual tem como atividade principal o abate de aves e suínos, além da industrialização de produtos alimentares, produzindo aproximadamente 40.000 toneladas por mês de produto acabado.

Os objetivos específicos desta dissertação são os seguintes:

- Elaborar revisão bibliográfica relacionada ao tema, buscando as melhores práticas de reaproveitamento energético destes resíduos sólidos e líquidos;
- Realizar o levantamento de todos os resíduos orgânicos gerados no ano de 2015/2016 na agroindústria em estudo, através do sistema de informação oficial da empresa (SAP/R3);
- Fazer o levantamento da vazão de saída do tratamento primário de efluentes no ano de 2015/2016;
- Realizar o levantamento qualitativo do efluente, em relação ao parâmetro DQO (Demanda Química de Oxigênio), do tratamento primário de efluentes, nos pontos de entrada e saída deste sistema, no ano de 2015/2016;
- Propor alternativas de tratamento destes resíduos orgânicos e efluentes líquidos em sistemas com potencial de geração de energia;
- Calcular o potencial de geração de energia dos resíduos orgânicos e efluentes líquidos gerados;
- Realizar cálculo da viabilidade financeira de implantação deste sistema na indústria estudada;
- Demonstrar os benefícios do uso de energias alternativas, bem como os ganhos financeiros resultantes.

2 CICLOS TÉRMICOS E DE POTÊNCIA

2.1 CICLO DE RANKINE

O ciclo Rankine utiliza água como fluido de trabalho. Esse fluido é bombeado para uma caldeira onde um combustível é queimado e o vapor superaquecido é gerado devido ao aproveitamento da energia térmica liberada no processo de combustão. Esse vapor, com temperatura e pressão elevada, passa por um processo de expansão numa turbina, onde ocorre a conversão de parte da energia térmica em trabalho de eixo do equipamento (BARJA, 2006).

É o ciclo ideal para as centrais térmicas a vapor utilizadas na produção de potência, sendo constituído por quatro processos que ocorrem em regime permanente e operam na região de saturação, sendo:

1-2: Processo de bombeamento adiabático reversível na bomba.

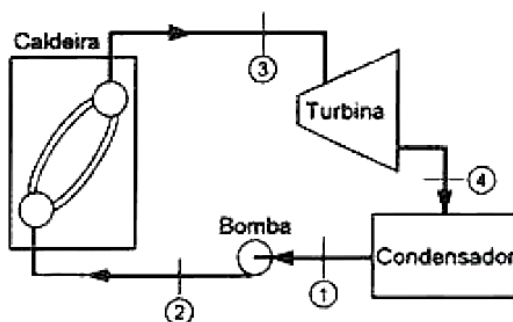
2-3: Transferência de calor a pressão constante, exemplo: caldeira.

3-4: Expansão adiabática reversível, na turbina (ou na máquina a vapor).

4-1: Transferência de calor e pressão constante, exemplo: condensador.

A Figura 5 demonstra este esquema através de uma unidade motora simples a vapor que opera segundo o ciclo Rankine.

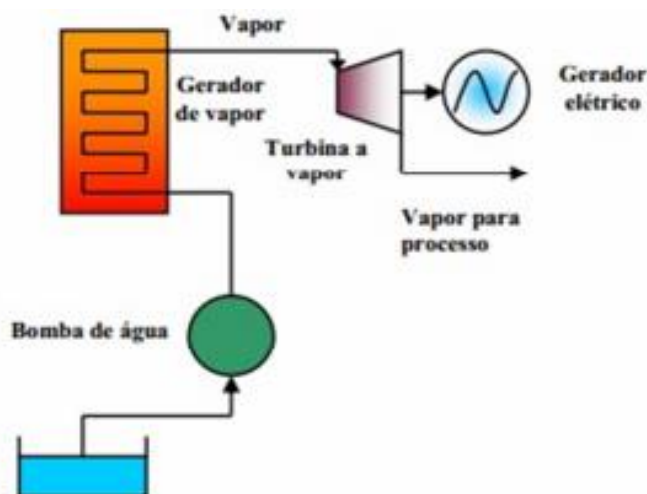
Figura 5. Unidade motora simples a vapor que opera segundo o ciclo de Rankine.



Fonte: Van Wylen, Borgnakke e Sonntag (1995).

A cogeração usando o ciclo Rankine apresenta eficiência elétrica de aproximadamente 30% e térmica em torno de 52%, isso se considerarmos as perdas totais próximas a 18% (NOGUEIRA et al., 2004). A Figura 6 ilustra um sistema típico de cogeração utilizando o ciclo Rankine.

Figura 6. Cogeração com ciclo Rankine.



Fonte: Kalatalo (2004).

2.2 CICLO DE BRAYTON

No ciclo de Brayton, o fluido de trabalho não apresenta mudança de fase, pois sempre estará na fase de vapor (VAN WYLEN; BORGNAKKE; SONNTAG, 1995).

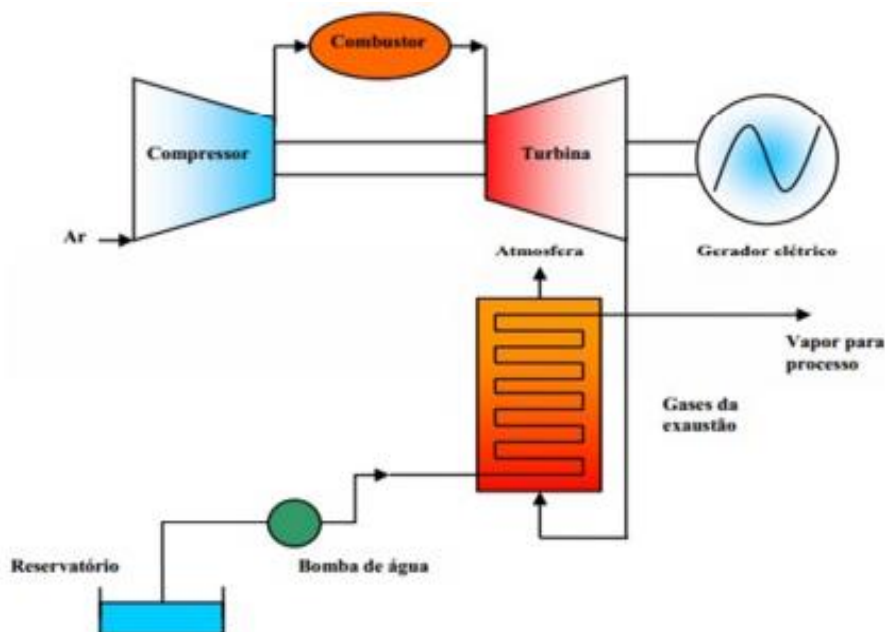
Neste ciclo, o ar atmosférico é comprimido num compressor e transferido para uma câmara de combustão, onde sua temperatura e pressão são elevadas através da queima do combustível. Nessas condições, após passar pela turbina propriamente dita, a energia térmica do ar é parcialmente convertida em trabalho mecânico, que pode ser convertido em energia elétrica se houver um gerador acoplado (BARJA, 2006).

O ciclo padrão a ar Brayton é o ideal para a turbina a gás simples (VAN WYLEN; BORGNAKKE; SONNTAG, 1995).

Para que ocorra de fato a cogeração, deve ser acoplado ao ciclo uma caldeira de recuperação (conhecida como HRSG - *Heat Recovery Steam Generator*), de modo que os gases exaustos da turbina sejam aproveitados na geração de vapor (KALATALO, 2004).

Segundo Nogueira et al. (2004), na cogeração a ciclo Brayton (associada a uma HRSG), o rendimento global chega a 80% (35% elétrico, 45% térmico e 20% de perdas totais). A Figura 7 esquematiza a cogeração com ciclo Brayton.

Figura 7. Cogeração com ciclo Brayton.



Fonte: Kalatalo (2004).

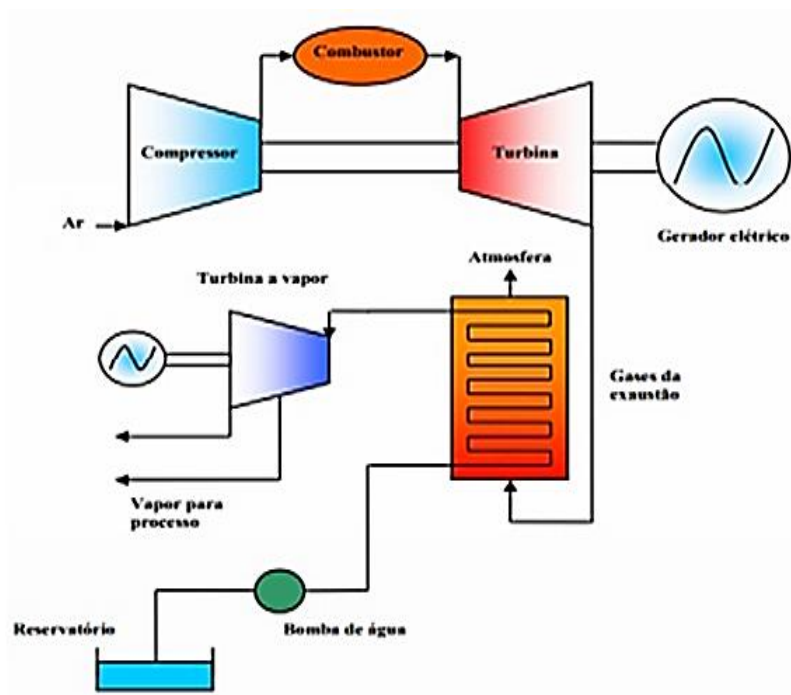
2.3 CICLO COMBINADO

As turbinas a gás podem ser classificadas, de modo geral, como *heavy duty* e aeroderivadas, que diferem especialmente em rendimento e aplicabilidade. As turbinas do primeiro tipo são projetadas para o uso industrial devido à boa combinação de fatores operacionais e econômicos, como alta confiabilidade e baixo custo (MACHADO, 2010), possuindo rendimentos inferiores e visando o aproveitamento dos gases exaustos a uma maior temperatura, seja para uma maior geração de vapor ou uso em ciclo combinado (BARJA, 2006).

De acordo com Machado (2010), as turbinas aeroderivadas são oriundas da adaptação de turbinas aeronáuticas para uso industrial, possuindo rendimentos superiores às do tipo *heavy duty*, havendo menor aproveitamento da energia térmica dos gases exaustos, com maior foco na geração elétrica.

A composição de um ciclo combinado é um arranjo entre dois ou mais ciclos, geralmente um ciclo Brayton com um ciclo Rankine, que podem levar a um rendimento elétrico acima de 60% e eficiências totais de aproximadamente 85% (BARJA, 2006). A Figura 8 mostra um exemplo de geração de energia a partir do ciclo combinado.

Figura 8. Cogeração com ciclo combinado.



Fonte: Kalatalo (2004).

2.4 CICLO OTTO E DIESEL

Existem outros equipamentos de conversão, designadamente motores de explosão, como o motor Diesel e de Ciclo Otto que se caracterizam por possuir um gás como fluido de trabalho. Contudo, o fluido de trabalho vai sofrendo uma mudança na sua composição à medida que o ciclo vai sendo percorrido: o fluido de trabalho começa por ser o ar, ao qual, durante o processo de combustão, é adicionado o combustível, transformando-se numa mistura de ar e combustível, designada por produto da combustão.

O ciclo ideal que mais se aproxima do que efetivamente ocorre em máquinas do tipo Otto ou Diesel é o ciclo composto Otto-Diesel.

As máquinas do tipo Diesel diferem das máquinas do tipo Otto por, no 1º tempo, admitirem apenas ar. O ar é então comprimido durante o 2º tempo e, como neste processo ainda não há combustível, é possível se atingir uma taxa de compressão (razão entre o máximo volume admitido pelo volume mínimo no início da admissão) mais elevada do que nas máquinas do tipo Otto. Quando, no início do 3º tempo, o ar está maximamente comprimido e à alta temperatura (de 600 a 750 K), uma bomba injetora (posicionada no lugar

da vela de ignição) vaporiza combustível (usualmente óleo diesel) para dentro do cilindro, ocorrendo à combustão espontânea (explosão) e a expansão dos gases. Finalmente ocorre o 4º tempo, durante o qual os gases são expulsos do cilindro. O rendimento real das máquinas Otto é um pouco inferior ao das máquinas Diesel, situando-se entre 22 e 30% para as primeiras e entre 30 e 38% para as segundas (SILVEIRA, 2016).

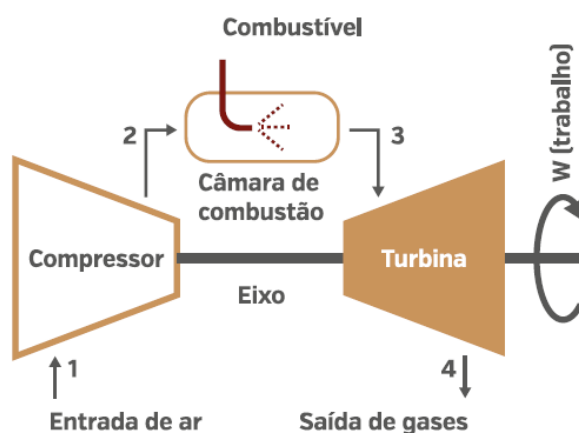
Os motores a gás de Ciclo Otto podem ser utilizados em pequenas, médias e grandes plantas, enquanto que os motores de Ciclo Diesel predominam em plantas de grande porte (BRASIL, 2015).

2.5 COGERAÇÃO DE ELETRICIDADE E CALOR

As unidades de cogeração de eletricidade e calor podem gerar simultaneamente, através de conjuntos motogeradores, as energias elétricas e térmicas. O tamanho do motor irá determinar a eficiência de conversão da energia, podendo apresentar uma eficiência elétrica de até 50% em um motor de Ciclo Diesel. Quando se utiliza biogás, cerca de 50% da energia primária é convertida em energia térmica útil, e operando em uma carga parcial, a eficiência diminui significativamente (BRASIL, 2015).

Dentre os principais equipamentos de cogeração, podemos destacar as turbinas ou microturbinas a gás, que são formadas basicamente por um compressor, uma câmara de combustão e a turbina em si (BRASIL, 2015). A Figura 9 mostra o diagrama esquemático do funcionamento de uma turbina a gás.

Figura 9. Diagrama do funcionamento de uma turbina a gás.



Fonte: Brasil (2015).

3 EFLUENTES LÍQUIDOS INDUSTRIAIS

3.1 CONCEITOS E CARACTERIZAÇÃO DOS EFLUENTES LÍQUIDOS INDUSTRIAIS

A deterioração da qualidade das águas está expandindo progressivamente com a urbanização, com o aumento da produção de bens de consumo e o incremento das atividades agroindustriais. O lançamento de diversos resíduos nos corpos d'água conduz à intensificação de processos poluidores prejudiciais aos sistemas aquáticos e comprometedores dos usos aos quais aqueles recursos hídricos estavam destinados (RIGO et al., 2014).

Segundo Archela et al. (2003), um centro urbano produz uma grande quantidade de efluentes líquidos, os quais podem ser subdivididos em dois tipos, quanto à sua geração:

- Efluentes domésticos: oriundos de residências, hotéis, bares, comércios e centros comerciais, salões de cabeleireiros, consultórios, clínicas, etc. Sua principal característica é a contaminação de águas residuárias, por fezes humanas e animais, restos de alimentos, sabões e detergentes.
- Efluentes industriais: oriundos de processos industriais, tais como: abate bovino, suíno e de aves. Eles são tidos como importante fator de degradação ambiental.

São consideradas águas residuárias todas que tenham origem no pós-uso nas mais diversas atividades, sejam industriais ou domésticas, e que tenham como destino final os tanques sépticos, reatores de digestão aeróbia e/ou anaeróbia, lagoas de estabilização, como, também, estações especializadas no tratamento de esgotos (BATISTA; QUEIROZ; OLIVEIRA, 2014).

Os efluentes não tratados das indústrias alimentícias, de bebidas e do setor sucroalcooleiro, não podem ser aplicados em solo agrícola mesmo quando misturados com outros tipos de efluentes, tais como: oleosos, domésticos não tratados e águas de mananciais e quando houver a presença de substâncias contaminantes em concentrações tais que levem a ultrapassar os valores orientadores de prevenção e substâncias odoríferas que possam ser perceptíveis fora dos limites da propriedade onde houver a aplicação (CETESB, 2010).

A industrialização compreende o beneficiamento de produtos, onde sua característica primordial consiste em conservar e transformar as matérias-primas, bem como extrair e enriquecer ou concentrar os componentes que lhe agregam valor (MENDONÇA et al., 2013). Durante o processo de industrialização são gerados resíduos como as águas residuárias de

processos de abate e industrialização, como a linha verde (esterco) e a linha vermelha (sangue), águas residuárias provenientes da limpeza, cinzas da caldeira, cascas e pedaços de madeira, fumaça, dentre outros (SCHENINI, 2011).

A produção de efluente durante o processamento de suínos também é bastante elevada, consumindo bastante água potável, uma vez que em comparação ao abate de frangos, os suínos apresentam menos fases durante o processo de abate, no entanto demandam maior quantidade de água durante as seções: de sangria, escaldagem, depilação e evisceração (SCARASSATI et al., 2003).

A evisceração é considerada a etapa em que há maior consumo de água, usada para a limpeza das tripas, em seções chamadas de bucharias e de triparias, onde são esvaziados de seus conteúdos, removendo-se a gordura e as camadas da parede intestinal (mucosa, serosa, submucosa e musculares), limpos e processados para posterior conservação, armazenamento e expedição (PACHECO, 2006). Esses efluentes ricos em material orgânico são encaminhados para tanques específicos para tratamento, ou seguem para graxarias, devido à sua constituição, estes despejos são altamente putrescíveis, iniciando o processo de decomposição em poucas horas.

3.2 FASES DO TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS

O funcionamento de uma Estação de Tratamento de Efluente (ETE) compreende basicamente as seguintes etapas (BENETTI, 2008):

- a) Gradeamento: baseado na remoção de sólidos grosseiros capazes de causar entupimentos e aspecto desagradável, lançando mão do uso de grades mecânicas ou de limpeza manual (GIORDANO, 2004).
- b) Peneiramento: É feito com o objetivo de remover os sólidos, normalmente com diâmetros superiores a 1 mm, capazes de causar entupimentos ou com considerável carga orgânica, sendo realizado com a utilização de peneiras. As peneiras mais utilizadas têm malhas com barras triangulares com espaçamento variando entre 0,5 e 2 mm, podendo a limpeza ser mecanizada (jatos de água ou escovas) ou estática. A utilização de peneiras é imprescindível em tratamentos de efluentes de indústrias de refrigerantes, têxteis, pescados, abatedouros, frigoríficos, curtumes, cervejarias, indústrias de sucos de frutas e outras indústrias de alimentos (GIORDANO, 2004).

- c) Sedimentação ou Floculação - Tratamento primário: O processo de sedimentação é uma das etapas de clarificação, devendo ser aplicado conforme as características de cada efluente e do processo de tratamento. A sedimentação é um processo físico, que por diferença de massas e tempo de repouso, fará com que as partículas sólidas se decantem no fundo das lagoas de tratamento. Já no processo de coagulação são adicionados coagulantes químicos, que em uma unidade de flotação, e através da ação de microbolhas, faz com que os sólidos suspensos ocupem a superfície da unidade de tratamento, que neste caso é denominada de flotadores.
- d) Processos Biológicos: Os processos biológicos de tratamento reproduzem em escala de tempo e área os fenômenos de autodepuração que ocorrem na natureza, com objetivo de remover a matéria orgânica dissolvida e em suspensão, através da transformação desta em sólidos sedimentáveis (flocos biológicos) ou gases, gerando um produto com significativa redução da presença de microrganismos e menor concentração de matéria orgânica (GIORDANO, 2004). Quando submetemos os efluentes líquidos a condições anaeróbias, há a geração de CH_4 , CO_2 , dentre outros gases.

3.3 ASPECTOS LEGAIS

A resolução n.º 430, de 13 de maio de 2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementando e alterando a resolução nº 357, de 17 de março de 2005, que estabelecia os padrões de qualidade e de lançamento de efluente em um corpo hídrico (CONAMA, 2011), apontando que todos os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente no corpo receptor desde que obedeçam às condições e padrões previstos no artigo 16, resguardadas outras exigências cabíveis, tais como:

- a) pH entre 5 a 9;
- b) temperatura inferior a 40°C , sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura;
- c) materiais sedimentáveis (até 1 ml/l em teste de 1 hora em cone Imhoff);
- d) regime de lançamento com vazão máxima de até 1,5 vez a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor, exceto nos casos permitidos pela autoridade competente (óleos minerais, até 20 mg/l, e óleos vegetais e gorduras animais, até 50 mg/l);

- e) ausência de materiais flutuantes;
- f) remoção mínima de 60% da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), em 5 dias a 20°C, sendo que este limite só poderá ser reduzido no caso de existência de estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor.

Adicionalmente, a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 (BRASIL, 1998), dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, responsabilizando a pessoa jurídica ou física, autoras, co-autoras ou partícipes do mesmo fato. Vale destacar no Capítulo V, o artigo 33, que considera crime ambiental a emissão de efluentes ou carreamento de materiais, provocando o perecimento de espécies da fauna aquática existentes em rios, lagos, açudes, lagoas ou águas jurisdicionais brasileiras. Na Seção III, o artigo 54 considera infrator quem possa causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, fauna e flora (BADO, 2006).

O artigo 3 da resolução n.º 430, de 13 de maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), ressalta que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos na resolução e em outras normas aplicáveis (CONAMA, 2011).

