

**ADRIANO HENRIQUE FERRAREZ**

**SOLUÇÕES ENERGÉTICAS PARA AS CADEIAS PRODUTIVAS DE FRANGO DE  
CORTE E DA SUINOCULTURA NA ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2015

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

F374s  
2015 Ferrarez, Adriano Henrique, 1977-  
Soluções energéticas para as cadeias produtivas de frango  
de corte e suinocultura na Zona da Mata de Minas Gerais /  
Adriano Henrique Ferrarez. – Viçosa, MG, 2015.  
xxxiv, 362f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Delly Oliveira Filho.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Energia e agricultura. 2. Recursos energéticos -  
Planejamento. 3. Energia - Fontes alternativas. 4. Biogás.  
5. Resíduos agrícolas. 6. Desenvolvimento Sustentável.  
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia  
Agrícola. Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola.  
II. Título.

CDD 22. ed. 333.954098151

**ADRIANO HENRIQUE FERRAREZ**

**SOLUÇÕES ENERGÉTICAS PARA AS CADEIAS PRODUTIVAS DE FRANGO DE  
CORTE E DA SUINOCULTURA NA ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 26 de agosto de 2015

---

Luis Manuel Navas Gracia  
Co-orientador

---

Paulo Marcos Barros Monteiro

---

Romeu e Silva Neto

---

Jadir Nogueira da Silva

---

Delly Oliveira Filho  
Orientador

Para minha companheira Renata e para  
nossos filhos Isabella e João Francisco.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe que sempre batalhou para que eu pudesse estudar. Se eu cheguei até aqui foi graças ao esforço da minha “véia”. Agradeço ao meu pai (in memoriam) que na sua simplicidade de camponês tinha orgulho de ter um filho “cientista”. A minha irmã Adriana por ser essa pessoa especial que sempre esteve do meu lado. Ao meu cunhado Célio e meus sobrinhos Rebeca e Isaque.

Ao Prof. Delly Oliveira Filho pela amizade, confiança e orientação.

Ao Prof. Luis Manuel Navas pela acolhida na Universidad de Valladolid, pela confiança e orientação.

Aos professores conselheiros Aziz Galvão da Silva Jr. e Roberto Precci Lopes pela orientação e sugestões.

Ao “Vizconde” de Minñon, Jorge Miñon Martinez por sua ajuda imprescindível para a realização desse trabalho. Ao Gonzalo Ruiz companheiro de “despacho” na Universidad de Valladolid pelas assistências técnicas e “clases” de español.

À família do Prof. Luis Manuel Navas, sua esposa Adriana e suas filhas Lorena e Luísa pela atenção, amizade e carinho com que trataram a minha família.

À família de Marta Pereira (Aroa, Sara, Amin, Noemi, Juan Carlos, Dona Raquel e Vivi) em nome de quem agradeço a todo o povo espanhol pela acolhida e hospitalidade.

Ao Colégio Público Marqués de Santillana (Palencia) e a toda a sua comunidade pela atenção que deram aos meus filhos. Um agradecimento especial ao Prof. Pedro Diez um daqueles professores que inspiram seus alunos como dizia Paulo Freire.

Agradeço ao colega de doutorado Gustavo Azevedo Xavier, pela acolhida em sua República em Viçosa e por me representar oficialmente junto à UFV durante meu afastamento para o doutorado-sanduiche, como prometido trouxe de “regalo”

sua camisa do Barça. À Vânia Reis que me acompanhou na viagem quixotesca de julho de 2012 em que percorremos metade da Espanha prospectando parcerias e oportunidades para os nossos futuros doutorados-sanduíches e demos muitas gargalhadas. Ao grande Aurélio Gouvêia de Melo, “MacGyver”, pela força que me deu na montagem dos experimentos de instrumentação. À Leandrita Altoé outra “señorita” que se aventurou nas terras de Lorca e Gabriel Celaya. À estagiária Natália Silva Souza pelas traduções de artigos para o inglês e apresentação de trabalhos em congressos e seminários.

A todos os servidores e professores do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial ao Délio Duarte pela gentileza e presteza com que zela pela nossa vida acadêmica.

Agradeço à Universidade Federal de Viçosa, por contribuir durante 20 anos para minha formação científica, cidadã e humana.

À Universidad de Valladolid pela honra que me concedeu de poder me especializar nesta instituição com mais de 800 anos.

Ao programa de doutorado em Ciencia e Ingeniería Agroalimentaria y de Biosistemas da Universidad de Valladolid e seus professores.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense (IF-Fluminense) pelo apoio aos meus estudos e a todos os companheiros do Campus Itaperuna.

Aos meus sogros Romeu e Esmeralda pela hospedagem e acolhida que me deram nos primeiros tempos de doutorado em sua casa na roça.

Ao povo trabalhador do Brasil “que segue em frente e segura o rojão” minha eterna gratidão. Prometo esforçar-me para retribuir o investimento que foi realizado em mim por meio do Programa Ciência sem Fronteiras do governo brasileiro e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## **BIOGRAFIA**

Adriano Henrique Ferrarez, filho de Amandio Ferrarez e Maria José de Medeiros Ferrarez nasceu em 19 de fevereiro de 1977 em Muriaé, Minas Gerais.

Ingressou no curso de Física da Universidade Federal de Viçosa em 1995. Militou no movimento estudantil universitário e foi o primeiro estudante eleito vereador na cidade de Viçosa exercendo seu mandato de 2001 a 2004. Em 10 de maio de 2002 graduou-se pela UFV.

Exerceu o magistério nas escolas Dr. Raimundo Alves Torres, Raul de Leoni, Ministro Edmundo Lins, José Lourenço de Freitas (Fundão), Colégio Anglo, Pré-Vestibular Exitus, na Universidade Presidente Antônio Carlos – UNIPAC em Ponte Nova e na Universidade Federal de Viçosa.

Em 2007 foi admitido como estudante regular do Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, na área de Energia na Agricultura, no Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, defendendo sua dissertação em novembro de 2009.

Em janeiro de 2009 tomou posse no cargo de Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense (IF-Fluminense) no Campus Itaperuna.

Em novembro de 2009 concluiu o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, defendendo sua dissertação.

Em agosto de 2011 foi admitido como estudante regular do Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, na área de Energia na Agricultura, no Departamento de Engenharia Agrícola da UFV. De setembro de 2013 a julho de 2015, foi estudante de doutorado-sanduiche na Universidad de Valladolid – Espanha, com bolsa do Programa Ciência sem Fronteiras do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Submeteu-se a defesa da tese de doutorado em agosto de 2015.

## SUMÁRIO

Lista de Abreviaturas.....	X
Lista de Figuras.....	xii
Lista de Quadros.....	xxi
Resumo.....	xxvi
Abstract.....	xxix
Resumen.....	xxxii
1. CAPÍTULO 1 – RESUMEN PROLONGADO .....	3
1.1. Referencias:.....	17
2. CAPÍTULO 2 – INTRODUÇÃO GERAL.....	23
2. 1. Considerações iniciais .....	24
2.1.1. Energias renováveis no Brasil.....	26
2.1.2. Produção agropecuária no Brasil.....	26
2.1.3. Codigestão anaeróbia .....	27
2.1.4. Biofertilizante .....	29
2.1.5. A Zona da Mata de Minas Gerais.....	30
2.2. Limitações .....	31
2.3. Estrutura da Tese .....	32
2.4. Originalidade do Trabalho .....	33
2.5. Referências Bibliográficas .....	35
3. CAPÍTULO 3 – Estado da arte da codigestão anaeróbia de resíduos agropecuários e das políticas públicas para a geração de energia com biogás/biometano .....	39
3.1. Introdução.....	41
3.2. Material e Métodos .....	43
3.3. Resultados e Discussão .....	44
3.3.1. Digestão Anaeróbia.....	44
3.3.2. Codigestão anaeróbia .....	45