Para o controle de qualidade de água, atendendo a legislação brasileira, devem ser observados os seguintes parâmetros físicos e químicos:

- a) Cor: A cor de uma amostra de água está associada ao grau de redução de intensidade que a luz sofre ao atravessá-la, devido à presença de sólidos dissolvidos, principalmente material em estado coloidal orgânico e inorgânico (CETESB, 2009). A determinação da intensidade da cor da água é feita comparando-se a amostra com um padrão de cobalto-platina, sendo o resultado fornecido em unidades de cor, também chamadas uH (unidade Hazen). As águas naturais apresentam, em geral, intensidades de cor variando de 0 a 200 unidades (FUNASA, 2014). Os esgotos domésticos se caracterizam por apresentarem, predominantemente, matéria orgânica em estado coloidal, além de diversos efluentes industriais, que contêm taninos (efluentes de curtumes, por exemplo), anilinas (efluentes de indústrias têxteis e de pigmentos, por exemplo), lignina e celulose (efluentes de indústrias de celulose e da madeira, por

exemplo). O problema maior de cor na água é, em geral, o estético, já que causa um efeito repulsivo na população (CETESB, 2009).

- b) Temperatura: Variações de temperatura são parte do regime climático normal e corpos de água naturais apresentam variações sazonais e diurnas, bem como estratificação vertical. A temperatura desempenha um papel crucial no meio aquático, condicionando as influências de uma série de variáveis físico-químicas, tais como viscosidade, tensão superficial, compressibilidade, calor específico, constante de ionização e calor latente de vaporização diminuem, enquanto a condutividade térmica e a pressão de vapor aumentam (CETESB, 2009).
- c) Turbidez: A turbidez pode ser definida como uma medida do grau de interferência à passagem da luz através do líquido, grandeza dada em NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*). Além da ocorrência de origem natural, a turbidez da água pode, também, ser causada por lançamentos de esgotos domésticos ou industriais (FUNASA, 2014).
- d) Sólidos: Os sólidos nas águas correspondem a toda matéria que permanece como resíduo, após evaporação, secagem ou calcinação da amostra a uma temperatura pré-estabelecida durante um tempo fixado. Para a determinação de sólidos são empregados métodos gravimétricos (CETESB, 2009). Muito embora os parâmetros turbidez e sólidos totais estejam associados, eles não são absolutamente equivalentes. Uma pedra, por exemplo, colocada em um copo de água limpa, confere àquele meio uma elevada concentração de sólidos totais, sendo que a sua turbidez pode ser praticamente nula. O padrão de potabilidade refere-se apenas aos sólidos totais dissolvidos (limite: 1000 mg/l), já que esta parcela reflete a influência de lançamento de esgotos, além de afetar a qualidade organoléptica da água (FUNASA, 2014).
- e) pH: O potencial hidrogeniônico (pH) representa a intensidade das condições ácidas ou alcalinas do meio líquido, por meio da medição da presença de íons hidrogênio (H^+). O valor do pH influencia na distribuição das formas livre e ionizada de diversos compostos químicos, além de contribuir para um maior ou menor grau de solubilidade das substâncias e de definir o potencial de toxicidade de vários elementos (FUNASA, 2014).
- f) Alumínio: O alumínio pode atingir a atmosfera como material particulado por meio da suspensão de poeiras dos solos e, também, da combustão do carvão. Na água, o metal pode ocorrer em diferentes formas e é influenciado pelo pH, temperatura e presença de fluoretos, sulfatos, matéria orgânica e outros ligantes (CETESB, 2009). Não há indicações de que o alumínio apresente toxicidade aguda por via oral, apesar de ampla

ocorrência em alimentos, água potável e medicamentos. Não há indicação de carcinogenicidade para o alumínio.

- g) Alcalinidade: A alcalinidade indica a quantidade de íons na água que reagem para neutralizar os íons hidrogênio, sendo, portanto, uma medição da capacidade da água de neutralizar os ácidos, servindo, assim, para expressar a capacidade de tamponamento da água, isto é, sua condição de resistir a mudanças do pH (FUNASA, 2014).
- h) Acidez: A acidez, em contraposição à alcalinidade, mede a capacidade da água em resistir às mudanças de pH causadas pelas bases. Ela decorre, fundamentalmente, da presença de gás carbônico livre na água (FUNASA, 2014).
- i) Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO): A DBO de uma água é a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica por decomposição microbiana aeróbia para uma forma inorgânica estável. É considerada como a quantidade de oxigênio consumido durante um determinado período de tempo, numa temperatura de incubação específica (CETESB, 2009). Os maiores aumentos em termos de DBO, num corpo d'água, são provocados por despejos de origem predominantemente orgânica.
- j) Demanda Química de Oxigênio (DQO): É a quantidade de oxigênio necessária para oxidação da matéria orgânica de uma amostra por meio de um agente químico, como o dicromato de potássio, sendo que os valores da DQO normalmente são maiores que os da DBO, uma vez que o aumento da concentração de DQO num corpo d'água deve-se principalmente à despejos de origem industrial (CETESB, 2009).

Em linhas gerais a diferença entre DBO e DQO está no tipo de matéria orgânica estabilizada, onde a DBO refere-se exclusivamente à matéria orgânica mineralizada por atividade dos microrganismos, e a DQO engloba, também, a estabilização da matéria orgânica ocorrida por processos químicos. Além disso, a relação entre os valores de DQO e DBO indica a parcela de matéria orgânica que pode ser estabilizada por via biológica (FUNASA, 2014).

4 RESÍDUOS SÓLIDOS AGROINDUSTRIAIS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da NBR 10.004 (2004), define resíduos sólidos como:

Resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola e serviços de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistema de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornam inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas economicamente inviáveis em face de melhor tecnologia disponível.

A classificação de resíduos sólidos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, a fim de classificar os riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública (ABNT, 2004). Assim, o atual modelo social de exploração dos recursos naturais para a produção de bens de consumo, faz com que os rejeitos, antes entendidos como meros subprodutos do sistema produtivo, sejam hoje os responsáveis por graves problemas de degradação ambiental (FLORES et al., 2014).

A destinação inadequada dos resíduos sólidos, além dos riscos que causam à saúde pública, provoca ainda a poluição do solo, do subsolo, e do ar (liberação de gases que aumentam o efeito estufa e gera maus odores); a proliferação de vetores de doenças; além da contaminação das águas superficiais e subterrâneas através do chorume (FREITAS, 2016).

Analizando toda a cadeia geradora de resíduos sólidos (fabricação do produto, venda uso e descarte), verifica-se que a produção e o descarte final são os que exigem maior cuidado. No uso de matérias primas surgem os materiais provenientes do desperdício e das sobras dos processos, e, posteriormente, no processo de descarte, os fatores ambientais passam a exigir atenção e melhorias em processos de gestão voltadas às questões ambientais (FREITAS, 2016).

Apesar de toda a preocupação que se deve ter com a qualidade ambiental e com a saúde pública, em muitos locais não se realiza um correto manejo dos resíduos, observando um desenvolvimento não sustentável nos municípios, pois os métodos para a coleta, transporte e depósito dos resíduos sólidos não consideram as consequências que o mau uso e o tratamento inadequado destes podem acarretar ao meio ambiente em um futuro próximo (SIMONETTO; LÖBLER, 2013).

Entre diversos tipos de resíduos gerados pelo homem, temos os resíduos industriais que são aqueles originados das atividades dos diversos ramos da indústria, tais como: metalúrgica, química, petroquímica, alimentícia, papel e celulose, etc... (KRAEMER, 2005).

Os resíduos industriais são bastante variados, podendo ser representado por cinzas, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papel, cama de aviário, lodo de esgoto, resíduo de incubatório, lodo físico-químico, tripa celulósica, dejetos de suíno, graxa preta, resíduos de varrição, resíduos de restaurante, dentre outros.

Para evitar os impactos ambientais que podem ser provocados pelas indústrias é necessário que estas unidades identifiquem os tipos de resíduos que estão sendo gerados e busquem alternativas economicamente viáveis e corretas para tratamento, destinação e, posteriormente, a disposição final destes (MENDONÇA et al., 2013).

Além disso, os resíduos possuem potencial para a criação de um mercado lucrativo e de oportunidades para a população que vive à margem da sociedade, mas, para que tais oportunidades ocorram, é necessário o desenvolvimento de mecanismos para o tratamento de resíduos de forma lucrativa e, concomitantemente, visando à proteção do meio ambiente, aumentando a vida útil dos aterros sanitários, a preservação de recursos naturais, e, por fim, economia de energia na produção de novos produtos (SANTOS et al., 2014).

No que diz respeito aos resíduos industriais, as leis de controle da poluição estimularam o desenvolvimento de métodos de tratamento e disposição final desses detritos, como o armazenamento em poços profundos, em tanques ou containers, incineração, em “aterros controlados”, em aterros específicos para resíduos perigosos, lançamento ou queima no mar, e reciclagem. Mas para todos esses métodos há um potencial de contaminação dos recursos naturais, uma vez que sempre existe o risco de vazamento para o sítio em que esteja armazenado. Há pelo mundo grandes quantidades de resíduos industriais perigosos armazenados, aguardando um destino ou tratamento apropriado, havendo ainda os sítios contaminados com estes resíduos, para os quais a limpeza implicará em grandes investimentos (SCHALCH et al., 2002).

Atualmente, são diretrizes prioritárias de políticas de gestão de resíduos: evitar ou, nos casos em que não for possível, diminuir a produção de resíduos; reutilizar ou, quando não for possível, reciclar resíduos; utilizar a energia contida nos resíduos; tornar inertes os resíduos, antes da disposição final.

4.2 RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS AGROINDUSTRIAIS

Os resíduos sólidos orgânicos possuem como característica o alto percentual de sólidos voláteis, que através dos processos de degradação, podem ser convertidos em outras formas de energia. As agroindústrias são grandes produtoras de resíduos orgânicos, visto que na cadeia produtiva, praticamente todo o insumo tem origem animal ou vegetal.

A produção intensiva da suinocultura e a constante busca pelo incremento de produtividade contribuem de forma decisiva no aumento da poluição por dejetos, o que têm causado desequilíbrios ecológicos em diversos municípios brasileiros (ABIPECS, 2014). Um suíno em criação intensiva produz em média 2,35 kg de resíduo sólido por dia e, quando se considera o dejetos sólido associado à urina, esse total se eleva para 5,80 kg. Esses efluentes apresentam alta carga orgânica, que podem chegar aos lençóis freáticos e causar poluição dos recursos hídricos da região em torno das granjas quando não são tratados adequadamente (CARVALHO; SOUZA; SOTO, 2015).

Com o aumento nos índices produtivos, cresce também a quantidade de resíduos provenientes do abate de aves, que acabam tornando-se motivo de preocupação para a indústria da carne (ABPA, 2016). Os resíduos sólidos provenientes dos abatedouros de aves são compostos principalmente por fragmentos de vísceras, músculo, gordura, osso, sangue e penas, que, além de apresentarem alto potencial poluente, também podem ser fonte de transmissão de doenças (SUNADA et al., 2015). A produção de efluente também é bastante elevada e relativamente proporcional ao consumo de água potável, sendo originado principalmente em seções distintas: sangria, escaldagem, depenagem, escaldagem dos pés, evisceração e pré-resfriamento (SUNADA, 2011).

No abatedouro de aves, os resíduos apresentam uma composição de aproximadamente 710 a 4.633 mg de O_2 /litro de efluente para a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), 1.400 a 11.118 mg de O_2 /litro de efluente para a demanda química de oxigênio (DQO) e 780 a 10.090 mg de O_2 /litro de efluente para a DQO na fração em suspensão, respectivamente (JOHNS, 1995).

Os incubatórios são parte da unidade produtiva responsável pela entrada de ovos férteis, fornecendo condições adequadas para seu desenvolvimento biológico (FARIA et al., 2014). Após 21 dias, os pintos nascem e são examinados, classificados e vacinados, com um dia de vida os pintinhos seguem para as granjas dos integrados (produtores rurais parceiros), que criam as aves, sob supervisão veterinária e técnica da empresa, até o ponto de abate.

Durante o processo de incubação ocorrem perdas, que constituem os resíduos de incubatório, compostos por cascas de ovos, ovos não eclodidos, pintinhos mal-formados e natimortos (MATTER, 2011).

Os resíduos produzidos no incubatório são extremamente putrescíveis, tornando-se um excelente substrato para microrganismos, mas ao mesmo tempo, representam grande perigo a biosseguridade do incubatório, necessitando, portanto, de rápida eliminação.

Os componentes presentes na casca dos ovos, principalmente carbonato de cálcio, dificulta a degradação deste material se tornando um entrave do processo de descarte. Assim, a mistura deste material com outros resíduos, pode transformá-lo em um substrato passível de ser aproveitado pelo processo de biodigestão anaeróbia e compostagem (MATTER, 2011).

A graxaria é uma seção específica, podendo estar ou não anexa aos frigoríficos e abatedouros. Sua principal atividade é a reciclagem dos restos de animais abatidos, tendo como matéria prima os ossos, aparas de carnes, sangue, glândulas, e órgãos condenados pela inspeção sanitária, bem como resíduos de carcaças após a desossa, em açougues, abatedouros e frigoríficos, gerando sebo ou gordura animal (para a indústria de sabões/sabonetes e para a indústria química) e farinhas de carne e ossos (para rações animais). Algumas graxarias também produzem sebo ou gordura e/ou o chamado adubo organomineral a partir de ossos (PACHECO, 2006).

Os resíduos produzidos pelas graxarias resultam do uso de água para a limpeza de pisos, paredes e de equipamentos, sistemas de resfriamento de compressores e condensadores, geração de vapor, lavagem dos caminhões/veículos que transportam matérias-primas, subprodutos e resíduos (PACHECO, 2006).

4.3 PANORAMA NACIONAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS AGROINDUSTRIAIS

O marco de uma forte articulação institucional que envolve os três entes federados (União, Estados e Municípios) gerou, após longos vinte e um anos de discussões no Congresso Nacional, a aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), um dos instrumentos mais importantes da Política Nacional, ao que identifica os problemas dos diversos tipos de resíduos gerados, unindo, assim, o setor produtivo e a sociedade em geral na busca de soluções para os problemas graves e de grande abrangência territorial que comprometem a qualidade de vida dos brasileiros (BRASIL, 2010).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos aponta que, na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: 1) não geração; 2) redução; 3) reutilização; 4) reciclagem; 5) tratamento dos resíduos sólidos; e 6) disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos; podendo ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e, também, ambiental, levando-se em conta a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental (BRASIL, 2010).

Diante do exposto, muitos estudos estão sendo realizados visando à redução do volume de lixo que é lançado diariamente no meio ambiente, a fim de apresentar o correto aproveitamento de vários tipos de resíduos oriundos das atividades industriais do setor produtivo (SANTOS et al., 2014). Isso vem de encontro com as metas apresentadas dentro do plano de Política Nacional de Resíduos Sólidos, favorecidas com recursos da União, para a obtenção de seu aval ou para o acesso a recursos administrados, direta ou indiretamente, por entidade federal, quando destinados a ações e programas de interesse dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

4.4 POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS

Uma maneira tradicional de recuperação direta de energia a partir dos resíduos é através da incineração. O calor, assim gerado, pode ser utilizado para aquecimento direto, em processo de vaporização ou para gerar eletricidade (GALVÃO et al., 2015).

Incineração e processamento biológico são duas formas de aproveitamento energético dos resíduos sólidos que reduzem drasticamente os custos necessários para operação, e também a destinação final em aterros sanitários.

A tecnologia de aproveitamento do gás de lixo (GDL), ou biogás produzido nos aterros, é o uso energético mais simples dos resíduos sólidos urbanos através da decomposição anaeróbica da fração orgânica, por ação de micro-organismos que transformam os resíduos em substâncias mais estáveis, como dióxido de carbono (CO_2), água, gás metano (CH_4), gás sulfídrico (H_2S), mercaptanas e outros componentes minerais. O objetivo de um projeto de aproveitamento energético de GDL é convertê-lo em alguma forma de energia útil, como eletricidade, vapor, combustível para caldeiras ou fogões, combustível veicular, ou, ainda, para abastecer gasodutos com gás de qualidade (BRASIL, 2015).

Assim, sua simples queima representa um benefício ambiental perante sua emissão, mas o seu aproveitamento energético também evita a emissão decorrente da queima de

combustível fóssil que poderia ser utilizado para ofertar a mesma quantidade de energia que o biogás.

Nas indústrias, a incineração também pode ser fonte de energia para caldeiras e estas gerarem energia ou vapor para o funcionamento de diversos segmentos industriais. Por exemplo, o material usado para o estabelecimento da cama de aviário também pode ser aproveitado como fonte de energia, por meio da biodigestão, através da fermentação, degradando a matéria orgânica, transformando-a em subprodutos, como o biogás (BADO, 2006). Estes subprodutos possuem alto valor como fontes energéticas.

As principais propriedades segundo Silva e Moraes (2008) para a caracterização energética de biomassas em geral são: Poder Calorífico – PC (kJ/kg), densidade (kg/m³) e composição, onde o poder calorífico é classificado em dois tipos: Poder Calorífico Superior (PCS): Poder Calorífico em base seca, onde não se leva em consideração o calor associado à condensação da água formada em reação com o hidrogênio contido na biomassa; e Poder Calorífico Inferior (PCI), que é calculado subtraindo do PCS o calor associado com a condensação do vapor de água formado pela reação do hidrogênio contido na biomassa. Durante a determinação do PCI deve-se levar em consideração o teor de umidade presente.

Por exemplo, de acordo com Souza et al. (2012), a casca de arroz apresenta um PCS de 14,67 MJ/kg, a média do resíduo de soja referente ao PCS é de 16,47 MJ/kg.

Segundo Vieira (2012), tanto o PCS como o PCI de uma determinada biomassa é a propriedade físico-química mais importante a considerar para a escolha de um processo termoquímico.

O poder calorífico dos produtos pode apresentar variação, pois existem substâncias como a água e o dióxido de carbono que diminuem este potencial. Por exemplo, com a concentração do gás metano presente no biogás o poder calorífico pode variar entre 17,82 e 28,51 MJ/m³, porém se houver a purificação da mistura gasosa estes valores podem variar entre 35,78 e 39,85 MJ/m³, sendo considerado como uma promissora fonte alternativa de energia (OLIVEIRA, 2009).

4.5 QUEIMA DE RESÍDUOS PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA

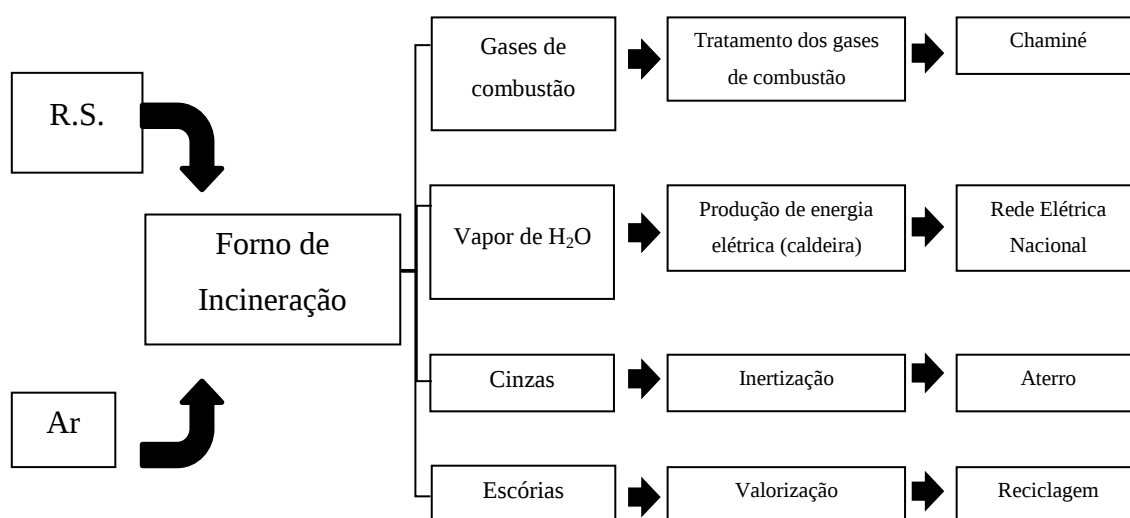
Nos primórdios da civilização humana, a incineração de resíduos era realizada de maneira rudimentar para fins de limpeza de áreas para cultivo e para a eliminação de rejeitos, mas foi se modernizando ao longo dos anos e vem sendo aplicada hoje principalmente como forma de tratamento de resíduos (PAVAN, 2010).

Adotado por países na década de 1960, o método de incineração de resíduos, foi implantado para suprir a falta de infraestruturas de tratamentos e eliminação dos resíduos sólidos gerados. Embora não sendo atualmente o método preferido para valorização energética de resíduos, não deixa de ser um destino final responsável por grande parte dos resíduos valorizados (SANTOS, 2013).

O processo de geração de energia elétrica pela incineração dos resíduos sólidos é semelhante ao de usinas térmicas convencionais, cuja capacidade de geração depende diretamente do poder calorífico do material incinerado (BRASIL, 2005).

Na Figura 10 é apresentado o diagrama do processo de incineração dos resíduos sólidos com valorização energética, no qual pode ser observado que, a partir dos resíduos sólidos, resultam vários subprodutos que são aproveitados em diversos fins como, por exemplo, o vapor de água que através da caldeira produz energia elétrica que pode ir para a rede elétrica nacional.

Figura 10. Diagrama do processo de incineração de resíduos sólidos.



Fonte: Adaptado de Santos (2013).

5 BIOGÁS

5.1 ASPECTOS HISTÓRICOS

Segundo Classen; Lier; Stamrs (1999), a descoberta do Biogás é datada do ano de 1667. Já em 1776, Alessandro Volta, reconheceu a presença de metano no gás dos pântanos. No século XIX o aluno de Louis Pasteur, Ulysse Grayon, realizou a fermentação anaeróbia (decomposição sem a presença de oxigênio) de uma mistura de estrume e água, a 35°C, obtendo então 100 litros de gás/m³ de matéria. O biogás é produzido por fenômenos naturais existentes em várias partes do planeta, como em pântanos, oceanos e água doce e por fontes antropogênicas, como em plantações de arroz alagado, tratamento de efluentes, aterro sanitário, etc... (CASSINI, 2003).