3.3.3. Estado da arte do biogás em países da União Europeia: .....	57
3.3.4. Biometano .....	58
3.3.5. Políticas Públicas de incentivo à produção do biogás/biometano em países da União Europeia e no Brasil .....	60
3.4. Conclusão.....	68
3.5. Referências Bibliográficas .....	69
4. CAPÍTULO 4 – Ferramenta computacional para estimar a produção de biometano e energia a partir de resíduos agropecuários .....	75
4.1. Introdução.....	77
4.2. Material e métodos .....	79
4.2.1. Ferramenta Computacional SAUDADE .....	79
4.2.2. Fonte de Dados:.....	80
4.2.3. Funcionamento da ferramenta .....	80
4.2.4. Aplicação da ferramenta SAUDADE no dimensionamento do Condomínio de agroenergia de Urucânia.....	107
4.3. Resultados e discussão.....	111
4.3.1. Granjas do Condomínio de Agroenergia de Urucânia.....	111
4.3.2. Resíduos agropecuários disponíveis no município de Urucânia .....	112
4.3.3. Produção de biometano e energia no Condomínio de Urucânia.....	113
4.3.4. Produção de biofertilizante no Condomínio de Agroenergia de Urucânia. ....	115
4.3.5. Mitigação das emissões de CO <sub>2</sub> no Condomínio de agroenergia de Urucânia .....	116
4.3.6. Transporte de biometano e de resíduos por dutos e por estradas.....	116
4.3.7. Análise Econômica.....	119
4.4. Conclusão.....	126
4.5. Referências bibliográficas.....	127
5. CAPÍTULO 5 – Inserção da energia do biometano produzido a partir de resíduos agropecuários na Zona da Mata de Minas Gerais .....	132
5.1. INTRODUÇÃO .....	134
5.1.1. Geração de Eletricidade na Zona da Mata de Minas Gerais.....	134
5.1.2. Energia e Desenvolvimento .....	136
5.1.3. Cultivos agrícolas na Zona da Mata de Minas Gerais.....	138

5.1.4. Suinocultura na Zona da Mata de Minas Gerais .....	138
5.1.5. Avicultura na Zona da Mata de Minas Gerais .....	140
5.1.6. Impactos Ambientais da Suinocultura e Avicultura .....	140
5.1.7. Energia na Agropecuária da Zona da Mata de Minas Gerais .....	141
5.2. Material e métodos .....	144
5.2.1. Fonte de dados .....	144
5.2.2. Aplicação da ferramenta SAUDADE .....	144
5.3. Resultados e discussão .....	155
5.3.1. Produção de dejetos de suínos e frango de corte na Zona da Mata de Minas Gerais .....	155
5.3.2. Suinocultura .....	157
5.3.3. Avicultura .....	162
5.4. Conclusão.....	169
5.5. Referências bibliográficas.....	171
6. CAPÍTULO 6 – Potencial energético da codigestão anaeróbia em granjas de suínos e frangos na Zona da Mata de Minas Gerais .....	176
6.1. Introdução.....	178
6.1.1. Granjas de suínos na Zona da Mata de Minas Gerais .....	178
6.1.2. Granjas de frangos na Zona da Mata de Minas Gerais.....	179
6.1.3. Suinocultura, avicultura e o meio ambiente .....	181
6.2. Materiais e Métodos .....	183
6.2.1. Granjas de Suínos .....	183
6.2.2. Granjas de Frangos de Corte.....	185
6.3. Resultados e Discussão .....	189
6.3.1. Granjas de Suínos .....	189
6.3.2. Granjas de Frangos .....	208
6.4. Conclusões.....	231
6.5. Referências Bibliográficas .....	233
7. CAPÍTULO 7 – Condomínios de agroenergia na Zona da Mata de Minas Gerais.....	235
7.1. Introdução.....	237
7.1.1. Condomínios de agroenergia .....	237

7.2. Material e Métodos .....	239
7.2.1. Condomínio de Suínos.....	239
7.2.2. Condomínio de Frangos.....	240
7.2.3. Cenários.....	240
7.3. Resultados e Discussão .....	242
7.3.1. Condomínio Faria Lemos.....	242
7.3.2. Condomínio Piranga .....	256
7.3.3. Condomínio Jequeri .....	270
7.3.4. Condomínio Leopoldina .....	285
7.3.5. Condomínio Piraúba .....	298
7.3.6. Condomínio São Miguel do Anta .....	316
7.4. Conclusões.....	336
7.5. Referências Bibliográficas .....	337
8. CAPÍTULO 8 – CONCLUSÃO GERAL.....	339
8.1. Conclusões.....	340
8.1.1. Estado da arte da codigestão anaeróbia e de políticas públicas para o biogás/biometano.....	340
8.1.2. Ferramenta Computacional para avaliação do potencial de produção de biometano a partir de resíduos agropecuários.....	340
8.1.3. Inserção da energia do biometano na matriz energética da Zona da Mata de Minas Gerais.....	341
8.1.4. Potencial energético da codigestão anaeróbia em granjas de suínos e frangos na Zona da Mata de Minas Gerais.....	341
8.5. Condomínios de agroenergia na Zona da Mata de Minas Gerais.....	342
8.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	343
9. Bibliográficas Geral .....	343

## ABREVIATURAS

ANDA: Associação Nacional para Difusão de Adubos  
ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica  
ANP: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis  
BNDES: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social  
C/N: Relação Carbono Nitrogênio  
CEMIG: Companhia Energética de Minas Gerais  
CER: Certificados de Emissões Reduzidas  
CH<sub>4</sub>: metano  
CHP: Combined Heat and Power  
CNPq: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico  
CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono  
DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio  
DQO: Demanda Química de Oxigênio  
EBA: Associação Europeia de Biogás  
EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
FEC: Fator de Emissão de CO<sub>2</sub>  
IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IDH: Índice de Desenvolvimento Humano  
IDHM: Índice de Desenvolvimento Humano Municipal  
IF-Fluminense: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense  
IMA: Instituto Mineiro de Agropecuária  
N P K: Nitrogênio Fósforo Potássio  
OCDE: Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico  
PCH: Pequena Central Hidrelétrica  
pH: Potencial de hidrogênio  
PIB: Produto interno Bruto  
PP: Período de Payback  
SAC: Sistema de Acumulação Constante

SAUDADE: Sistema de Avaliação do Uso da Digestão Anaeróbia para o Dimensionamento Energético

SIG: Sistema de Informação Geográfica

ST: Sólidos Totais

SV: Sólidos Voláteis

TIR: Taxa Interna de Retorno

TRH: Tempo de Retenção Hidráulica

UFV: Universidade Federal de Viçosa

UHE: Usinas Hidrelétricas

VPL: Valor Presente Líquido

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Planta de codigestión.....	5
Figura 1.2 : Diagrama de flujo de la herramienta computacional S.A.U.D.A.D.E....	11
Figura 1.3 : Mesorregión de Zona da Mata de Minas Gerais.....	12
Figura 1.4 : Número de granjas em función de la cantidad de porcinos.....	13
Figura 1.5 : Número de granjas em función de la cantidad de polos.....	14
Figura 2.1 : Participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira de 2009 a 2013 .....	24
Figura 2.2 : Oferta interna de energia elétrica no Brasil.....	25
Figura 2.3 Produção, importação e consumo total de fertilizantes no Brasil.....	29
Figura 2.4 : Mesorregião da Zona da Mata de Minas Gerais.....	30
Figura 3.1 : Esquema da digestão anaeróbia.....	44
Figura 3.2 : Usina de codigestão.....	50
Figura 3.3: Usinas de biogás instaladas em países da União Européia.....	58
Figura 4.1 : Fluxograma da Ferramenta Computacional SAUDADE.....	79
Figura 4.2 : Fluxograma representando a geração do caminho de menor custo para o duto.....	98
Figura 4.3 : Fluxograma representando a geração das tabelas de altitude e coordenadas geográficas do caminho de menor custo.....	99
Figura 4.4 : Conceito do gasoduto.....	102
Figura 4.5 : Conceito do residuoduto.....	102
Figura 4.6 : Localização de Urucânia na Zona da Mata de Minas Gerais.....	108
Figura 4.7 : Localização das granjas de suínos no município de Urucânia.....	112
Figura 4.8 : Produção de biometano por substrato.....	113
Figura 4.9 : Produção de biometano e potência elétrica.....	114
Figura 4.10 : Energia elétrica produzida.....	114
Figura 4.11 : Produção de biofertilizando no Condomínio de Agroenergia de Urucânia.....	115
Figura 4.12 : Potencial de mitigação das emissões de CO2.....	116
Figura 4.13 : Traçado dos dutos no município de Urucânia.....	118