A tecnologia da digestão anaeróbia foi trazida para o Brasil com a crise do petróleo na década de 70. Diversos programas de difusão foram implantados no nordeste, porém os resultados não foram satisfatórios e os benefícios obtidos não foram suficientes para dar continuidade ao programa (COELHO et al., 2001).

Segundo Pecora (2006), com a crise do petróleo, diversos países buscaram alternativas para a sua substituição, acarretando em um grande impulso na recuperação de energia gerada pelos processos de tratamento anaeróbio. Porém, as soluções para os problemas de desenvolvimento devem ser apropriadas às necessidades, capacidades e recursos humanos, recursos financeiros e culturais.

Até a década de 1990 o biogás era visto como um subproduto sem muito valor comercial. Essa situação mudou atualmente devido à preocupação com a questão ambiental e às instabilidades na produção de combustíveis fósseis (PINHEIRO, 2004). Atualmente, o biogás se mostrou uma alternativa de combustível viável em substituição ao petróleo em determinadas aplicações (AVELLAR; CARROCCI; SILVEIRA, 2000).

5.2 PROPRIEDADES QUÍMICAS DO BIOGÁS

De acordo com Metcalf & Eddy (2003), o biogás é composto, na sua maior parte, de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), contendo, ainda, traços de vapor de água (H₂O vapor), gás sulfídrico (H₂S), nitrogênio (N₂), oxigênio (O₂), hidrogênio (H₂), monóxido de

carbono (CO), amônia (NH₃), mercaptanas e outros gases. A Tabela 2 apresenta algumas características típicas e composição do biogás.

Tabela 2. Características e composição típicas do biogás.

Parâmetro	Gás de Aterro ¹	Biogás ²
Poder calorífico inferior (MJ/m ³)	16	23
Metano (% vol)	35-65	53-70
Dióxido de carbono (% vol)	15-50	30-47
Nitrogênio (% vol)	5-40%	-
Ácido sulfídrico (ppm)	<100	<1000
Amônia (ppm)	5	<100
¹ Produzido a partir da matéria orgânica de resíduos sólidos urbanos de aterro sanitários		
² Produzido a partir da matéria orgânica de resíduos agropecuários em reatores anaeróbicos		

Fonte: Persson; Jönsson e Wellinger (2006).

Geralmente, a mistura gasosa é saturada com vapor d'água e pode conter material particulado e compostos orgânicos com silício (siloxanas). Ainda, de acordo com o tipo de material orgânico que origina o biogás, este pode também ser denominado de gás de aterros, gás do lixo, gás de esgotos, gás de lodo, gás de dejetos, dentre outros (ZANETTE, 2009).

A presença de substâncias não combustíveis no biogás, como a água e o dióxido de carbono prejudica o processo de queima, tornando-o menos eficiente. Estas substâncias absorvem parte da energia gerada. Além destes, também há a presença de gás sulfídrico (H₂S) que pode acarretar corrosão, diminuindo tanto o rendimento, quanto à vida útil do motor térmico utilizado. A maioria dos digestores anaeróbios produz um biogás que contém entre 0,3 a 2% de H₂S, observando-se também a presença de traços de nitrogênio e hidrogênio (COELHO et al., 2004).

5.3 MICROBIOLOGIA E BIOQUÍMICA NA FORMAÇÃO DO BIOGÁS

Um reator de digestão anaeróbia pode ser considerado como um ecossistema onde diversos grupos de microrganismos trabalham conjuntamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas. O consórcio de microrganismos ativos no tratamento anaeróbio, para a remoção de matéria orgânica, realiza um processo complexo envolvendo muitas espécies de bactérias, atuando de forma simbiótica, evidenciando algumas etapas intermediárias.

As reações bioquímicas principais que ocorrem no processo caracterizam os grupos de microrganismos predominantes, podendo o mesmo ser dividido em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, conforme descreve Speece (1995).

a) Hidrólise

O processo de degradação da matéria orgânica inicia-se com a hidrólise do material presente no efluente, gerando-se compostos mais simples, que possam ser assimilados pelos microrganismos, esta etapa também é chamada de despolimerização. Os principais fatores que influenciam na hidrólise, segundo Lettinga et al. (1980), são: pH, temperatura, tempo de retenção, tamanho e distribuição das partículas. A aplicabilidade da digestão anaeróbia ficou por algum tempo restrita à degradação de compostos mais simples como açúcares, carboidratos e ácidos graxos voláteis, não sendo tratados por este processo efluentes que continham gorduras (lipídios), devido principalmente a problemas de arraste de biomassa (massa de microrganismos) e as substâncias intermediárias formadas durante a hidrólise, que podem ser tóxicas aos microrganismos.

b) Acidogênese

Esta etapa acontece quando a matéria orgânica dissolvida é biodegradada até ácidos graxos voláteis (ácido acético, propiônico, butírico), hidrogênio, dióxido de carbono e álcoois por uma população de bactérias heterogêneas. Dentre os microrganismos presentes nesta etapa estão as bactérias acidogênicas que são as predominantes e, ainda, fungos e protozoários.

c) Acetogênese

Nesta etapa os produtos formados anteriormente são oxidados para acetato, hidrogênio e gás carbônico, com o objetivo de fornecer substrato apropriado aos microrganismos metanogênicos. Em geral isto acontece a partir de dois mecanismos, sendo o primeiro a acetogênese de hidrogenação, que produz ácido acético como um só produto final de fermentação de hexose ou de CO_2 e H_2 , e o segundo, chamado de acetogênese de desidrogenação, que converte os ácidos graxos de cadeia curta e longa em ácido acético por um grupo de bactérias acetogênicas. De todos os produtos produzidos por estes microrganismos somente o acetato e o hidrogênio podem ser assimilados pelas bactérias metanogênicas.

d) Metanogênese

O processo de degradação do substrato é finalizado por esta etapa, que consiste na transformação dos produtos formados (com um ou dois átomos) anteriormente em metano e dióxido de carbono. A formação do metano é executada por dois mecanismos distintos, conforme descreve Speece (1995). O primeiro mecanismo consiste na formação do metano a partir do CO_2 e H_2 , pelos microorganismos do grupo de *arqueas hidrogenotróficas*. O segundo mecanismo consiste na produção do metano a partir do acetato, realizada pelos microorganismos do grupo de *arqueas acetoclásticas*, que se desenvolvem muito lentamente com um tempo de duplicação mínimo de 2 a 3 dias e influenciam no pH do sistema pela eliminação do ácido acético e formação de dióxido de carbono, além do mais são responsáveis pela maioria do metano produzido. Como produtos finais deste processo serão formados o gás sulfídrico e gás carbônico (CHERNICHARO, 1997). Segundo Lettinga et al. (1980), os microorganismos responsáveis pela redução dos compostos de enxofre são chamados de bactérias redutoras de sulfato. Pela existência da possibilidade de ambos os grupos de bactérias, redutoras de sulfato e metanogênicas, poderem utilizar o acetato como fonte de carbono e energia para o seu crescimento, em sistemas onde estes dois grupos estejam presentes, a competição entre eles pode afetar o desempenho do sistema de tratamento (BHATTACHARYA; UBEROI; DRONAMRAJU., 1996).

5.4 SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

O potencial de produção de biogás no Brasil a partir das diferentes fontes de matéria orgânica é de aproximadamente 50 milhões de m^3 de metano por dia, superior à produção nacional de gás natural disponibilizada para o consumo, de cerca de 35 milhões de m^3/dia (ANP, 2009). Embora seja expressivo, este potencial deve ser avaliado de maneira conservadora, uma vez que representa apenas o potencial de produção de biogás, e não do seu aproveitamento como fonte de energia. (ZANETTE, 2009).

A decomposição de matéria orgânica com fins de produção de energia pode ser realizada de duas formas principais, as quais serão destacadas a seguir.

5.4.1. Biodigestão

O biodigestor é um equipamento usado para a produção de biogás (mistura de gases produzidos por bactérias anaeróbias ao decompor a matéria orgânica). A matéria orgânica que alimenta o biodigestor possui um alto potencial energético e pode ser proveniente dos resíduos e subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais, produção animal (esterco e urina), e da atividade humana (fezes, urina e lixo doméstico). O biodigestor pode ser operado de maneira contínua ou intermitente. O contínuo é o mais difundido no Brasil, por apresentar melhor adaptação à maioria das biomassas, enquanto o intermitente é específico para biomassas de decomposição lenta (COLDEBELLA, 2006).

A biodigestão pode reduzir o potencial poluidor de alguns resíduos orgânicos, normalizando a DBO e o pH, e, ao mesmo tempo, produzir gás metano e um fertilizante como resíduo. Uma tecnologia bastante utilizada neste caso é o UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), reator anaeróbico de fluxo ascendente em camadas de lodos, o qual pode tratar efluentes com mais de 30 kg DQO/m³ reator/dia, sendo por este motivo uma boa opção tecnológica para o Brasil (CORTEZ; FREIRE; ROSILLO-CALLE, 1998).

O reator UASB consiste basicamente de um tanque, constituído de um compartimento digestor localizado na base, contendo o leito de lodo biológico e no topo está localizado um decantador precedido por um sistema de separação de gás. O afluente a ser tratado distribui-se uniformemente na base do reator, passando pela camada de lodo, na qual a matéria orgânica é transformada em biogás. O gás produzido é impedido pelos defletores de dirigir-se ao sedimentador, entrando apenas em algumas regiões do reator. A porção de lodo que atinge o decantador é separada, retornando à base do reator e o afluente é uniformemente retirado da superfície do mesmo. (POMPERMAYER; PAULA JUNIOR, 2000).

A captura de biogás gerado pelos dejetos de suínos, através de biodigestores, também representa uma excelente opção tecnológica nos sistemas de produção e tratamento dos dejetos suínos (KONZEN, 2005). Sistemas biointegrados podem maximizar o aproveitamento energético dos dejetos gerados pela suinocultura, dentro do próprio agroecossistema, reduzindo a contaminação exterior dos recursos naturais (ANGONESE et al., 2006). A Figura 11 mostra um biodigestor instalado no município de Rio Verde (GO) para tratamento de dejetos de suínos.

Figura 11. Biodigestor instalado no município de Rio Verde (GO).



Fonte: Próprio autor.

5.4.2 Co-digestão de Resíduos Sólidos

A co-digestão é um processo de digestão simultânea de uma mistura homogênea, com a presença de dois ou mais substratos. A digestão anaeróbica era tida como o único possível tratamento, no entanto, inicialmente possuía como meio de ação um único tipo de substrato, entretanto, atualmente têm sido misturados outros substratos a fim de promover a biodigestão em conjunto, melhorando a qualidade do produto final e o tempo de reação (WU, 2007).

A digestão anaeróbica envolve um conjunto muito complexo de reações bioquímicas e físico-químicas, necessitando de uma vasta compreensão da ciência subjacente como pré-requisito para o bom funcionamento da digestão anaeróbica, no qual o material orgânico é convertido em biogás, por meio da digestão na ausência de oxigênio, sendo, assim, a consequência de uma série de interações metabólicas entre vários grupos de microrganismos (KANGLE et al., 2012). Este tipo de tratamento oferece a possibilidade de utilizar reatores anaeróbicos existentes nas estações de tratamento de águas residuais, com modificações menores e alguns requisitos adicionais.

A co-digestão anaeróbica é uma alternativa promissora para o tratamento de materiais oriundos da cadeia produtiva avícola. Nesse processo são misturados e tratados ao mesmo tempo dois ou mais resíduos, visando acelerar o processo de degradação de ambos os resíduos, ou de algum que especificamente seja mais resistente. Dessa forma, o processo combina a valorização do resíduo gerado em produção de energia limpa, além de apresentar

uma excelente taxa de degradabilidade do material que pode vir a ser utilizado como biofertilizante (GOMES, 2014).

Geralmente co-digestão é aplicada nos processos úmidos, tais como reatores de tanque agitado continuamente, onde o substrato é normalmente diluído, de tal forma que apresente teor de sólidos secos de cerca de 8 a 15%. A co-digestão presta-se no sentido de gerar misturas de resíduos industriais bem controladas, principalmente em relação aos resíduos da indústria de alimentos, resíduos lácteos, dentre outros, juntamente com esterco ou lodo de esgoto, onde, em estações de tratamento de águas residuais os digestores são geralmente de grandes dimensões e faz-se necessário a adição de co-substratos ajudando a produzir mais gás e, conseqüentemente, mais energia elétrica em único custo adicional marginal (BRAUN; HOLM-NIELSEN; SEADI, 2002). A eletricidade extra produzida permite cobrir as necessidades energéticas de tratamento de águas residuais a um custo razoável, tornando todo o processo de baixo custo, comparado aos valores necessários para tratamento e devolução desses dejetos a natureza.

5.5 Purificação do Biogás

A presença de substâncias não combustíveis no biogás, como a água e o dióxido de carbono prejudica o processo de queima, tornando-a menos eficiente. Estas substâncias absorvem parte de energia gerada. Além destes, também há a presença de gás sulfídrico (H_2S) que pode acarretar corrosão, diminuindo tanto o rendimento, quanto à vida útil do motor térmico utilizado.

A maioria dos digestores anaeróbios produz um biogás que contém entre 0,3 e 2% de H_2S , observando-se também a presença de traços de nitrogênio e hidrogênio (COELHO et al., 2004). Dependendo da aplicação é recomendável a purificação do biogás removendo o H_2S , CO_2 , e a umidade. As práticas mais utilizadas são:

a) Remoção de umidade: Pode ser feita com glicóis, com sílica gel, dentre outros, dependendo da utilização final do gás será estabelecido o grau de umidade aceitável.

b) Remoção de Dióxido de Carbono (CO_2): Existe uma variedade de processos de remoção do CO_2 presente no gás natural utilizado pelas indústrias petroquímicas. Diferentes mecanismos conseguem separar alguns constituintes do gás, entre eles: absorção física e química, adsorção em uma superfície contínua, separação por membranas, separação criogênica e separação a partir de conversão química (reações químicas).

Bhattacharya et al. (1996) desenvolveram um sistema de lavagem de gás onde se obteve 100% de metano puro, mas depende de fatores como: dimensões da torre de lavagem, pressão de gás, composição de biogás, vazão e pureza da água utilizada. Khapre (1989) projetou um tipo contínuo de lavador contracorrente com uma taxa de fluxo do gás de 1,8 m³/h e taxas de entrada de água de 0,465 m³/h, reduzindo continuamente o CO₂ de 30% na entrada para 2% na saída (em volume).

c) Remoção de Gás Sulfídrico (H₂S): Para remoção de Gás Sulfídrico utiliza-se métodos biológicos, químicos ou físicos, cuja escolha depende do biogás a ser tratado. O tratamento pode ser realizado no próprio gasômetro ou em sistema próprio para este fim. Dentre as principais técnicas de tratamento estão: Microaeração, dessulfurização físico-química por dosagem de ferro (óxido de ferro, hidróxido de ferro ou óxido de zinco), biodessulfurização em reator de biopercolação, dessulfurização com soda cáustica, adsorção por carvão ativado, dentre outras (BRASIL, 2015).

6 CARACTERIZAÇÃO, FORMULAÇÃO E METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do presente estudo, inicialmente foram verificadas as contribuições científicas existentes em suas devidas áreas de abrangência. Foi necessário identificar os parâmetros que influenciam o aproveitamento energético dos resíduos orgânicos industriais, bem como as tecnologias existentes para aproveitamento desta biomassa.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DA UNIDADE AGROINDUSTRIAL EM ESTUDO

A área de estudo delimitada para a realização desta pesquisa foi uma unidade agroindustrial de grande porte, localizada no município de Rio Verde (GO), pertencente à região do sudoeste goiano, e que tem como atividade principal o abate de aves, suínos e produção de produtos industrializados.

A área total do empreendimento é de aproximadamente 200 hectares, sendo parte principal do complexo industrial:

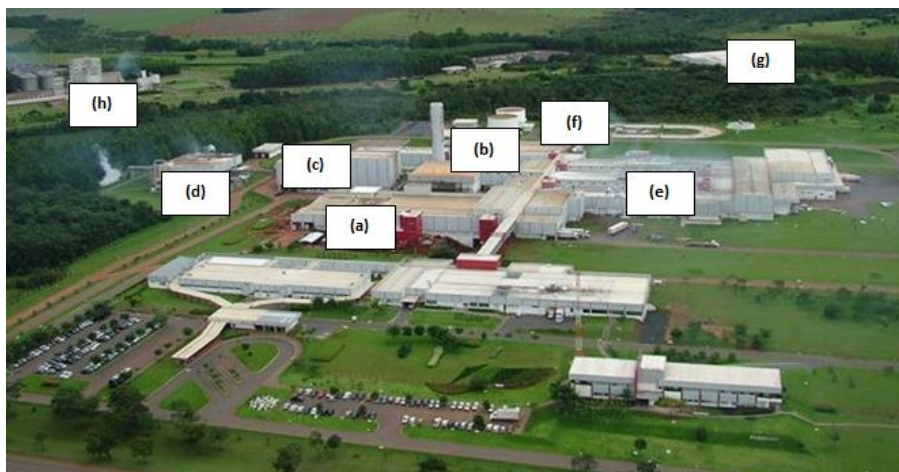
- Frigorífico de abate de aves e suínos;
- Fábrica de produtos industrializados;
- Fábrica de Subprodutos;
- Incubatório;
- Granjas de Matrizes;
- Fábrica de Rações;
- Unidades de apoio e utilidades (caldeiras, sala de máquinas de refrigeração, unidades satélites de refrigeração, estação de tratamento de efluentes, estação de tratamento de água, dentre outras).

Trata-se de um dos maiores complexos industriais do país em seu segmento, contando com aproximadamente 8.000 funcionários, sendo localizado em um município com aproximadamente 200.000 habitantes, o que demonstra a importância desta unidade para a economia local.

Os alimentos produzidos são comercializados no mercado interno e grande parte exportada para países da Europa e da Ásia, contando com uma produção mensal que supera 40.000 toneladas de produtos acabados. Atualmente são abatidos em média 410.000 frangos/dia e aproximadamente 5.700 suínos/dia. O incubatório é responsável por distribuir ao campo, em média 700.000 pintos/dia, e a fábrica de rações produz em média 90.000 toneladas

de rações por mês. A Figura 12 mostra o complexo industrial com a indicação de alguns pontos principais, como: (a) Frigorífico de abate de aves; (b) Frigorífico de abate de suínos; (c) Sistemas de geração de vapor; (d) Graxaria e tratamento primário de efluentes; (e) Fábrica de produtos industrializados; (f) Tratamento secundário de efluentes; (g) Incubatório; (h) Fábrica de rações.

Figura 12. Vista aérea do complexo industrial.



Fonte: Próprio autor.

6.2 BANCO DE DADOS RELACIONADOS À GERAÇÃO DE RESÍDUOS E EFLUENTES LÍQUIDOS

Os dados de geração de resíduos foram extraídos do sistema integrado SAP R/3, que é composto por um conjunto de módulos de *softwares* integrados interativamente. Este é o sistema oficial de gestão desta unidade produtora.

A transação escolhida foi a tela “Z23e”, que é denominada “Relatório de Gestão de Resíduos”, sendo a ferramenta oficial utilizada pela equipe de gestão ambiental da unidade produtiva para produzir o Inventário Anual de Resíduos Gerados. A Figura 13 mostra o *layout* desta tela de gestão.

Para a obtenção dos dados quantitativos e qualitativos da geração de efluentes líquidos, foram consultadas as planilhas de gestão da supervisão do tratamento de água e efluentes líquidos, as quais apresentam detalhadamente o monitoramento e histórico destes sistemas.

O cálculo do potencial de geração de energia a partir dos resíduos industriais orgânicos e efluentes líquidos teve como base os dados consolidados de geração compreendendo o período de Julho de 2015 a Junho de 2016.

6.3 SISTEMAS DE GERAÇÃO E EQUACIONAMENTO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA

No que diz respeito aos efluentes líquidos, o potencial energético foi calculado apenas a partir dos efluentes líquidos pós flotores primários, visto que estes possuem menor teor de gordura, e que estão preparados para serem digeridos na etapa biológica, sem a presença de agentes inibidores que possam prejudicar este processo. Os resíduos orgânicos e subprodutos do processo produtivo que possuem alto valor agregado, como vísceras, sangue, pena, dentre outros, não fizeram parte do escopo deste trabalho, pois existem alternativas economicamente mais atrativas do que o uso para fins energéticos.

A Tabela 3 demonstra os resíduos orgânicos que são gerados neste complexo industrial e que foram estudados detalhadamente para obtenção do potencial energético. A escolha das técnicas de tratamento foi baseada na viabilidade de outros estudos técnicos, como exemplo, a utilização de biodigestores por Zanin et al. (2010), o potencial de geração de energia a partir da cama de frango por Ferrarez et al. (2011), a digestão anaeróbia do resíduo de incubatório por Matter (2011), a co-digestão anaeróbia de tripa celulósica e dejetos de suínos por Konrad et al. (2014), a decomposição anaeróbia de lodo biológico por Barros (2015) e os artigos publicados pela Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental pelo programa Probiogás.

Tabela 3. Processos de tratamento escolhidos para os resíduos orgânicos e efluentes líquidos agroindustriais.

Resíduo	Cenário Atual	Tratamento Escolhido para Geração de Energia
Efluente líquido pós-flotador primário	Tratamento Secundário (Lodos Ativados)	Digestão anaeróbia em Reator UASB
Lodo flotado (Físico-Químico)	Queima em caldeira	Queima em caldeira
Lodo Biológico (Etapa Secundária)	Compostagem	Co-digestão anaeróbia
Tripa celulósica	Queima em caldeira	Co-digestão anaeróbia
Resíduo de incubatório	Compostagem	Co-digestão anaeróbia
Cama de frango	Compostagem	Co-digestão anaeróbia
Dejetos de suínos provenientes de pocilgas e lavadores de caminhões	Tratamento Secundário	Co-digestão anaeróbia
Resíduo de restaurante	Compostagem	Co-digestão anaeróbia
Resíduo de varrição fábrica de rações	Compostagem	Co-digestão anaeróbia

Fonte: Próprio autor.

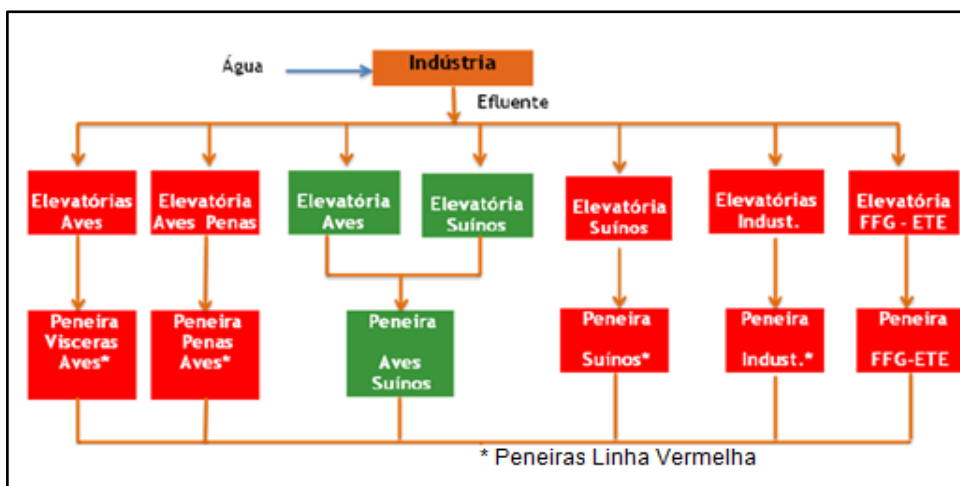
6.3.1 Efluente Líquido Pós-Flotador

O efluente do frigorífico é composto pelas águas residuárias dos banheiros, lavanderias e refeitório, que seguem diretamente para o tratamento secundário (biológico), e pelas águas residuárias do processo industrial, que são constituídas de duas linhas: vermelha (rica em sangue, gordura, etc...) e verde (pocilgas, lavagem de gaiolas, lavagem de caminhões, recepção e pendura de aves, etc...).

O efluente do frigorífico é conduzido até a estação de tratamento pelas estações elevatórias, onde o mesmo é bombeado para as peneiras estáticas, que são equipamentos

responsáveis pela retenção dos sólidos grosseiros (partículas maiores). Estes sólidos são destinados para a fabricação de farinhas e gorduras, portanto não fazem parte do escopo deste projeto. A Figura 14 mostra o fluxograma das elevatórias existentes no complexo industrial.

Figura 14. Fluxograma das estações elevatórias presentes no complexo industrial.



Fonte: Próprio autor.

Após passar pelo sistema de peneiramento, o efluente segue para os tanques de equalização, onde são misturados e encaminhados para o sistema de flotação físico-química a ar dissolvido. Nesta etapa são adicionadas soluções de sulfato férrico para realizar o processo de coagulação e de polímero aniônico para auxiliar na floculação.

O processo de flotação tem por objetivo principal reduzir a carga orgânica e o teor de óleos e graxas proveniente do frigorífico para que o tratamento biológico possa oxidar a carga orgânica remanescente. O efluente, após passar pelo sistema de flotação físico-química, recebe o nome de efluente pós-flotador.

A Tabela 4 apresenta as principais características do efluente pós-flotador gerado neste complexo industrial.

Tabela 4. Principais características do efluente líquido pós-flotador.

Parâmetro	Concentração	Unidade
DBO _{5,20}	190,00	mg/l
DQO	500,00	mg/l
Nitrogênio Total	45,00	mg/l
Nitrogênio Amoniacal	35,00	mg/l
Fósforo Total	5,00	mg/l
pH	6,10	-
Alcalinidade Total	180,00	mgCaCO ₃ /l

Fonte: Próprio autor.

Para o cálculo do potencial de energia do efluente pós-flotador foi considerado o tratamento anaeróbio em reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), onde a eficiência adotada foi de 80% para remoção de DQO (Demanda Química de Oxigênio). O equivalente de geração de metano adotado foi de 0,25 kgCH₄/kgDQO_{removida} (IPCC, 2006).

A carga poluidora mensal do efluente é calculada através da seguinte equação:

$$Cp = C_{DQO} \cdot Q \quad (1)$$

onde:

Cp : Carga poluidora mensal (kgDQO/mês);

C_{DQO} : Concentração de DQO média do efluente (mg/l);

Q : Volume de efluente gerado mensalmente (m³/mês).

A quantidade mensal de metano gerado neste processo foi calculada através da seguinte equação:

$$Q_{Metano} = Cp \cdot Ef \cdot Eq \quad (2)$$

onde:

Q_{metano} : Total de metano produzido por mês através do efluente líquido pós-flotador (m³/mês);

Cp : Carga poluidora do efluente líquido pós-flotador (kg DQO/mês);

Ef: Eficiência do reator UASB na remoção da DQO (adotado 0,8, conforme IPCC, 2006);

Eq: Conversão de kgDQO/mês para kgCH₄/mês (adotado 0,25, conforme IPCC, 2006).

Conforme Brasil (2015), o percentual de metano presente no biogás gerado em reatores UASB é de 70%. Portanto, a vazão de biogás é calculada através da seguinte equação:

$$Q_{Biogás} = \frac{Q_{Metano}}{M_{biogás}} \quad (3)$$

onde:

$Q_{biogás}$: Total de biogás gerado no mês (m³/mês);

Q_{metano} : Total de metano produzido por mês através do efluente líquido pós-flotador (m³/mês);

$M_{biogás}$: Percentual de Metano presente no biogás a partir da decomposição anaeróbia de efluente líquido – 70%.

6.3.2 Lodo Flotado

Durante o processo de flotação físico-química, os sólidos suspensos no meio líquido são flotados através da ação de coagulantes químicos e de microbolhas adicionadas nos flotadores que são geradas pelos tanques de saturação, formando, então, o lodo flotado. O lodo flotado é gerado em quatro unidades de flotação, que possuem capacidade de tratamento média de 200 m³/h.

Posteriormente, o lodo flotado é aquecido a uma temperatura média de 95°C e encaminhado para as centrífugas bifásicas, cujo objetivo é separar em duas fases os líquidos (clarificado) e os sólidos em suspensão (contendo gordura) presentes no lodo. Esta separação só é possível devido à alta rotatividade gerada pelo equipamento que forma em seu interior uma força centrífuga que alinhada a diferença de densidade do produto, facilita a separação de fases. A Figura 15 mostra o lodo flotado após o processo de centrifugação bifásica.

Figura 15. Lodo flotado após processo de separação bifásica.



Fonte: Próprio autor.

Quando comparado a outros tipos de resíduos produzidos no complexo industrial, o lodo flotado apresenta alto poder calorífico inferior, o que viabiliza o seu aproveitamento através da queima direta para produção de energia. A Tabela 5 apresenta um comparativo das características físico-químicas entre o lodo flotado e o cavaco de eucalipto que são utilizados como fonte de energia neste complexo agroindustrial.

Tabela 5. Comparativo dos resultados físico-químicos do lodo flotado e do cavaco de eucalipto.

Parâmetro	Cavaco de Eucalipto	Lodo Flotado	Unidade
Cinzas	0,53	7,03	%massa, base seca
Material Volátil	64,48	58,73	%massa, base seca
Carbono Fixo	34,99	34,24	%massa, base seca
Umidade	19,97	60,13	%, base úmida
Carbono	46,64	55,62	%massa, base seca
Hidrogênio	6,82	7,11	%massa, base seca
Nitrogênio	0,61	8,18	%massa, base seca
Enxofre	0,00	0,38	%massa, base seca
Cloretos	0,00	0,03	%massa, base seca
Fósforo	<0,001	0,78	%massa, base seca
PCI	3.841,40	6.154,67	kcal/kg, base seca
PCS	4.112,45	6.530,60	kcal/kg, base seca

Nota: Análises realizadas por laboratório terceirizado

Fonte: Elaboração do autor.

Portanto, o poder calorífico inferior à base seca adotado para o lodo flotado foi de 6.154,67 kcal/kg e a umidade de 60%.

6.3.3 Lodo Biológico

Mesmo passando pelas etapas primárias de tratamento, o efluente ainda contém sólidos dissolvidos, que precisam ser removidos através da degradação realizada pelas bactérias. Com isso, aplica-se o tratamento secundário de efluentes, sendo adotado pelo complexo o sistema de Lodos Ativados.

O sistema de Lodo Ativado é formado por um valo de oxidação de aproximadamente 13.000 m³, que possui distribuído em sua superfície, em torno de 32 aeradores, cujo objetivo é fornecer oxigênio para que as bactérias façam a degradação da matéria orgânica presente no efluente. A Figura 16 mostra o valo de oxidação presente no complexo industrial e que faz parte do sistema de Lodo Ativado.

Figura 16. Valo de oxidação - Sistema de lodo ativado.



Fonte: Próprio autor.

Após passar pelo valo de oxidação, o efluente é conduzido para 3 unidades de decantação, que têm como objetivo a separação dos sólidos devido a força gravitacional. Como a massa ocupada pelas bactérias possui maior peso, estas tendem a ocupar o fundo do decantador. Então, essa massa tem dois caminhos: ser bombeada de volta para o valo de oxidação, ou, caso seja necessário, pode ser descartada na forma de lodo biológico.

O lodo biológico é formado pelas bactérias em excesso no valo de oxidação e que precisam ser descartadas. Após o descarte, como ainda possui um alto teor de umidade, o

mesmo é tratado em 3 unidades de centrifugação bifásica. A Tabela 6 apresenta as características físico-químicas do lodo biológico após a centrifugação bifásica.

Tabela 6. Características físico-químicas do lodo biológico.

Parâmetro	Valor/Quantidade	Unidade
Nitrogênio Total	8.831	mg/kg
Nitrogênio Amoniacal	195	mg/kg
Magnésio	2.607	mg/kg
Sódio	3.626	mg/kg
Potássio	3.148	mg/kg
Coliformes Fecais	256	NMP/g ST
Sólidos Voláteis	80.000	mg/kg
Fósforo	19.589	mg/kg
Umidade	89,0	%
pH	7,7	-

Nota: Análises realizadas por laboratório terceirizado

Fonte: Elaboração do autor.

Para o lodo biológico, foi considerado o processo de co-digestão anaeróbia para geração de biogás, onde a eficiência de degradação utilizada foi de 60,7%, e a taxa de geração de metano utilizada foi de 0,19 m³CH₄/kg_{STV}destruidos (LEITE, 2011). O percentual de metano em relação ao biogás foi de 62% (BRASIL, 2015).

Para o cálculo de geração de metano a partir digestão anaeróbia do biogás é utilizada a seguinte equação:

$$Q_{Met.Lodo} = V_{Lodo} \cdot TX_{Metano} \cdot E \cdot C_{SV} \quad (4)$$

onde:

$Q_{met.lodo}$: Volume de metano gerado por mês através do lodo biológico (m³/mês);

V_{Lodo} : Quantidade de lodo biológico gerado por mês (kg/mês);

TX_{metano} : Taxa de geração de metano (0,19 m³CH₄/kg_{STV}destruidos, segundo Leite, 2011);

E : Eficiência do sistema de tratamento anaeróbio (60,7%, segundo Leite, 2011);

C_{SV} : Sólidos Voláteis presentes no lodo (adotado 0,08 conforme análises internas).

O volume de biogás gerado é calculado através da seguinte equação:

$$Q_{bio.lodo} = \frac{Q_{met.lodo}}{M_{Lodo}} \quad (5)$$

onde:

$Q_{bio.lodo}$: Volume de biogás gerado a partir do lodo biológico;

$Q_{met.lodo}$: Volume de metano gerado por mês através do lodo biológico;

M_{lodo} : Proporção de gás metano presente no biogás a partir da co-digestão do lodo biológico – 62%.

6.3.5 Resíduo de Incubatório

O complexo industrial conta com um incubatório com capacidade de produção de aproximadamente 700.000 pintinhos/dia. Após o nascimento e com apenas 1 dia de vida, os pintinhos são enviados para as granjas terceiras para que cresçam até o momento ideal do abate.

No incubatório, após o recebimento dos ovos, os mesmos permanecem por aproximadamente 19 dias nas incubadoras, tendo a temperatura e a umidade controlada constantemente. Neste período todos os ovos são vacinados manualmente e, posteriormente, enviados para os nascedouros.

Nos nascedouros, os ovos permanecem por aproximadamente 2 dias até o momento do nascimento. Posteriormente, após o nascimento, os pintinhos são enviados para o setor de sexagem, que tem como objetivo a separação dos pintinhos pelo sexo.

Durante todo este ciclo, são gerados resíduos formados basicamente de: ovos inférteis, restos de casca de ovo e penugem, embriões mortos, pintinhos abatidos, fluidos dos ovos, e outros resíduos retidos através do peneiramento das águas residuais provenientes da limpeza e desinfecção dos equipamentos e das áreas de processamento. A Figura 17 mostra o resíduo de incubatório durante o descarte.

Figura 17. Resíduo de incubatório durante o descarte.



Fonte: Próprio autor.

Para cálculo do potencial de geração de biogás proveniente da decomposição do resíduo de incubatório, é utilizada a seguinte equação:

$$Q_{biogás} = V_{incub} \cdot F_{incub} \quad (6)$$

onde:

$Q_{biogás}$: Volume de biogás produzido por mês através do resíduo de incubatório ($m^3/mês$);

V_{incub} : Quantidade de resíduo gerado por mês (t/mês);

F_{incub} : Fator de conversão de tonelada de resíduo para m^3 de biogás por mês (adotado $55,73 m^3$ de biogás para cada tonelada de resíduo submetido a decomposição anaeróbia, segundo Matter, 2011).

O volume de CH_4 gerado mensalmente é calculado através da seguinte equação:

$$Q_{metano} = Q_{biogás} \cdot M_{CH_4} \quad (7)$$

onde:

Q_{metano} : Quantidade de metano produzido por mês ($m^3/mês$);

$Q_{biogás}$: Volume de biogás gerado mensalmente ($m^3/mês$);

M_{CH_4} : Concentração de metano presente no biogás (adotado 0,7233, segundo Matter, 2011).

6.3.6 Tripa Celulósica

Os resíduos de tripa celulósica são envoltórios de celulose gerados no processo de produção de salsichas, que neste complexo industrial está situado na Gerência de Produtos Industrializados. As tripas são permeáveis ao processo de defumação e ao vapor d'água, o que viabiliza a utilização das mesmas nesta etapa de produção.

As principais funções destas tripas no processo produtivo são: Barreira para microrganismos, permeabilidade a fumaça, permeabilidade à umidade e alta resistência à ruptura. Elas são constituídas basicamente de 65% de celulose, 18% de gordura, 15% de umidade e 2% de óleo comestível.

Estas tripas são utilizadas no setor de embutimento de salsicha e, após passar pelos processos de cozimento, tingimento e resfriamento, as mesmas são retiradas para que o produto seja embalado e enviado para os sistemas de congelamento ou resfriamento. A Figura 18 mostra a tripa celulósica após ser retirada da salsicha.

Figura 18. Tripa celulósica após ser retirada da salsicha.



Fonte: Próprio autor.

Para o cálculo da geração de biogás pela digestão anaeróbia da tripa celulósica, utilizou-se a Eq. (6). O fator de conversão adotado foi de 36,77 m³ biogás por m³ de tripa celulósica e percentual de metano em relação ao biogás foi de 54,6%, conforme Konrad et al. (2014). A quantidade mensal de metano gerada é calculada através da Eq. (7).

6.3.7 Cama de Frango

A cama de frango é utilizada para forração de aviários, sendo que neste estudo foi considerada apenas a cama de frango gerada nas propriedades da empresa em estudo, pois a destinação da que é gerada nas propriedades integradas é de responsabilidade de terceiros.

No cálculo da geração de biogás a partir da cama de frango, foram utilizados os dados referenciados por Ferrarez (2011), onde a taxa de geração de biogás é de 0,54 m³ de biogás por kg de matéria seca. A umidade considerada para a cama de frango foi de 23%. O percentual de metano presente no biogás foi de 60%. Para os cálculos de geração de biogás e metano são utilizadas as Eqs. (6) e (7), respectivamente.

6.3.8 Dejetos de Suínos

Durante o processo de recepção dos suínos, os mesmos aguardam nas pocilgas até o momento ideal para o abate. Durante este período, são gerados efluentes devido as excreções dos suínos e, também, devido a necessidade de se fazer a aspersão de água sobre os mesmos como forma de conforto térmico.

Na higienização dos caminhões transportadores de suínos, também são gerados efluentes líquidos com alto teor de matéria orgânica, que, se submetidos ao tratamento anaeróbio, produzem um alto teor de biogás. A Figura 19 mostra o efluente gerado durante o processo de higienização dos caminhões transportadores de suínos.

Figura 19. Efluente gerado durante a higienização dos caminhões transportadores de suínos.



Fonte: Próprio autor.

Como dejetos de suínos, foram considerados os efluentes gerados no processo de higienização dos caminhões de suínos e os gerados nas áreas de pocilgas.

No cálculo da geração de biogás a partir dos dejetos de suínos são utilizadas as Eqs. (1) a (3).

6.3.9 Resíduos de Varrição da Fábrica de Rações

Durante o processo de varrição da fábrica de rações, são gerados subprodutos que não devem ser enviados para alimentação animal, denominados resíduos de varrição. No processo de secagem do milho e sorgo também são gerados resíduos que não devem ser reaproveitados. A Figura 20 demonstra o resíduo de varrição gerado na fábrica de rações.

Figura 20. Resíduos de varrição da fábrica de rações.



Fonte: Próprio autor.

No cálculo da geração de biogás a partir dos resíduos de varrição, são utilizados os dados de Brasil (2015). O fator de conversão do metano é de 267 m³ de CH₄ por tonelada de substrato. O percentual de metano adotado em relação ao biogás foi de 60%. As Eqs. (6) e (7) são utilizadas para o cálculo do biogás e do metano gerados, respectivamente.

6.3.10 Resíduos de Restaurante

O restaurante industrial da empresa é responsável por servir mais de 7.000 refeições por dia, o que gera diversos tipos de resíduos orgânicos devido ao desperdício, dentre outros fatores. A Figura 21 mostra o resíduo de restaurante durante o processo de descarte.

Figura 21. Resíduo de restaurante.



Fonte: Próprio autor.

No cálculo da geração de biogás a partir dos resíduos do restaurante, são utilizados os dados de Brasil (2015), sendo a taxa de geração de metano de 850 m³ de CH₄ por tonelada de sólido e o percentual de metano adotado em relação ao biogás de 55%. As Eqs. (6) e (7) são utilizadas para o cálculo do biogás e metano gerados, respectivamente.

6.3.11 Equivalência Energética dos Resíduos

6.3.11.1 Resíduos Submetidos a Queima Direta em Caldeira

Para o cálculo do potencial energético dos resíduos submetidos à queima direta em caldeira, foi utilizada a seguinte equação:

$$Pot_{energético} = Res_{BS} \cdot PCI_{BS} \quad (8)$$

onde:

$Pot_{energético}$: Potencial Energético (GJ/mês);

Res_{BS} : Quantidade de resíduos submetidos à queima direta em caldeira em Base Seca (kg/mês);

PCI : Poder Calorífico Inferior do lodo flotado em Base Seca (25,77 MJ/kg).

O rendimento térmico da caldeira foi calculado através do método direto, conforme segue:

$$N_{md} = \frac{mv \cdot (hv - ha)}{mc \cdot PC} \cdot 100 \quad (9)$$

onde:

- N_{md} : Rendimento pelo método direto (%);
- mv : Vazão mássica de vapor (kg/s);
- h_v : Entalpia do vapor (kJ/kg);
- h_a : Entalpia da água de entrada (kJ/kg);
- mc : Vazão mássica do combustível (kg/s);
- PC : Poder calorífico do combustível (kJ/kg).

6.3.11.2 Resíduos Submetidos ao Processo de Decomposição Anaeróbia

Para os resíduos submetidos ao processo de decomposição anaeróbia, pode ser utilizada a seguinte equação para o cálculo do potencial energético:

$$Pot_{energ.} = Q_{Metano} \cdot PCI_{Metano} \quad (10)$$

onde:

- $Pot_{energ.}$: Potencial Energético (GJ/mês);
- Q_{Metano} : Volume de metano gerado no mês pelo resíduo (m³/mês);
- PCI_{Metano} : Poder Calorífico Inferior do metano (35,9 MJ/m³).

Para o cálculo do potencial térmico pode ser utilizada a seguinte equação:

$$Pot_{térmico} = Q_{CH_4} \cdot PCI \cdot n \quad (11)$$

onde:

- $Pot_{térmico}$: Potencial térmico (MJ/mês);
- Q_{CH_4} : Volume de metano gerado no mês pelo resíduo (m³/mês);
- PCI : Poder Calorífico Inferior do metano (35,9 MJ/Nm³);
- n : Rendimento do equipamento para conversão térmica - 42% para motores de combustão interna do ciclo Diesel, segundo Brasil (2015).

Para o cálculo do potencial elétrico gerado a partir do resíduo, é utilizada a seguinte equação:

$$Pot_{elétrico} = Q_{CH_4} \cdot PCI \cdot n \quad (12)$$

onde:

$Pot_{elétrico}$: Potencial elétrico (kWh/mês);

Q_{CH_4} : Volume de metano gerado no mês pelo resíduo (m³/mês);

PCI : Poder Calorífico Inferior do CH₄ (kWh/Nm³);

n : Rendimento do conjunto moto gerador para conversão elétrica - 38% para motores de combustão interna do ciclo diesel, segundo Brasil (2015).

6.4 CÁLCULO DE VIABILIDADE ECONÔMICA E RETORNO DE INVESTIMENTO

O cálculo de viabilidade econômica do projeto foi realizado através da utilização da Planilha de Avaliação Econômica Padrão (PAEP). Esta planilha é a ferramenta oficial para cálculos de retorno de investimento na unidade agroindustrial em estudo e, por questão de sigilo da empresa, não pode ser detalhada neste trabalho como se gostaria.

No entanto, vale destacar que foram consideradas as seguintes variáveis nos cálculos:

- **VPL**: O Valor Presente Líquido serve para calcular a atratividade de um determinado investimento a partir das condições iniciais e retornos futuros (fluxos de caixa), conforme segue:

$$VPL = \left[\frac{FC_1}{(1+i)^1} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \frac{FC_3}{(1+i)^3} + \frac{FC_4}{(1+i)^4} + \frac{FC_n}{(1+i)^n} \right] - FC_0 \quad (13)$$

onde:

FC_0 : Fluxo de caixa verificado no momento zero, podendo ser um investimento, empréstimo ou financiamento;

FC_j : Fluxos de caixa previstos no projeto para cada intervalo de tempo;

i : Taxa de desconto;

n : Período de tempo.

- **MTIR**: A Taxa Interna de Retorno Modificada tem como objetivo estabelecer o retorno de um investimento, o qual contempla a aplicação dos fluxos excedentes por uma taxa de aplicação, bem como os déficits de fluxos por uma taxa de captação, conforme segue:

$$MTIR = \left(\frac{-VPL(taxa\ r, \text{valores [positivos]}) * (1 + taxa\ r)^n}{VPL(taxa\ f, \text{valores [negativos]}) * (1 + taxa\ f)} \right)^{\frac{1}{n-1}} - 1 \quad (14)$$

onde:

MTIR: Taxa Interna de Retorno Modificada;

VPL: Valor Presente Líquido;

taxa r: Taxa para reinvestimento;

taxa f: Taxa para financiamento;

n: número de fluxos de caixa.

- *Payback* descontado: Representa o período exato de tempo necessário para a empresa recuperar o investimento inicial de um projeto, considerando as entradas de caixa. Através deste cálculo pode ser reduzido o custo de capital.

$$Payback = Ano_{-} + \frac{FC_1}{FC_r} \quad (15)$$

onde:

Ano₋: Ano anterior à recuperação do capital

FC₁: Fluxo de caixa acumulado descontado no ano da recuperação.

FC_r: Fluxo de caixa descontado acumulado antes da recuperação em módulo

Os custos dos equipamentos e a mão de obra para instalação foram obtidos através de orçamentos de fornecedores que possuem alta credibilidade no mercado.

O consumo de recursos como energia elétrica e vapor, utilizados nos cálculos de retorno de investimento, foi obtido através dos dados consolidados do setor de Eficiência Energética do Complexo Industrial.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 POTENCIAL DE ENERGIA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS E EFLUENTES LÍQUIDOS

Neste capítulo serão descritos os principais resultados relacionados ao potencial equivalente de geração de energia a partir dos resíduos orgânicos agroindustriais na unidade estudada. Vale destacar que, para efeito da conversão energética, foi considerada a utilização de um conjunto moto gerador, cuja eficiência térmica seja de 42% e eficiência elétrica de 38%, de acordo com Brasil (2015).

7.1.1 Potencial Energético do Efluente Líquido Pós-Flotador

Os complexos agroindustriais se destacam por ter em seus efluentes líquidos altos valores de cargas poluidoras. A Tabela 7 apresenta os valores médios mensais de DQO, volume de efluente gerado, bem como o potencial de geração de biogás a partir da decomposição anaeróbia dos efluentes líquidos.

Tabela 7. Potencial de produção de biogás e metano a partir dos efluentes líquidos pós flotadores.

	Jul/15	Ago/15	Set/15	Out/15	Nov/15	Dez/15
DQO médio mensal (mg/l)	814	512	456	679	631	591
Volume de Efluente Gerado (m ³ /mês)	346.964	328.010	330.614	371.241	312.399	292.199
Carga Poluidora (kg DQO/mês)	282.429	167.941	150.760	252.073	197.124	172.690
Potencial de Geração de Metano (m ³ /mês)	78.891	46.911	42.112	70.411	55.063	48.237
Potencial de Geração de Biogás (m ³ /mês)	112.701	67.016	60.160	100.588	78.661	68.910
	Jan/16	Fev/16	Mar/16	Jun/16	Média do Período	
DQO médio mensal (mg/l)	599	683	786	548	630	
Volume de Efluente Gerado (m ³ /mês)	278.859	248.932	337.970	346.986	319.417	
Carga Poluidora (kg DQO/mês)	167.037	170.021	265.644	190.148	201.587	
Potencial de Geração de Metano (m ³ /mês)	46.658	47.492	74.202	53.114	56.309	
Potencial de Geração de Biogás (m ³ /mês)	66.655	67.845	106.003	75.877	80.442	

Fonte: Próprio autor.

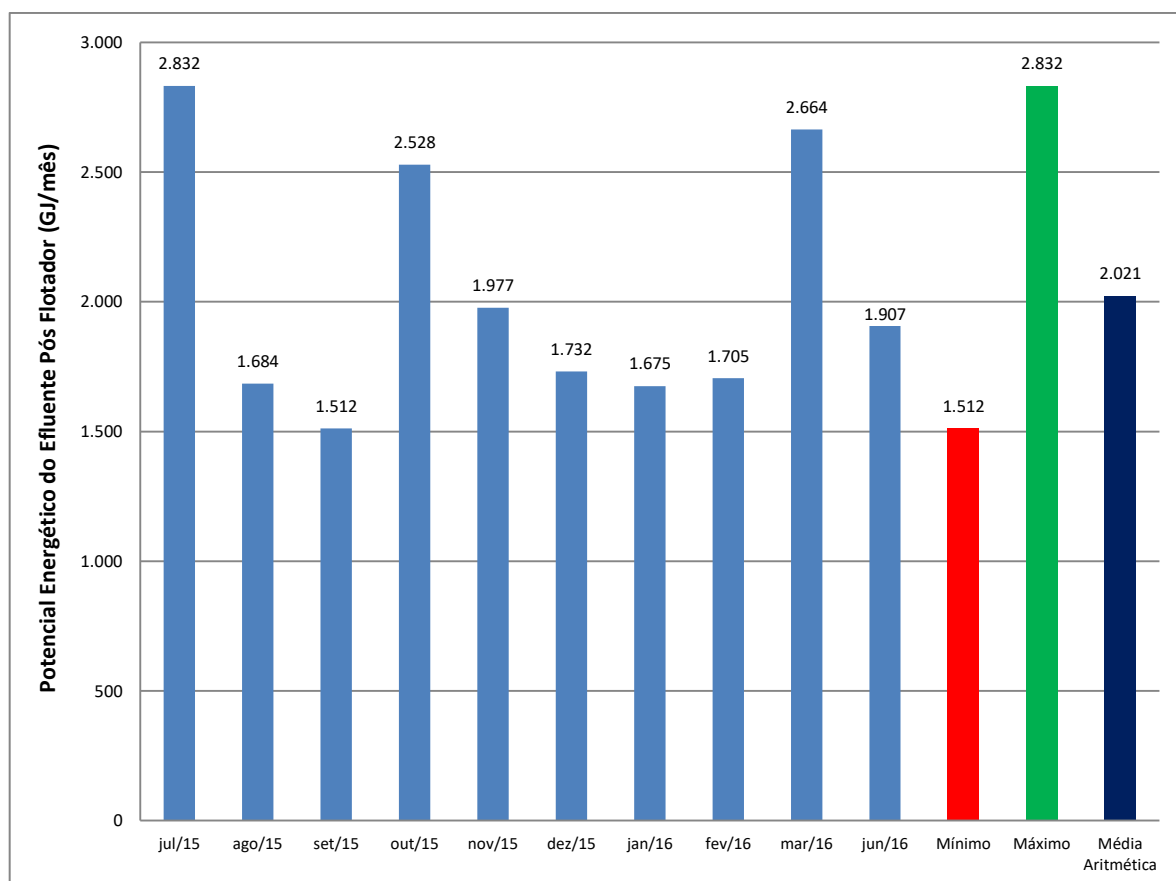
Os meses de Abril e Maio do ano de 2016 foram desconsiderados dos cálculos, pois o Frigorífico de Aves funcionou parcialmente neste período, e a maior parte da carga orgânica provém desta unidade produtora.

A DQO média de saída dos flotaadores foi de aproximadamente 630 mg/l, porém, com a realização de trabalhos voltados à conscientização dos funcionários que desenvolvem suas atividades na parte interna da fábrica, este valor pode ser reduzido significativamente, já que terá uma menor quantidade de sólidos presentes nos efluentes líquidos.

Outro fator importante é a eficiência do sistema de flotação físico-química, pois, caso esteja abaixo do recomendado (em torno de 90%), pode gerar altos valores de DQO na saída do sistema, prejudicando as próximas etapas do tratamento.

A Figura 22 mostra, respectivamente, o potencial energético dos efluentes líquidos pós-flotadores em uma unidade de tratamento UASB, muito comumente utilizada para decomposição anaeróbia de efluentes líquidos. O potencial energético médio foi de 2.021 GJ/mês, podendo ocorrer variações de 1.512 GJ/mês a 2.832 GJ/mês, isso devido à variação da carga poluidora do efluente líquido que apresenta inconstância ao longo do ano.

Figura 22. Potencial energético do efluente pós-flotador.



Fonte: Próprio autor.

Em um sistema de geração de energia, o potencial médio de geração de energia térmica seria de aproximadamente 849.029 MJ/mês e o potencial médio de geração de energia elétrica de 213.975 kWh/mês, de acordo com as considerações de conversão feitas.

7.1.2 Potencial de Energia do Lodo Biológico

O volume de lodo biológico está diretamente relacionado à necessidade de descartar bactérias do sistema de lodo ativado na unidade secundária de tratamento de efluentes. Mesmo passando pelas centrifugas, o teor de umidade deste resíduo continua elevado.

São geradas em média 257,18 toneladas por mês de lodo biológico, o que pode representar aproximadamente 3.827 m³/mês de biogás e 2.373 m³/mês de gás metano, visto que o percentual do gás metano em relação ao volume de biogás gerado é de 62%. No mês de Julho de 2016 ocorreu o maior volume de descarte lodo, aproximadamente 400 toneladas, isto devido à concentração de Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) presentes na lagoa de aeração (lodo ativado) estar elevado, necessitando aumentar o volume de descarte.

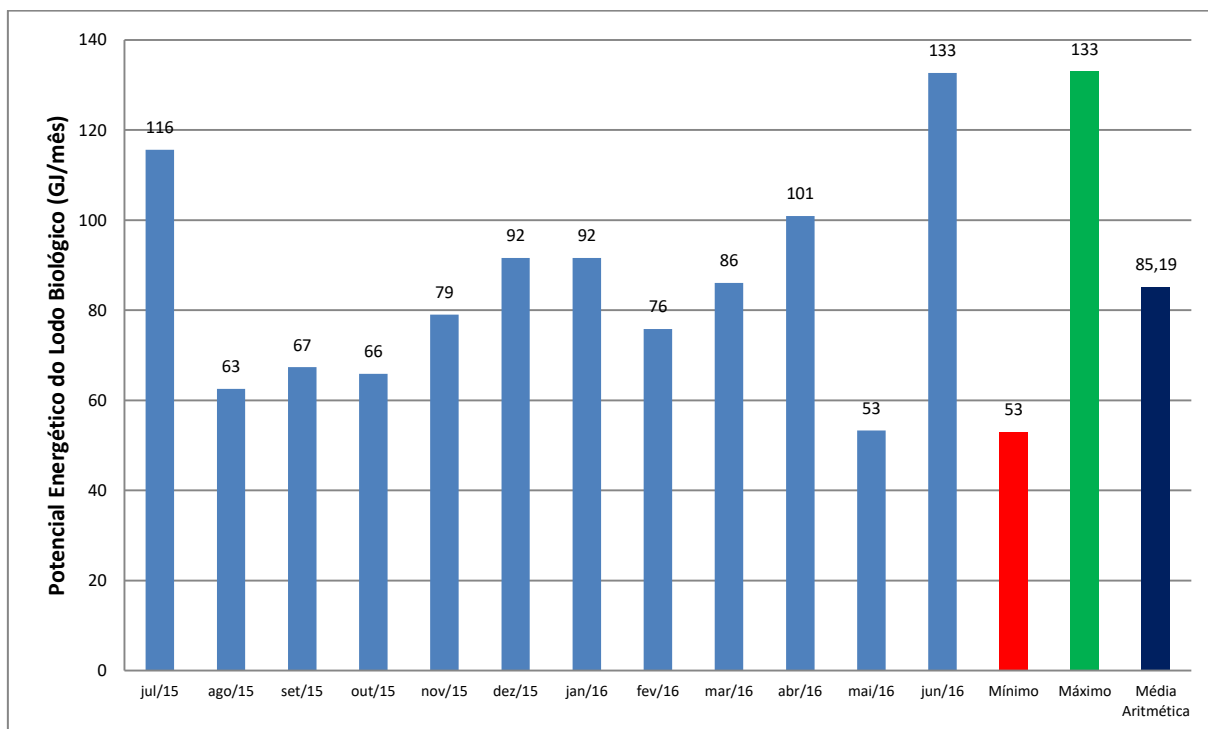
Na Tabela 8 estão descritos os principais resultados relacionados ao potencial de geração de gás metano e biogás a partir da co-digestão do lodo biológico. Na Figura 23 é apresentado o potencial energético mensal a partir da co-digestão do lodo biológico.

Tabela 8. Potencial mensal de geração de biogás e gás metano a partir do lodo biológico.

	Jul/15	Ago/15	Set/15	Out/15	Nov/15	Dez/15	
Quantidade de Lodo Biológico (t/mês)	348,92	188,79	203,26	198,95	238,53	276,57	
Potencial de Geração de Biogás (m ³ /mês)	5.192	2.809	3.025	2.961	3.550	4.116	
Potencial de Geração de Metano (m ³ /mês)	3.219	1.742	1.875	1.836	2.201	2.552	
	Jan/16	Fev/16	Mar/16	Abr/16	Mai/16	Jun/16	Média
Quantidade de Lodo Biológico (t/mês)	276,57	228,82	259,84	304,64	160,81	400,5	257,18
Potencial de Geração de Biogás (m ³ /mês)	4.116	3.405	3.867	4.533	2.393	5.960	3.827
Potencial de Geração de Metano (m ³ /mês)	2.552	2.111	2.397	2.811	1.484	3.695	2.373

Fonte: Próprio autor.

Figura 23. Potencial energético do lodo biológico.



Fonte: Próprio autor.

O aproveitamento energético médio em um conjunto moto gerador seria de 35 GJ/mês para geração de energia térmica e 9.017 kWh/mês para geração de energia elétrica, de acordo com as considerações de conversão feitas.

7.1.3 Potencial de Energia do Lodo Flotado

O maior volume de resíduo orgânico gerado no complexo industrial é o Lodo Flotado (Físico-Químico), visto que aproximadamente 90% da carga poluidora gerada pelo frigorífico fica concentrada no mesmo. Quanto maior a eficiência do sistema de flotação físico-químico, maior será o volume de lodo flotado gerado.

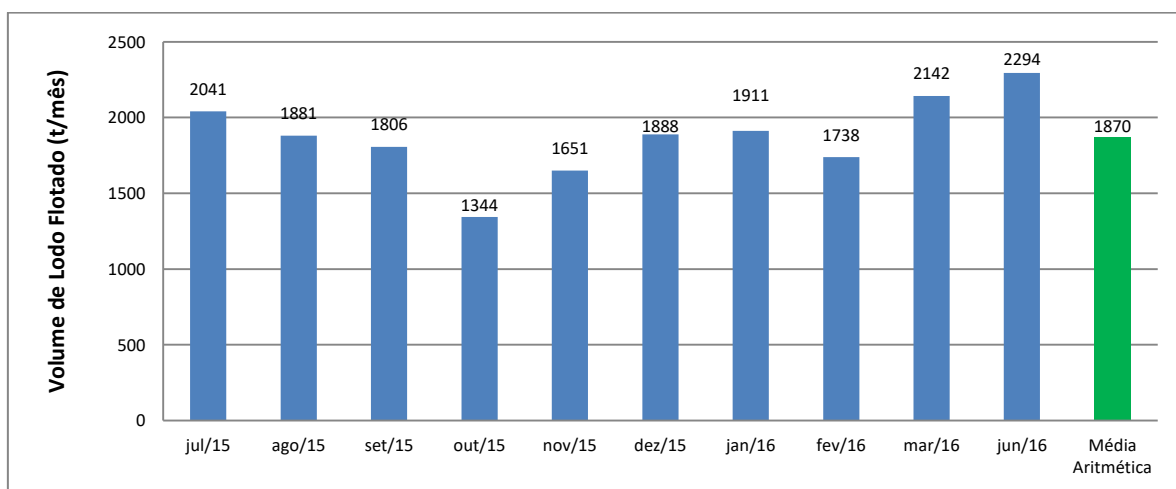
A quantidade média de lodo flotado é de 1.870 t/mês, sendo que nos cálculos foram desconsiderados os meses de Abril e Maio de 2016, visto que o frigorífico de aves estava trabalhando com a produção reduzida.

Como o lodo flotado possui alto poder calorífico e umidade em torno de 60% foi considerada a queima direta do mesmo, procedimento este que já é realizado pelo Complexo Industrial. O potencial de geração de energia térmica é de 12.912.255 MJ/mês, considerando a eficiência térmica da caldeira instalada na unidade em estudo. Para a geração de energia

elétrica, o equivalente é de aproximadamente 2.890.803 kWh/mês, considerando uma caldeira de baixo rendimento no sistema de cogeração.

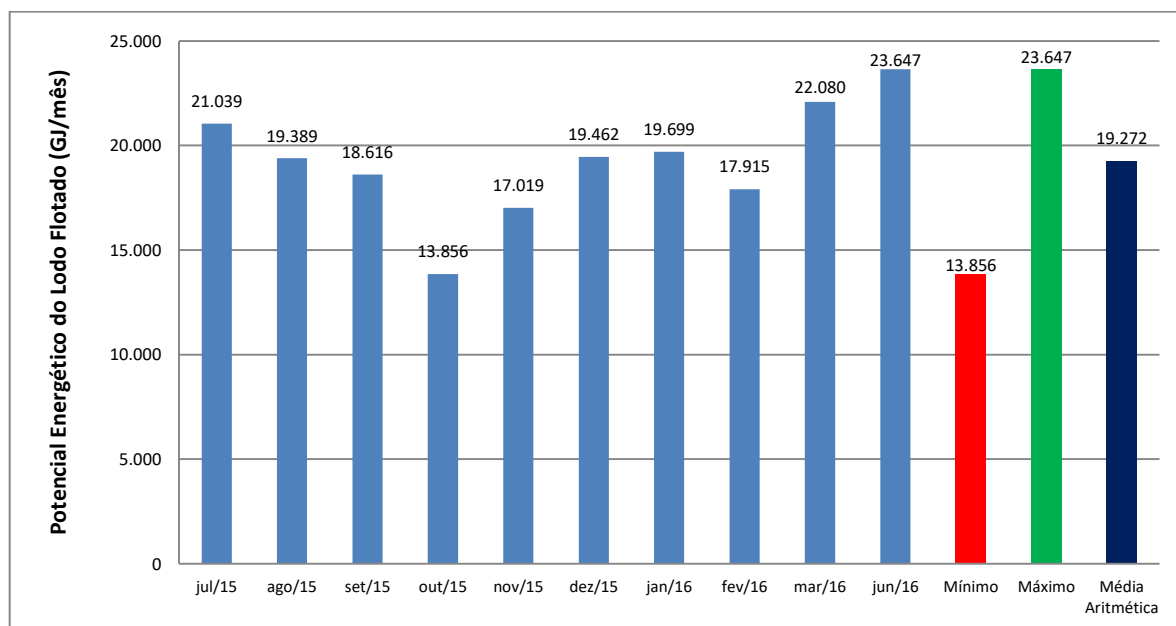
A Figura 24 apresenta a variação da geração mensal de lodo flotado no complexo industrial e a Figura 25 apresenta o potencial energético médio mensal do lodo flotado, de acordo com as considerações de conversão feitas e rendimento térmico da caldeira do complexo industrial.

Figura 24. Volume de lodo flotado gerado mensalmente.



Fonte: Próprio autor.

Figura 25. Potencial energético do lodo flotado.



Fonte: Próprio autor.

7.1.4 Potencial de Energia do Resíduo de Incubatório

A quantidade média mensal de geração de resíduo de incubatório é de aproximadamente 226,5 toneladas, o que corresponde a aproximadamente 12.622 m³/mês de potencial de geração de biogás e 9.130 m³/mês de potencial de geração de gás metano.

Não houve alterações significativas no volume gerado de resíduo de incubatório ao longo dos últimos meses. Com este potencial de geração de gás metano pode-se reduzir significativamente o custo de destinação deste resíduo, já que atualmente a técnica mais utilizada é a compostagem, que, além de ser de alto custo, quando realizada de maneira inadequada pode gerar odores e outros prejuízos ambientais.

Este incubatório não possui sistema de desidratação deste resíduo, sendo que, quando instalado, o volume de descarte pode reduzir significativamente.

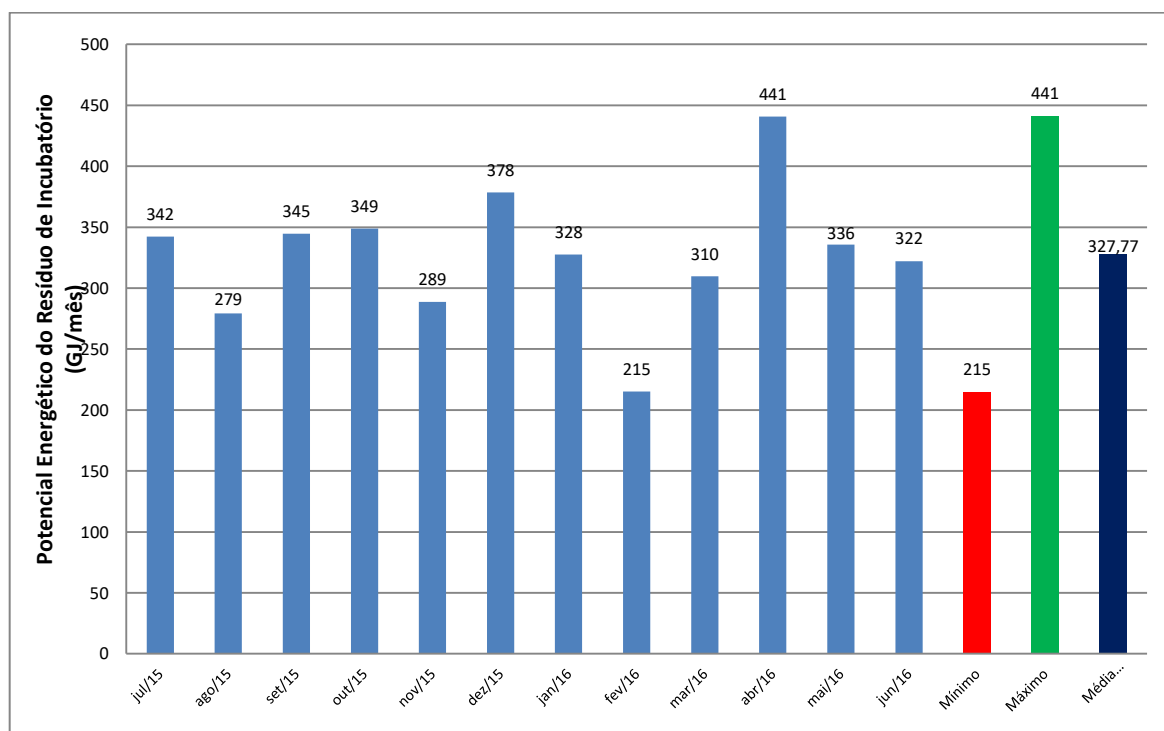
A Tabela 9 apresenta o potencial mensal de geração de biogás e gás metano a partir da co-digestão do resíduo de incubatório. A Figura 26 mostra o potencial energético mensal do resíduo de incubatório, de acordo com as considerações de conversão feitas.

Tabela 9. Potencial mensal de geração de biogás e gás metano a partir do resíduo de incubatório.

	Jul/15	Ago/15	Set/15	Out/15	Nov/15	Dez/15	
Quant. de Resíduo de Incubatório (t/mês)	236,56	193,03	238,12	241,08	199,53	261,48	
Potencial de Geração de Biogás (m ³ /mês)	13.183	10.757	13.270	13.435	11.119	14.572	
Potencial de Geração de Metano (m ³ /mês)	9.535	7.780	9.598	9.717	8.042	10.540	
	Jan/16	Fev/16	Mar/16	Abr/16	Mai/16	Jun/16	Média
Quant. de Resíduo de Incubatório (t/mês)	226,40	148,61	213,98	304,64	231,99	222,58	226,50
Potencial de Geração de Biogás (m ³ /mês)	12.617	8.282	11.925	16.977	12.928	12.404	12.622
Potencial de Geração de Metano (m ³ /mês)	9.126	5.990	8.625	12.279	9.351	8.972	9.130

Fonte: Próprio autor.

Figura 26. Potencial energético do resíduo de incubatório.



Fonte: Próprio autor.

7.1.5 Potencial de Energia da Tripa Celulósica

O volume de geração de tripa celulósica é basicamente constante ao longo do ano, já que não há grandes variações na formulação e no mix de produção nas linhas de salsicha.

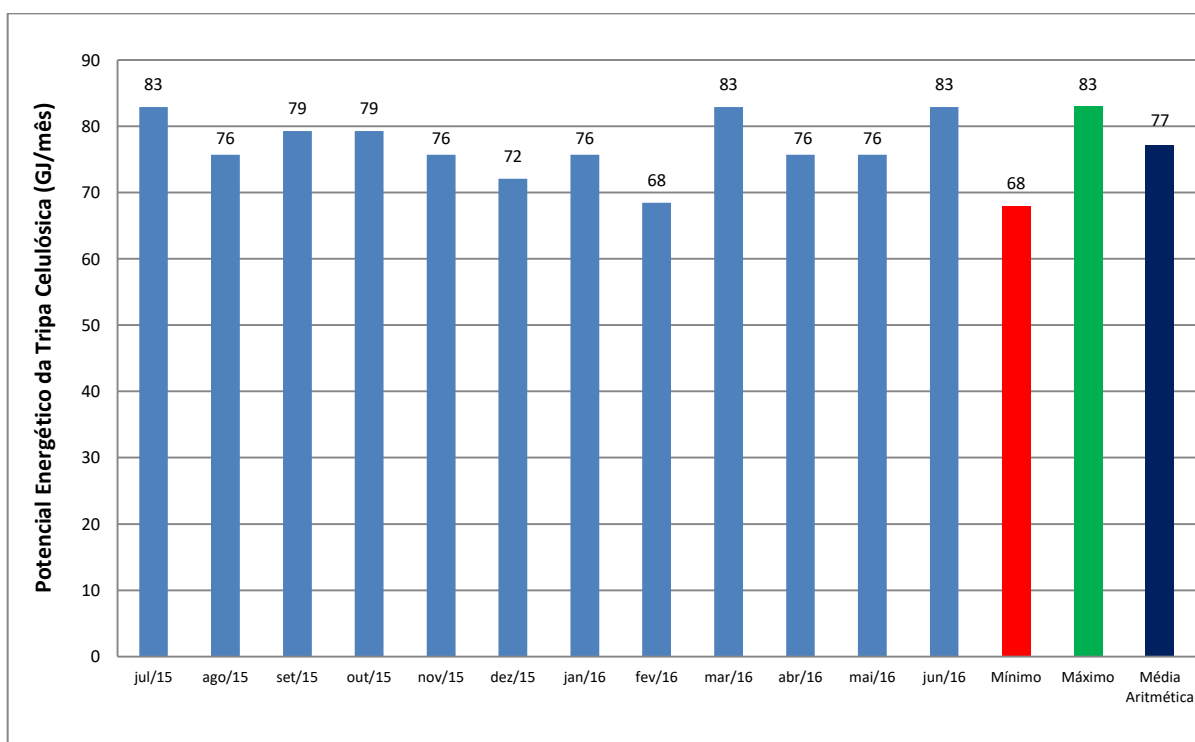
A produção média mensal do resíduo de tripa celulósica é de aproximadamente 107 m³, que corresponde aproximadamente a um potencial médio de 3.937 m³/mês de biogás e de 2.150 m³/mês de gás metano. A Tabela 10 mostra a variação na geração mensal de tripa celulósica bem como o potencial mensal de produção de biogás e gás metano. Na Figura 27 consta o potencial energético deste resíduo, de acordo com as considerações de conversão feitas.

Tabela 10. Potencial de geração de biogás e gás metano a partir da tripa celulósica.

	Jul/15	Ago/15	Set/15	Out/15	Nov/15	Dez/15	
Volume de Tripa Celulósica (m ³ /mês)	115	105	110	110	105	100	
Potencial de Geração de Biogás (m ³ /mês)	4.229	3.861	4.045	4.045	3.861	3.677	
Potencial de Geração de Metano (m ³ /mês)	2.309	2.108	2.208	2.208	2.108	2.008	
	Jan/16	Fev/16	Mar/16	Abr/16	Mai/16	Jun/16	Média
Volume de Tripa Celulósica (m ³ /mês)	105	95	115	105	105	115	107
Potencial de Geração de Biogás (m ³ /mês)	3.861	3.493	4.229	3.861	3.861	4.229	3.937
Potencial de Geração de Metano (m ³ /mês)	2.108	1.907	2.309	2.108	2.108	2.309	2.150

Fonte: Próprio autor.

Figura 27. Potencial energético da tripa celulósica.



Fonte: Próprio autor.

7.1.6 Potencial de Energia da Cama de Frango

O resíduo de cama de frango foi o que apresentou maior oscilação no volume gerado, visto que o mesmo é descartado somente durante o processo de limpeza dos aviários, que depende diretamente da validade de cada lote de frango. Houve meses que a geração foi superior a 2.384 toneladas, enquanto que em outras situações a geração foi de 254 toneladas. A média aritmética do período foi de 860 t/mês.

A Tabela 11 apresenta o potencial médio de geração de biogás e gás metano a partir da cama de frango. A Figura 28 mostra o potencial energético da cama de frango, A Figura 26

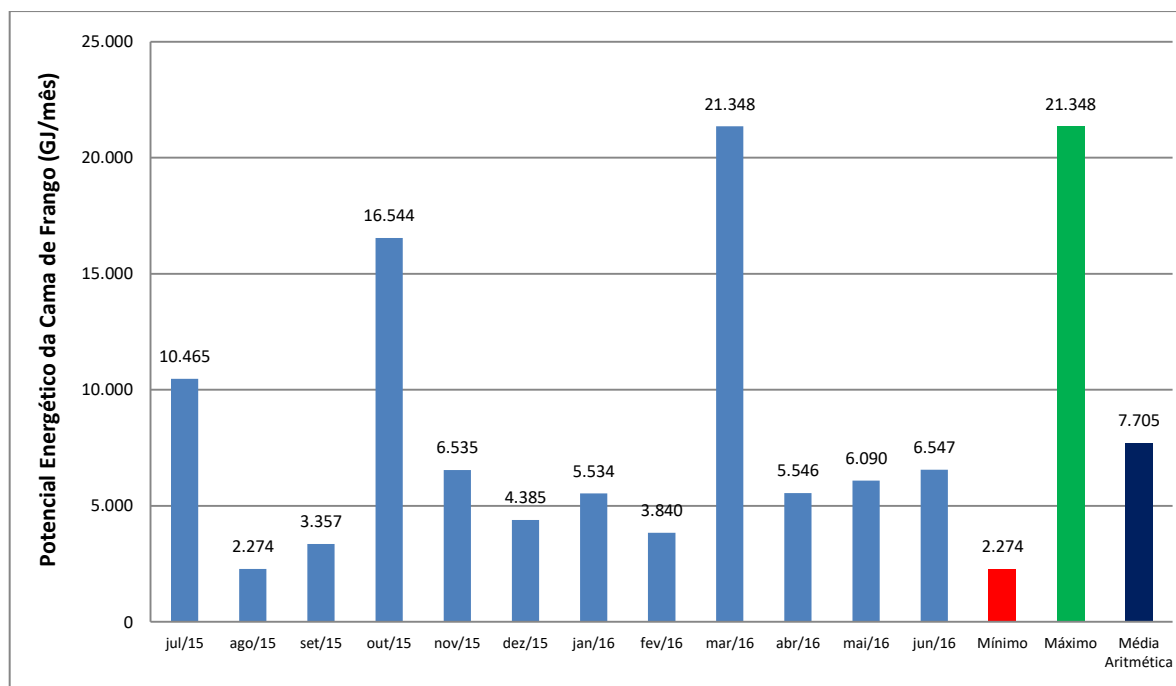
mostra o potencial energético mensal do resíduo de incubatório, de acordo com as considerações de conversão feitas.

Tabela 11. Potencial médio mensal de produção de biogás e gás metano a partir da cama de frango.

	Jul/15	Ago/15	Set/15	Out/15	Nov/15	Dez/15	
Quantidade de Cama de Frango (t/mês)	1.168	254	375	1.847	730	490	
Potencial de Produção de Metano (m ³ /mês)	291.492	63.338	93.505	460.832	182.046	122.145	
Potencial de Produção de Biogás (m ³ /mês)	485.821	105.563	155.842	768.053	303.409	203.576	
	Jan/16	Fev/16	Mar/16	Abr/16	Mai/16	Jun/16	Média
Quantidade de Cama de Frango (t/mês)	618	429	2.384	619	680	731	860
Potencial de Produção de Metano (m ³ /mês)	154.151	106.960	594.666	154.486	169.646	182.370	214.636
Potencial de Produção de Biogás (m ³ /mês)	256.919	178.266	991.109	257.476	282.744	303.950	357.727

Fonte: Próprio autor.

Figura 28. Potencial energético da cama de frango.



Fonte: Próprio autor.

7.1.7 Potencial de Energia dos Dejetos de Suínos

Como não existe sistema de pré-tratamento, a DQO dos dejetos de suínos teve resultado médio de 1.262 mg/l, resultado superior quando comparada à DQO do efluente pós-flotador.

O volume de dejetos gerados não sofreu grandes alterações, visto que este depende diretamente da quantidade de fezes e urina presente nos caminhões durante o processo de higienização. Outro fator que interfere diretamente no volume é a quantidade de água utilizada para fazer a higienização dos caminhões, portanto, caso seja implementado algum trabalho de boas práticas, o consumo de água pode ser reduzido.

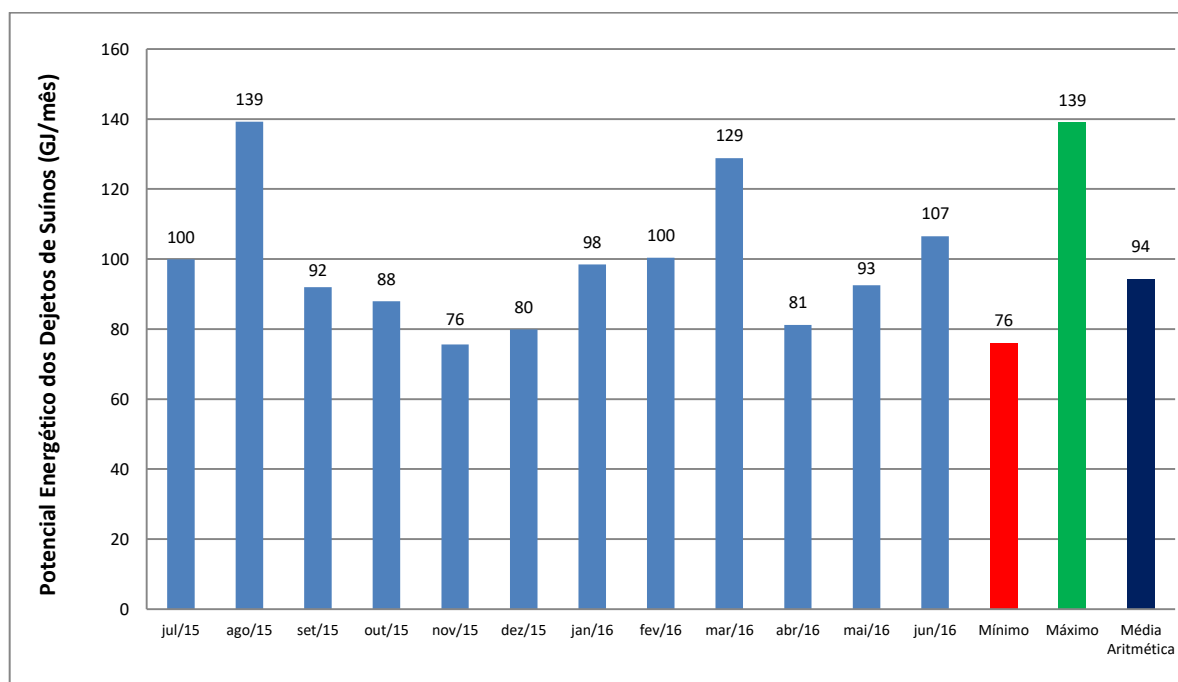
A carga poluidora média foi de 9.406 kgDQO/mês e o potencial de produção de gás metano foi de 2.627 m³CH₄/mês. A Tabela 12 apresenta o potencial médio mensal de produção de biogás e gás metano a partir de dejetos de suínos, bem como os demais parâmetros utilizados nos cálculos. Na Figura 29 consta o potencial energético deste resíduo, de acordo com as considerações de conversão feitas.

Tabela 12. Potencial mensal de geração de biogás e gás metano a partir dos dejetos de suínos.

	Jul/15	Ago/15	Set/15	Out/15	Nov/15	Dez/15	
DQO média mensal (mg/l)	1.250	1.888	1.197	1.144	1.025	1.130	
Volume de Dejetos de Suínos Gerados (m ³ /mês)	7.969	7.356	7.663	7.663	7.356	7.050	
Carga Poluidora (kg DQO/mês)	9.961	13.888	9.172	8.766	7.540	7.966	
Potencial de Geração de Metano (m ³ /mês)	2.782	3.879	2.562	2.449	2.106	2.225	
Potencial de Geração de Biogás (m ³ /mês)	3.975	5.542	3.660	3.498	3.009	3.179	
	Jan/16	Fev/16	Mar/16	Abr/16	Mai/16	Jun/16	Média
DQO média mensal (mg/l)	1.335	1.485	1.612	1.100	1.254	1.333	1.262
Volume de Dejetos de Suínos Gerados (m ³ /mês)	7.356	6.743	7.969	7.356	7.356	7.969	7.448
Carga Poluidora (kg DQO/mês)	9.820	10.013	12.846	8.092	9.224	10.623	9.406
Potencial de Geração de Metano (m ³ /mês)	2.743	2.797	3.588	2.260	2.577	2.967	2.627
Potencial de Geração de Biogás (m ³ /mês)	3.919	3.996	5.126	3.229	3.681	4.239	3.753

Fonte: Próprio autor.

Figura 29. Potencial energético dos dejetos de suínos.



Fonte: Próprio autor.

7.1.8 Potencial de Energia dos Resíduos de Varrição da Fábrica de Rações

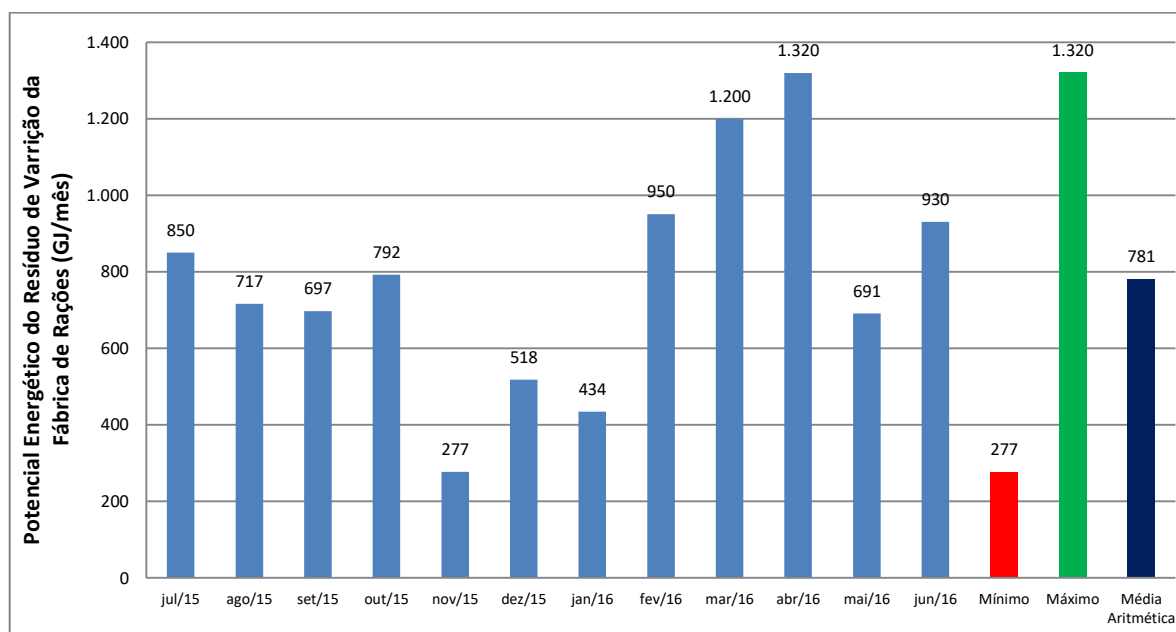
O volume de geração dos resíduos de varrição da fábrica de rações foi de 81,52 t/mês. A Tabela 14 apresenta o potencial de geração de biogás e gás metano a partir da co-digestão do resíduo de varrição. A Figura 30 apresenta o potencial energético mensal que pode ser gerado a partir deste resíduo, de acordo com as considerações de conversão feitas.

Tabela 13. Potencial mensal de geração de biogás e gás metano a partir dos resíduos de varrição da fábrica de rações.

	Jul/15	Ago/15	Set/15	Out/15	Nov/15	Dez/15	
Quantidade de Resíduos Gerados (t/mês)	89	75	73	83	29	54	
Potencial de Geração de Metano (m³/mês)	23.680	19.958	19.414	22.060	7.716	14.421	
Potencial de Geração de Biogás (m³/mês)	39.467	33.264	32.356	36.766	12.861	24.034	
	Jan/16	Fev/16	Mar/16	Abr/16	Mai/16	Jun/16	Média
Quantidade de Resíduos Gerados (t/mês)	45	99	125	138	72	97	81,52
Potencial de Geração de Metano (m³/mês)	12.100	26.473	33.428	36.761	19.261	25.915	21.766
Potencial de Geração de Biogás (m³/mês)	20.167	44.122	55.714	61.268	32.102	43.192	36.276

Fonte: Próprio autor.

Figura 30. Potencial energético dos resíduos de varrição da fábrica de rações.



Fonte: Próprio autor.

7.1.9 Potencial de Energia dos Resíduos de Restaurante

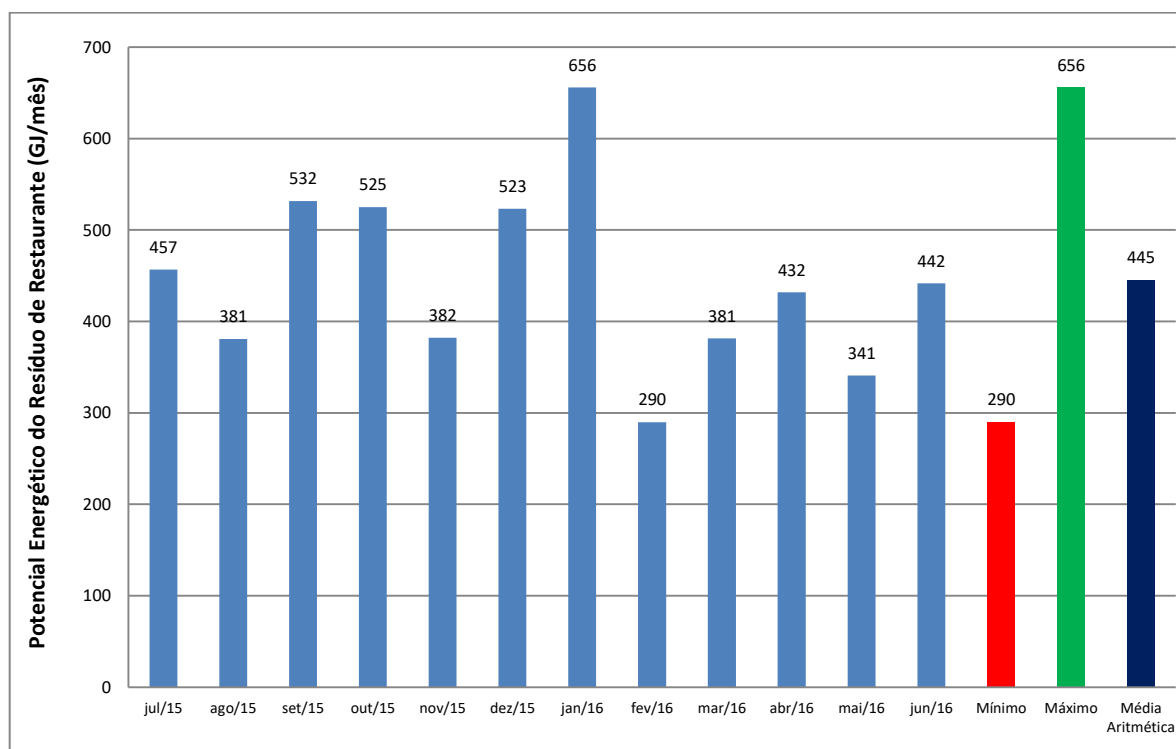
No complexo industrial é gerado mensalmente uma média de 76,77 toneladas por mês de resíduos no restaurante, o que corresponde a um potencial médio de 12.399 m³/mês de gás metano. A Tabela 14 apresenta os principais potenciais mensais de produção de biogás e gás metano a partir dos resíduos do restaurante. A Figura 31 apresenta o potencial energético deste resíduo, de acordo com as considerações de conversão feitas.

Tabela 14. Potencial mensal de geração de biogás e gás metano a partir dos resíduos do restaurante.

	Jul/15	Ago/15	Set/15	Out/15	Nov/15	Dez/15	
Quantidade de Resíduo de Restaurante (t/mês)	78,80	65,66	91,68	90,57	65,93	90,24	
Potencial de Geração de Metano (m ³ /mês)	12.726	10.604	14.806	14.627	10.648	14.574	
Potencial de Geração de Biogás (m ³ /mês)	21.210	17.673	24.677	24.378	17.746	24.290	
	Jan/16	Fev/16	Mar/16	Abr/16	Mai/16	Jun/16	Média
Quantidade de Resíduo de Restaurante (t/mês)	113,14	49,99	65,78	74,48	58,81	76,18	76,77
Potencial de Geração de Metano (m ³ /mês)	18.272	8.073	10.623	12.029	9.498	12.303	12.399
Potencial de Geração de Biogás (m ³ /mês)	30.454	13.456	17.706	20.048	15.830	20.505	20.664

Fonte: Próprio autor.

Figura 31. Potencial energético a partir dos resíduos do restaurante.



Fonte: Próprio autor.

7.2 Comparativo do Potencial de Geração de Energia entre as Fontes Primárias

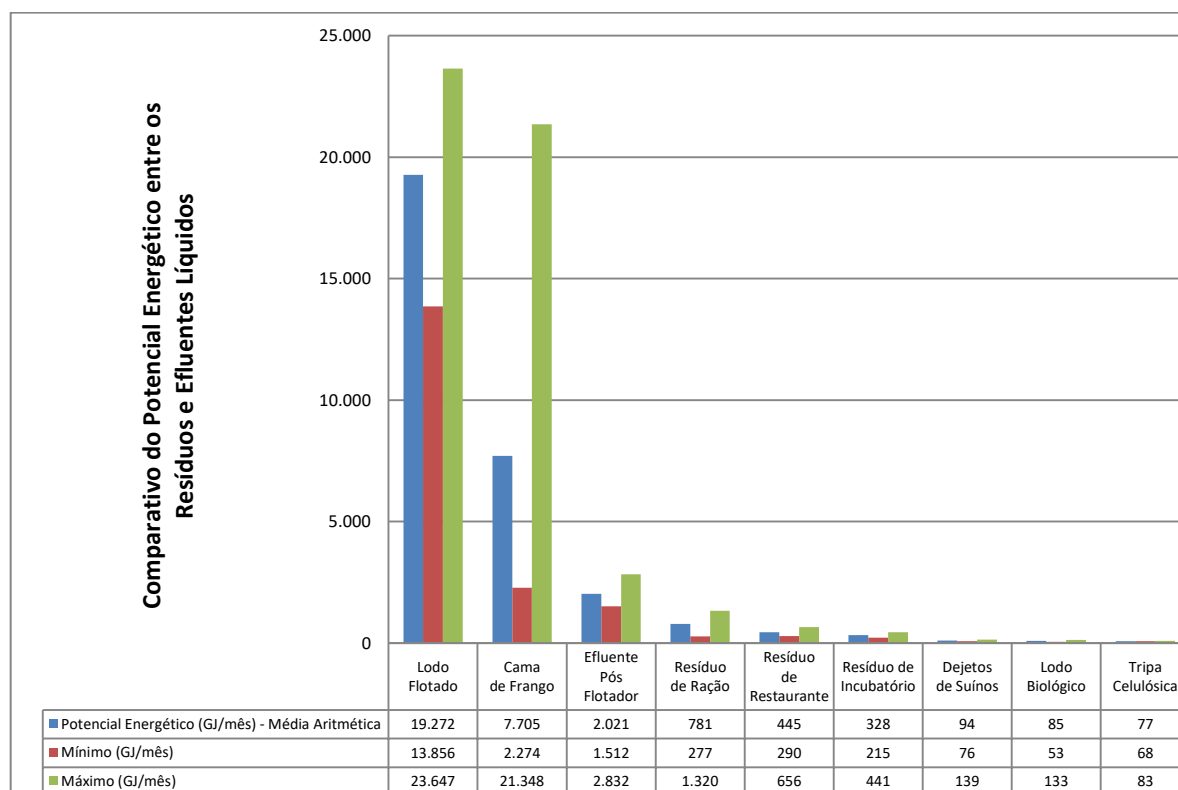
O maior potencial energético encontra-se no Lodo Flotado, isso devido ao fato de ser o maior volume de resíduo gerado, e também de apresentar um alto teor de gordura, elevando diretamente o seu poder calorífico. Posteriormente temos a cama de frango, porém existe uma grande variação no volume mensal, o que pode prejudicar o processo de geração de energia, já que este trabalha de forma contínua. A Tabela 15 mostra a variação mensal do Potencial Energético, de acordo com as considerações de conversões feitas e a Figura 32 apresenta o comparativo entre o potencial energético dos resíduos e dos efluentes líquidos.

Tabela 15. Variação mensal do potencial energético dos resíduos sólidos orgânicos e efluentes líquidos (GJ/mês).

Meses	Lodo Flotado	Cama de Frango	Efluente Pós Flotador	Resíduo de Ração	Resíduo de Restaurante	Resíduo de Incubatório	Dejetos de Suínos	Lodo Biológico	Tripa Celulósica
Jul/15	21.039	10.465	2.832	850	457	342	100	116	83
Ago/15	19.389	2.274	1.684	717	381	279	139	63	76
Set/15	18.616	3.357	1.512	697	532	345	92	67	79
Out/15	13.856	16.544	2.528	792	525	349	88	66	79
Nov/15	17.019	6.535	1.977	277	382	289	76	79	76
Dez/15	19.462	4.385	1.732	518	523	378	80	92	72
Jan/16	19.699	5.534	1.675	434	656	328	98	92	76
Fev/16	17.915	3.840	1.705	950	290	215	100	76	68
Mar/16	22.080	21.348	2.664	1.200	381	310	129	86	83
Abr/16	-	5.546	-	1.320	432	441	81	101	76
Mai/16	-	6.090	-	691	341	336	93	53	76
Jun/16	23.647	6.547	1.907	930	442	322	107	133	83

Fonte: Próprio autor.

Figura 32. Comparativo do potencial energético entre os resíduos sólidos orgânicos e efluentes líquidos.



Fonte: Próprio Autor.

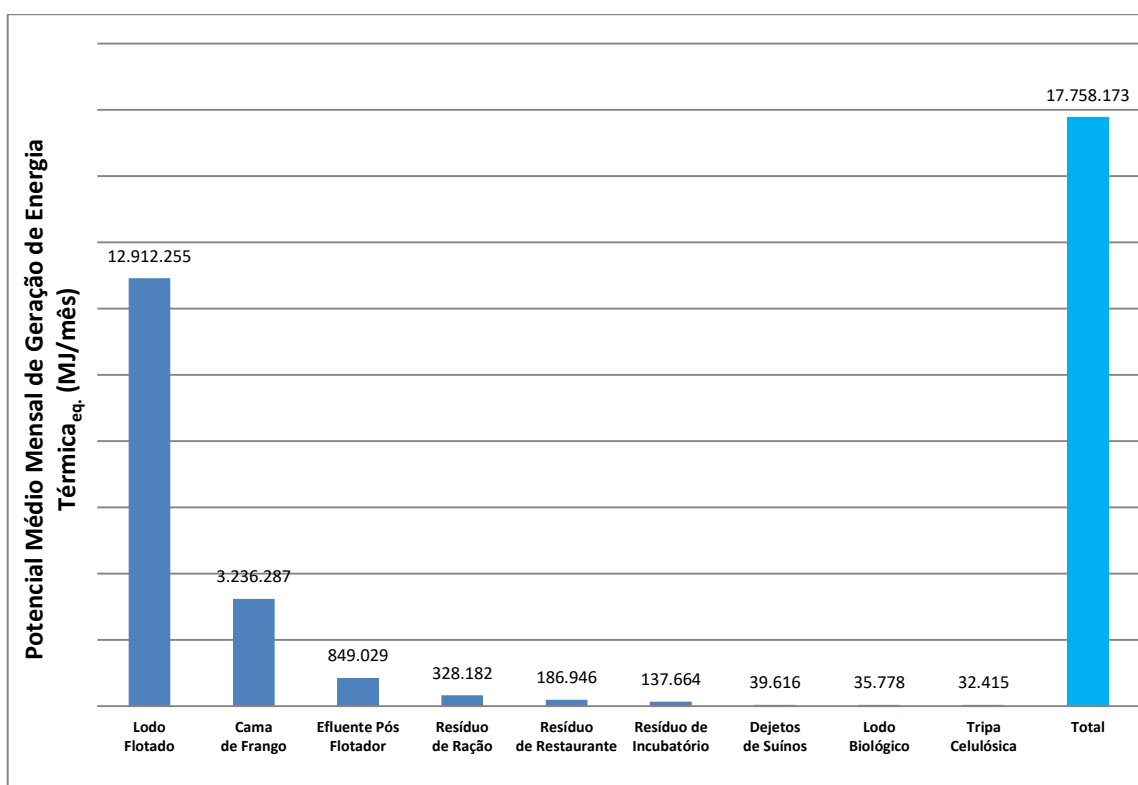
O potencial energético médio mensal é de aproximadamente 30.808 GJ/mês. O resíduo que apresentou menor variação mensal foi a tripa celulósica, já que a produção da linha de salsicha tende a ser linear, causando uma baixa interferência na geração deste resíduo.

No que diz respeito ao aproveitamento energético, o lodo flotado apresentou o maior potencial de produção de energia térmica (média de 12.912 GJ/mês). Depois, tem-se a cama de frango (média de 3.236 GJ/mês) e o efluente pós-flotador (849 GJ/mês). Estes três resíduos representam aproximadamente 95,70% do potencial médio mensal de produção de energia térmica, portanto interferem diretamente nos cálculos da viabilidade econômica.

Nos cálculos de equivalência de geração de energia elétrica, esta ordem não foi alterada, sendo o maior potencial presente no lodo flotado (2.890 MWh/mês), seguido pelo resíduo de cama de frango (815 MWh/mês) e efluente pós-flotador (213 MWh/mês). O menor potencial de produção de energia térmica e elétrica está contido no resíduo de tripa celulósica.

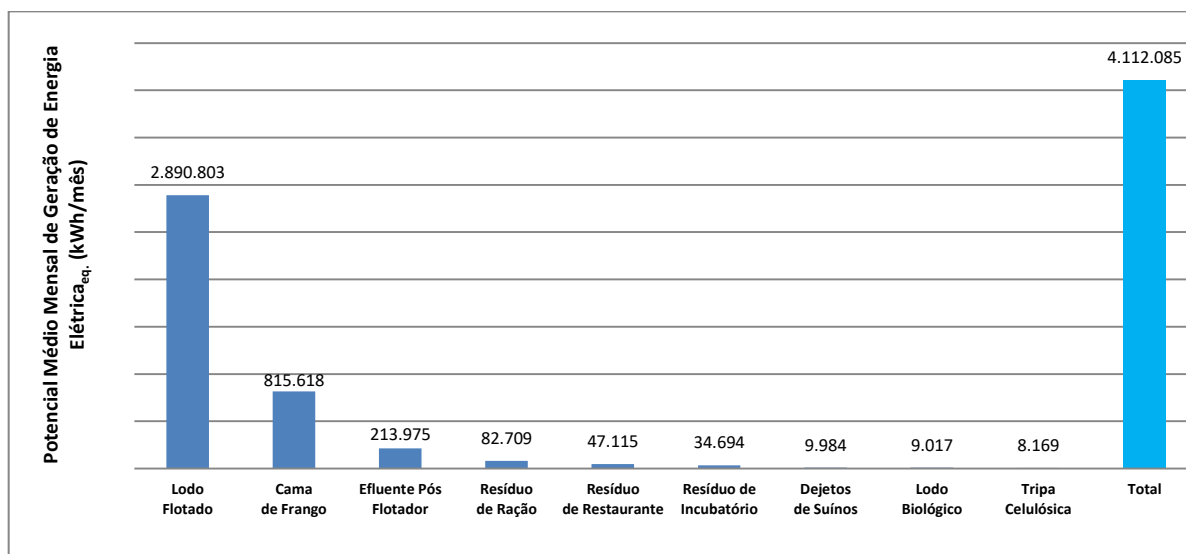
As Figuras 33 e 34 mostram, respectivamente, o comparativo do potencial mensal de produção de energia térmica e elétrica para os diversos resíduos analisados.

Figura 33. Potencial médio mensal de geração de energia térmica a partir dos diversos resíduos orgânicos gerados na unidade agroindustrial.



Fonte: Próprio autor.

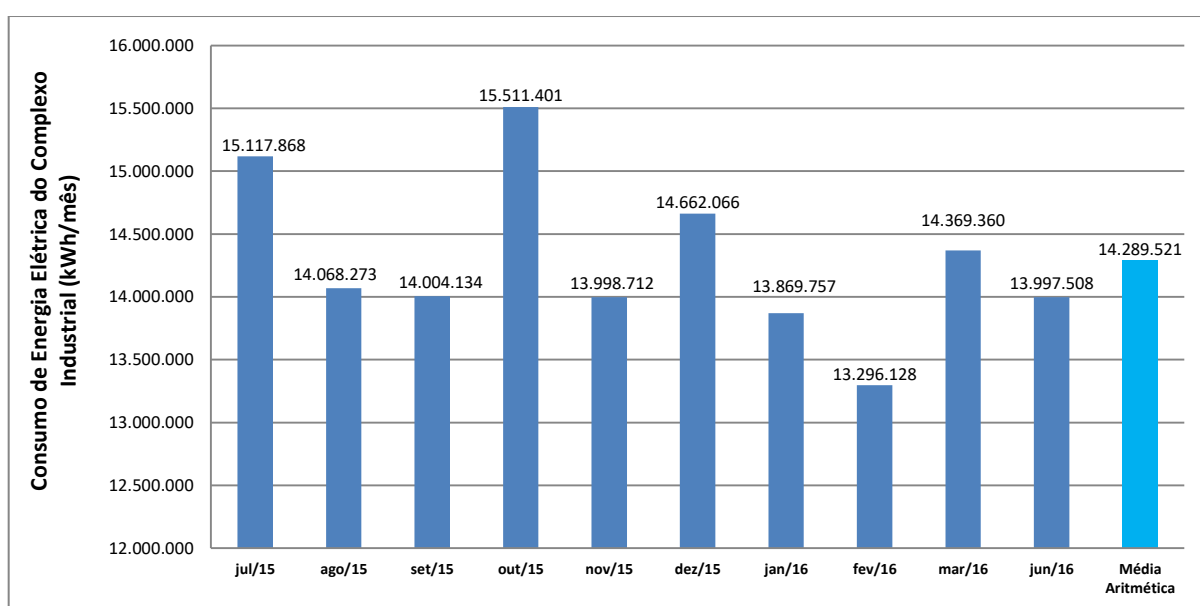
Figura 34. Potencial médio mensal de geração de energia elétrica a partir dos resíduos orgânicos gerados no complexo industrial.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 35 apresenta o consumo médio de energia elétrica do complexo industrial nos últimos meses, desconsiderando Abril e Maio do ano de 2016, já que a produção foi parcial neste período. Assim, levando-se em conta a energia elétrica produzida (Figura 34), verifica-se que os resíduos orgânicos podem gerar aproximadamente 28,77% da energia elétrica consumida (Figura 35).

Figura 35. Consumo mensal de energia elétrica do complexo industrial.



Fonte: Próprio autor.

7.3 ANÁLISE DA VIABILIDADE FINANCEIRA E ECONÔMICA DE IMPLANTAÇÃO DO PROJETO

Neste tópico estão apresentados os principais equipamentos a serem instalados, bem como os custos de operação e manutenção envolvidos, com o intuito de se verificar a viabilidade da execução do projeto.

Na Tabela 16 constam os principais equipamentos necessários para aproveitamento energético do biogás e, também, as adequações necessárias para realizar a queima de lodo flotado nas caldeiras, sendo que na Tabela 17 estão apresentados os principais custos de operação e manutenção do novo sistema proposto. Estes custos foram repassados pelo fabricante dos equipamentos. O custo de energia elétrica utilizado foi de R\$0,40/kWh. O custo relacionado ao transporte foi orçado juntamente com a empresa terceirizada que atualmente transporta estes resíduos para realização de tratamento externo.

Tabela 16. Descrição dos principais equipamentos a serem instalados.

Equipamentos a serem instalados		
Quantidade	Descrição	Custo (R\$)
01	Recuperar reatores anaeróbios existentes, instalar sistema de recuperação de lodo nos reatores, instalar bombas centrífugas, instalar bombas de recirculação do lodo, instalar tubulações de alimentação e saída do efluente nos reatores, instalar cúpulas, instalar medidores de parâmetros de operação, instalar sistema de nitrificação e desnitrificação pós-reator anaeróbio. Motor de combustão interna acoplado a gerador elétrico com capacidade de 3,3 MW (830 m ³ /h de CH ₄). Sistema de purificação do biogás.	7.304.220,00
01	Sistema de aeração para lodos ativados por ar dissolvido.	3.500.000,00
01	Sistema de armazenamento e alimentação de lodo flotado na caldeira.	150.000,00
01	Sistema de transporte interno de casquinha de salsicha.	60.000,00
01	Carretinha de transporte interno de resíduo de Incubatório.	50.000,00
01	Outras adequações civil e elétrica.	500.000,00
Total		11.564.220,00

Fonte: Próprio autor.

Tabela 17. Principais custos de operação e manutenção do novo sistema.

Custos de Operação do Sistema		
Quantidade	Descrição	Custo Anual (R\$)
01	Custos de operação do digestor e do gerador elétrico (considerando gastos com manutenção, troca de óleo, etc.)	1.800.000,00
01	Transporte interno de resíduos para unidade de tratamento (contrato fixo de R\$ 50.000/mês)	600.000,00
01	Consumo de energia elétrica do sistema de tratamento dos resíduos (aproximadamente 2.000.000 kWh/ano – Dados repassados pelo fornecedor do equipamento).	800.000,00
Total		3.200.000,00

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 18 constam os principais ganhos financeiros com a execução do projeto, sendo que o custo de cavaco utilizado foi estimado em R\$ 50,00/m³. A redução de custos com a destinação final foi obtida através dos gastos atuais com a destinação destes resíduos.

Tabela 18. Principais ganhos financeiros com a implantação do projeto.

Ganhos com a implantação do Projeto		
Quantidade	Descrição	Ganho Annual (R\$)
01	Redução do consumo de cavaco de eucalipto na caldeira (Devido à queima do lodo flotado).	450.000,00
01	Redução do consumo de energia elétrica do complexo industrial (14.655.384 kWh/ano – Considerando o potencial de geração do conjunto moto gerador, exceto o lodo flotado que será queimado diretamente na caldeira).	5.862.153,00
01	Redução de custos com a destinação final dos resíduos.	2.388.192,00
Total		8.700.345,00

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 19 são apresentados os principais indicadores financeiros do projeto, obtendo um *payback* descontado de 37 meses e um valor de *MTIR* de 24,6%, que atualmente no cenário econômico do país mostra-se totalmente viável.

Tabela 19. Indicadores financeiros do projeto.

Indicadores financeiros	
<i>VPL</i> - Valor Presente Líquido	R\$ 18.907.000,00
<i>MTIR</i> - Taxa Interna de Retorno Modificada	24,6 % a.a
<i>Payback</i> descontado	37 meses
Prazo de Execução	6 meses

Fonte: Próprio autor.

8 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi feita uma análise do potencial de geração de energia térmica e elétrica a partir dos resíduos orgânicos e de seus efluentes líquidos numa unidade agroindustrial. Foram considerados os resíduos de incubatório, de cama de frango, de dejetos de suínos, de tripa celulósica, de varrição da fábrica de rações, e do restaurante, bem como dos lodos biológico e flotado, além do efluente do pós-flotador.

As técnicas utilizadas para decomposição anaeróbia se mostraram bastante atrativas, bem como a utilização da queima direta de lodo flotado na caldeira.

Em termos econômicos, o projeto se mostrou bastante promissor, podendo representar uma redução de até 28,77% de toda energia elétrica adquirida da concessionária pelo complexo industrial. O *payback* descontado foi de 37 meses e a *MTIR* foi de 24,6%, levando-se em conta um investimento de R\$ 11.564.220,00 e um prazo de execução de 6 meses.

É importante salientar que os cálculos de viabilidade econômica referem somente ao cenário desta agroindustrial, portanto, para outras unidades agroindustriais devem ser realizadas novos cálculos, de acordo com o cenário proposto, pois, os tipos e quantidades de resíduos podem ser diferentes e, principalmente, existirão gastos adicionais com a construção dos biodigestores, fato este que não considerado no presente estudo uma vez que já estavam disponíveis e demandam apenas algumas reformas.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de um estudo mais amplo, envolvendo em escala piloto a decomposição anaeróbia dos resíduos estudados, de modo que haja maior assertividade nos valores de produção de gás metano e biogás e, conseqüentemente, das energias térmica e elétrica.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA PRODUTORA E EXPORTADORA DE CARNE SUÍNA - ABIPECS. **Estatísticas 2014**. São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www.abipecs.com.br>>. Acesso em: 12 ago. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10004: resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL - ABPA. **Avicultura e suinocultura do Brasil: produção e exportação, previsões para 2015 e 2016**. São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://abpa-br.com.br/noticia/avicultura-e-suinocultura-do-brasil-producao-e-exportacao-previsoes-para-2015-e-2016-1478>>. Acesso em: 23 ago. 2016.

ANGONESE, A. R. et al. Eficiência energética de sistema de produção de suínos com tratamento dos resíduos em biodigestor. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 745-750, 2006.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO - ANP. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo: gás natural e biocombustíveis**, 2009. São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/conheca/anuario_2009.asp>. Acesso em setembro de 2009.

ARCHELA, E.; CARRARO, A.; FERNANDES, F.; BARROS, O. N. F.; ARCHELA, R. S. Considerações sobre a geração de efluentes líquidos em centros urbanos. **Geografia**, Londrina, v. 12, n. 1, p. 517-525, 2003.

AVELLAR, L. H. N.; CARROCCI, L. R.; SILVEIRA, J. L. Biogás na cogeração: a utilização de subprodutos agro-industriais na geração de energia em unidades cogeneradoras. **Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento**, Uberlândia, p. 46-49, 2000.

BADO, C. **Gestão de resíduos resultantes da produção de frangos de corte**. 2006. 74 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006.

BALDIN, V. **Geração de energia na avicultura de corte a partir da cama de aviário**. 2013. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013.

BALESTIERI, J. A. P. **Planejamento de centrais de cogeração: uma abordagem multi objetiva**. 1994. 151 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, 1994.

BARJA, G. **A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico**. Brasília: Universidade de Brasília, 2006. 171 p.

BARROS, D. Cogeração de energia com biogás a partir de lodo biológico. In: CONGRESSO SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 10., 2015, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2015. p. 1-13.

BATISTA, F. G. A.; QUEIROZ, F. R. P.; OLIVEIRA, D. S. Percepção socioambiental do reuso das águas residuárias em condomínios verticais da cidade de Campina Grande - PB. **Holos**, Natal, v. 6, p. 70-82, 2014.

BENETTI, A. D. Water reuse: issues, technologies, and applications. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 3, p. 247-248, 2008.

BHATTACHARYA, S. K.; UBEROI, V.; DRONAMRAJU, M. M. Interaction between acetate fed sulfate reducers and methanogens. **Water Research**, London, v. 30, n. 10, p. 2239-2246, 1996.

BRASIL. **Lei 9605, de 12 de fevereiro de 1998**. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências. Brasília, DF, 1998. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm>. Acesso em: 10 set. 2016.

BRASIL. **Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências. Brasília, DF, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em 04 set. 2016.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Catálogo de tecnologias e empresas de biogás**. Brasília, DF, 2015. 190 p.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto / Probiogás**. Brasília, DF, 2015. 183 p.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Análise da viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs no Brasil a partir do biogás**. Brasília, DF, 2016. 145 p.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás**. Brasília, DF, 2015. 83 p.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Avaliação de opções para o tratamento de efluentes da produção de biogás**. Brasília, DF, 2015. 91 p.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Comercialização de subprodutos de uma planta de biogás**. Brasília, DF, 2015. 47 p.

BRAUN, R.; HOLM-NIELSEN, J. B.; SEADI, T. A. L. **Potential of co-digestion: energy from biogas and landfill gas**. Austria: IEA Bioenergy, 2002. 16 p.

CARDOSO, B. M. **Uso da biomassa como alternativa energética**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2012. 112 p.

CARVALHO, B. V.; SOUZA, A. P. M.; SOTO, F. R. M. Avaliação de sistemas de gestão ambiental em granjas de suínos. *Revista Ambiental Água*, v. 10, n. 1, pp. 164-171, Taubaté, SP, 2015.

CASSINI, S. T. (Coord.). **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do Biogás**. Rio de Janeiro: ABES/Rima, 2003. 210 p.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA BIOMASSA - CENBIO. **Atlas de Bioenergia do Brasil: metodologias de cálculo da conversão energética das biomassas selecionadas.** São Paulo, 2008. 9 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Modelo de Relatório de Monitoramento de Emissões Atmosféricas.** São Paulo, 2010.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo: significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem.** São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/32/2013/11/variaveis.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2016.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária - UFMG, 1997. v. 5. 246 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias).

CLASSEN, P. A. M; LIER, J. B.; STAMRS, A. J. M. Utilization of biomass for supply of energy carrier. **Applied Microbiology and Biotechnology**, Heidelberg, v. 52, pp. 741-755, 1999.

COELHO, S. T.; SILVA, O. C.; VARKULYA JUNIOR, A.; AVELLAR, L. H. N.; FERLING, F. F. **Estado da arte do biogás.** Relatório de acompanhamento. CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. São Paulo, SP, 2001.

COELHO, S. T.; MARTINS, O. S.; COSTA, D. F.; BASIC, A.; VELAZQUEZ, S. M. S. G. Instalação e testes de uma unidade de demonstração de geração de energia elétrica a partir de biogás de tratamento de esgoto. In: AGRENER - ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, 5., 2004, Campinas. **Anais...** Campinas: [s. n.], 2004.

COLDEBELLA, A. **Viabilidade do uso do biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais.** 2006. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.

CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). **Resolução nº 436, de 13 de maio de 2011.** Brasília, DF, 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=660>>. Acesso em: 13 ago. 2016.

CORTEZ, L. A. B.; FREIRE, W. J.; ROSILLO-CALLE, F. Biodigestion of vinasse in Brazil. **Int. Sugar Journal**, New Orleans, v. 100, n. 1196, p. 403-413, 1998.

ECOAGRO. **O agronegócio no Brasil: a agropecuária brasileira é um bem gigantesco, um campo cheio de oportunidades de investimento e desenvolvimento.** [S. l.], 2016. Disponível em: <<http://www.ecoagro.agr.br/agronegocio-brasil>>. Acesso em: 11 set. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco Energético Nacional 2016: Ano base 2015.** Rio de Janeiro, 2016. 296 p. Disponível em: <http://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf>. Acesso em 09 set. 2016.

FARIA, F. A. et al. Incubatórios: controle de qualidade. **Revista Faculdade Montes Belos**, São Luis de Montes Belos, v. 7, n. 1, p. 88-113, 2014.

FERRAREZ, A. H.; FILHO, D. O.; FILHO, A. F. L.; COSTA, J.M.; APARAVISI, F. R. S. Potencial de geração de energia térmica e elétrica a partir do biogás na cadeia produtiva de frango de corte. In: ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 2011, Vitória. **Anais...** Vitória: [s. n.], 2011. p. 1-11.

FIORI, M. G. S.; SCHOENHALS, M.; FOLLADOR, F. A. C. Análise da evolução tempo-eficiência de duas composições de resíduos agroindustriais no processo de com postagem aeróbia. **Engenharia Ambiental**, Espirito Santo do Pinhal, v. 5, n. 3, p. 178-191, 2008.

FLORES, B. A.; KEMERICH, P. D. C.; SCHROEDER, J. K.; PIOVESAN, M.; BORBA, W. F. Consciência ambiental relacionada aos resíduos sólidos urbanos em Faro, Portugal. **REMOA**, Lisboa, v. 14, n. 1, p. 2909-2919, 2014.

FREITAS, C. M. Levantamento da disposição final de resíduos sólidos urbanos em 32 municípios do Estado de Goiás. **Revista de Biologia Neotropical**, Goiânia, v. 12, n. 2, p. 120, 2016.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE - FUNASA. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAs**. Brasília, DF, 2014. 112 p.

GALVÃO, L. C. R; SAIDEL, M. A; RIBEIRO, F. S; UDAETA, M. E. M. **Energia de resíduos sólidos como mecanismo de desenvolvimento limpo**. São Paulo: GEPEA, USP, 2015.

GEHRING, C. G. **Análise da geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na fermentação anaeróbica de vinhaça**. 2014. 124 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) - USP, São Carlos, 2014.

GIORDANO, G. **Tratamento e controle de efluentes industriais**. ARio de Janeiro, 2004. postila Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://xa.yimg.com/kq/groups/24138517/1421219182/name/Apostila+-+Tratamento+de+efluentes+industriais.pdf>>. Acesso em 20 jul. 2016.

GOMES, J. N. C. **Potencial de produção de energia a partir da biometanização de resíduos orgânicos do câmpus pampulha da UFMG**. 2014. 113 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

HENRIQUES, R. M.; OLIVEIRA, L. B.; COSTA, A. O. **Geração de energia com resíduos sólidos urbanos: análise custo-benefício**. [S. l.: s. n.], 2003. Disponível em: <<papers2://publication/uuid/E0286044-48C3-4709-BA5D-646B34C09C05>>. Acesso em: 01 set. 2016.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M.; REIS, L. B. **Energia e meio ambiente**. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 708 p.

IPCC. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. [S. l.], 2006.

JOHNS, M. R. Developments in wastewater treatment in the meat processing industry: a review. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 54, pp. 203-216, 1995.

KALATALO, D. **Análise energética de ciclos combinados**. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 2004. 120 p.

KANGLE, K. M. et al. Recent trends in anaerobic codigestion : a review. **Universal Journal of Environmental Research and Technology**, Kolhapur, v. 2, n. 4, p. 210-219, 2012.

KHAPRE, U. L. Studies on biogas utilization for domestic cooking. In: ANNUAL CONVENTION OF ISAE, HELD AT CTAE, 25., 1989, Udaipur. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 1989.

KONRAD, O.; CASARIL, C. E.; MARDER, M.; FELDKIRCHER, T.; SCHNEIDER, V. F.; GUERINI FILHO, M. Digestão anaeróbia de dejetos suínos e tripa celulósica para geração de biogás. In: SIMBIOMERCOSUL - SIMPÓSIO DE BIOENERGIA E BIOCOMBUSTÍVEIS DO MERCOSUL, 2., 2014, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: [s. n.], 2014. p. 1-7.

KONZEN, E. A. Biodigestores para tratamento de dejetos suínos. In: SEMANA DE ZOOTECNIA, 3, 2005, Diamantina. **Anais...** Diamantina, MG, Faculdade Federais Integradas, 2005. p. 55-78.

KRAEMER, M. E. P. Resíduos industriais e a questão ambiental associada à contabilidade aplicada ao ambiente natural. revista catarinense de ciência contábil. Florianópolis, 2005. Disponível em: <http://www.atena.org.br/revista/ojs-2.2.3-08/index.php/pensarcontabil/article/viewFile/45/45>. Acesso em: 30 ago. 2016.

LEITE, W. R. M. **Digestão anaeróbia mesofílica de lodo adensado de estação de tratamento de esgoto. 2011**. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

LETTINGA, G.; VAN VELSEN, A. F. M.; HOBMA, S. W.; ZEEUW, W.; KLAPWIJK, A. Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment especially anaerobic treatment. **Biotechnology and Bioengineering**, Hoboken, v. 22, n. 4, p. 699-734, 1980.

MACHADO, J. **Benchmarking para uma termelétrica que utiliza turbinas aeroderivadas conectadas ao Sistema Interligado Nacional**. São Paulo: Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, 2010. 77 p.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. Secretaria de Política Agrícola. **Plano agrícola e pecuário 2013/2014**. Brasília, DF, 2013. 126 p. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/plano-agricola-e-pecuario-1/arquivos-pap/pap20132014-web.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2016.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. **Produto Interno Bruto (PIB) do Agronegócio**. Brasília, DF, 2015. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/publicacoes>>. Acesso em: 13 ago. 2016.

MATTER, J. M. **Co-digestão de resíduos de incubatório de aves e águas residuárias agroindustriais**. 2011. 59 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2011.

MENDONÇA, F. H. O.; VITORINO, K. M. N.; CARVALHO, J. M. S.; SANTO, F. S. E. Resíduos sólidos gerados em agroindústrias. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2013, Joinville. **Anais...** Joinville: [s. n.], 2013. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes22/cclxxii.pdf> Acesso em 30 ago. 2016

METCALF & EDDY INC. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. 4.ed. rev. New York: McGraw-Hill, 2003. 1819 p.

MONTOYA, M. A.; LOPES, R. L.; GUILHOTO, J. J. M. Desagregação setorial do balanço energético nacional a partir dos dados da matriz insumo-produto: uma avaliação metodológica. **Economia Aplicada**, São Paulo, v. 18, n. 3, p. 379-419, 2014.

NEVES, V.L.V. **Construção de biodigestor para a produção de biogás a partir da fermentação de esterco bovino**. 2010. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Biocombustíveis) - Faculdade Tecnológica de Araçatuba, Araçatuba, 2010.

NOGUEIRA, L. et al. **Disseminação de Informações em Eficiência Energética: cogeração**. Rio de Janeiro, 2004.

OLIVEIRA, R. D. E. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbica de dejetos em abatedouros e as possibilidades no mercado de carbono**. 2009. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. 98 p.

ORNELLAS, A. J. **A energia dos tempos antigos aos dias atuais**. Maceió: EDUFAL, 2006. 71 p. Série: Conversando sobre ciências em Alagoas. Disponível em: <http://www.usinaciencia.ufal.br/multimidia/livros-digitais-cadernos-tematicos/A_Energia_dos_Tempos_Antigos aos_dias_Atuais.pdf>. Acesso em: 01 set. 2016.

PACHECO, J. W. **Guia técnico ambiental de graxarias: guia técnico ambiental de graxarias - série P+L**. São Paulo: CETESB, 2006. 76 p. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 30 ago. 2016.

PAVAN, M. C. O. **Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil**. 2010. 186 f. Tese (Doutorado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. 186 p.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir de biogás de estação de tratamento de esgoto residencial da USP: estudo de caso**. 2006. 152 f. Dissertação (Mestrado em Energia - PIPGE) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PERSSON, M.; JÖNSSON, O.; WELLINGER, A. **Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection**. [S. l.]: IEA Bioenergy, Task 37 – Energy from Biogas and Landfill Gas, 2006.

PINAZZA, L. A. **Cadeia produtiva da soja**. Brasília, DF: MAPA, 2006. (Agronegócios, v. 2)

PINHEIRO, P. C. C. **Notas de aula: sistemas térmicos**. Belo Horizonte: UFMG, 2004. <<http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema003/gasosos/biogas/biogas.htm>>. Acesso em: 7 dez. 2011.

PINTO, R. O. **Avaliação da digestão anaeróbia na bioestabilização de resíduos sólidos orgânicos, lodos de tanques sépticos, dejetos suínos e lixiviado**. 2006. 233 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. 233 p.

POMPERMAYER, R. S.; PAULA JUNIOR, D. R. **Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos**. [S. l.: s. n.], 2000. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000200055&lng=en&nrm=abn. Acesso: 30 ago. 2016.

RIGO, M. M.; RAMOS, R. R.; CERQUEIRA, A. A.; SOUZA, P. S. A.; MARQUES, M. R. C. Destinação e reuso na agricultura do lodo de esgoto derivado do tratamento de águas residuárias domésticas no Brasil. **Gaia Scientia**, João Pessoa, v. 8, 2014. Disponível em: <<http://periodicos.ufpb.br/ojs2/index.php/gaia/index>>. Acesso em: 03 set. 2016.

ROSARIO, C. G. A. **Avaliação da disposição de lodo gerado numa estação de tratamento de água em reator anaeróbio de fluxo ascendente e manto de lodo (UASB)**. 2007. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SANTOS, D. Valorização energética de resíduos sólidos urbanos: materiais para caldeiras de centrais de incineração. **Ciência e Tecnologia dos Materiais**, Lisboa, v. 25, n. 2, p. 98-120, 2013.

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

SANTOS, T. M.; JÚNIOR, J. L. **Balanço energético em galpão de frangos de corte**. Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 25-36, 2004.

SCARASSATI, D.; CARVALHO, R. F.; DELGADO, V. L.; CONEGLIAN, C. M. R.; BRITO, N. N.; TONSO, S.; SOBRINHO, G. D.; PELEGRINI, R. Tratamento de efluentes de matadouros e frigoríficos. In: FÓRUM DE ESTUDOS CONTÁBEIS, 3., São Paulo. **Anais...** São Paulo: Claretianas, 2003. Disponível em: <http://www.universoambiental.com.br/novo/artigos_ler.php?canal>. Acesso em: 2 ago. 2016.

- SCHALCH, V.; LEITE, W. C. A.; JOSÉ JÚNIOR, L. F.; CASTRO, M. C. A. A. **Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos**. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2002. 97 p.
- SCHENINI, P. C. Gerenciamento de resíduos da agroindústria. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS E AGROINDUTSTRIAS, 2011, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: [s. n.], 2011. 6 p.
- SILVA, M. B; MORAIS, A. S. Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: [s. n.], 2008. p. 1-9.
- SILVEIRA, F. L. **Máquinas térmicas à combustão interna de Otto e de Diesel**. Porto Alegre: Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/fis183/textos/maquinas/maquinas.html>>. Acesso em: 20 jul. 2016.
- SIMONETTO, E. O.; LÖBLER, M. L. Simulação baseada em system dynamics para avaliação de cenários sobre geração e disposição de resíduos sólidos urbanos. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação, 9., v. 24, n. 1, pp. 212-224. 2013.
- SMITH, J. M.; NESS, H. C. V.; ABBOTT, M. M. **Introdução à termodinâmica da engenharia química**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 644 p.
- SOUZA, S. N. M.; VIEIRA, A. C.; SANTOS, R. F.; SECCO, D.; BARICATTI, R. A.; NOGUEIRA, C. E. C. Potencial de geração de bioeletricidade com casca de arroz no Brasil. **Cultivando o Saber**, Cascavel, v. 5, n. 1, p. 1-8, 2012.
- SPEECE, R. E. **Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters**. [S. l.]: Archa, 1995.
- SUNADA, N. S. **Efluente de abatedouro avícola: processos de biodigestão anaeróbica e compostagem**. 2011. 87 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2011. 87 p.
- SUNADA, N. S.; ORRICO, A. C. A.; JUNIOR, M. A. P. O.; CENTURION, S. R.; OLIVEIRA, A. B. M.; FERNANDES, A. R. M.; JORGE JUNIOR, L.; SENO, L. O. Compostagem de resíduo sólido de abatedouro avícola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 1, p. 178-183, 2015.
- SZMRECSANYI, T. Nota sobre o complexo agroindustrial e a industrialização da agricultura no Brasil. **Revista de Economia Política**, São Paulo, v. 3, p. 141-144, 1983.
- VAN WYLEN, G. J.; BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1995. 608 p.
- VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. 2012. 72 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - UNIOESTE, Cascavel, 2012.
- ZANETTE, A. L. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil**. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ZANIN, A.; BAGATINI, F. M.; PESSATTO, C. B. Viabilidade econômico-financeira de implantação de biodigestor: uma alternativa para reduzir os impactos ambientais causados pela suinocultura. **Revista Custos e Agronegócio**, Chapecó, v. 6, n. 1, p. 1-19, 2010.

WU, W. **Anaerobic co-digestion of biomass for methane production**: recent research achievements optimization. [S. l.: s. n.], 2007. Disponível em: <<http://home.engineering.iastate.edu>>. Acesso em: 13 ago. 2016.