Figura 4.14 : Custo de produção de energia elétrica para diferentes modais de transporte no Condomínio de Agroenergia de Urucânia.....	118
Figura 4.15 : VPL para os cenários sem codigestão.....	121
Figura 4.16 : VPL para os cenários de codigestão com 1% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.....	122
Figura 4.17 : VPL para os cenários de codigestão com 2,0% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.....	123
Figura 4.18 : VPL para os cenários de codigestão com 3,0% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.....	124
Figura 4.19 : Aumento na produção de biometano com a codigestão.....	125
Figura 5.1 : Consumo per capita de energia elétrica para os países da OCDE, Brasil, Minas Gerais e Zona da Mata referente ao ano de 2011.....	137
Figura 5.2 : Estabelecimentos com geração própria de energia elétrica por fonte.....	142
Figura 5.3 : Produção de biometano com dejetos de suínos e resíduos vegetais...	158
Figura 5.4 : Estimativa da potência elétrica produzida a partir dos dejetos da suinocultura.....	159
Figura 5.5 : Estimativa da potência elétrica produzida a partir da codigestão dos resíduos agropecuários.....	160
Figura 5.6 : Consumo de energia elétrica per capita na Zona da Mata de Minas Gerais com o aproveitamento energético de dejetos suínos e resíduos vegetais.....	162
Figura 5.7 : Produção de biometano com dejetos de frangos e resíduos vegetais.....	163
Figura 5.8 : Estimativa da potência elétrica produzida a partir dos dejetos da avicultura.....	164
Figura 5.9 : Estimativa da potência elétrica produzida a partir da codigestão dos resíduos agropecuários.....	165
Figura 5.10 : Consumo de energia elétrica per capita na Zona da Mata de Minas Gerais com o aproveitamento energético de dejetos de frangos e resíduos vegetais.....	167
Figura 6.1 : Polos produtores de suínos no estado de Minas Gerais.....	178
Figura 6.2 : Número de granjas em função do plantel de suínos.....	179
Figura 6.3 : Polos de produção de frango de corte no estado de Minas Gerais.....	180

Figura 6.4 : Número de granjas em função do plantel de frangos.....	181
Figura 6.5 : Localização dos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri na Zona da Mata de Minas Gerais.....	183
Figura 6.6 : Localização dos municípios de Miraf, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora na Zona da Mata de Minas Gerais .....	186
Figura 6.7 : Produção de biometano em granjas dos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri.....	190
Figura 6.8 : Produção de metano por substrato para uma granja com 500 suínos no município de Muriaé.....	191
Figura 6.9 : Produção de metano por substrato para uma granja com 500 suínos no município de Juiz de Fora.....	192
Figura 6.10 : Produção de metano por substrato para uma granja com 500 suínos no município de Jequeri.....	192
Figura 6.11 : Produção de metano por substrato para uma granja com 2.500 suínos no município de Muriaé.....	193
Figura 6.12 : Produção de metano por substrato para uma granja com 2.500 suínos no município de Juiz de Fora.....	194
Figura 6.13 : Produção de metano por substrato para uma granja com 2.500 suínos no município de Jequeri.....	194
Figura 6.14 : Potência e energia elétrica gerada em granjas dos municípios de Muriaé e Juiz de Fora.....	196
Figura 6.15 : Potência e energia elétrica gerada em granjas dos municípios de Juiz de Fora e Jequeri.....	197
Figura 6.16 : Produção de biofertilizante em granja com 500 suínos nos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri.....	198
Figura 6.17 : Produção de biofertilizante em granja com 2.500 suínos nos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri.....	199
Figura 6.18 : Potencial de toneladas de dióxido de carbono para granjas de suínos nos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri.....	200
Figura 6.19 : Custo de produção de energia elétrica com codigestão de resíduos agropecuárias em granjas com 500, 2.500, 5.000, 10.000, 15.000, 20.000, 25.000 e 60.000 suínos nos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri.....	202
Figura 6.20 : VPL para os cenários sem codigestão em granjas com 500, 2.500, 5.000 e 10.000 suínos.....	204

Figura 6.21 : VPL para os cenários sem codigestão em granjas com 15.000, 20.000, 25.000 e 60.000 suínos.....	205
Figura 6.22 : VPL para os cenários com codigestão em granja com 500 suínos com razão resíduos vegetais/dejetos de suínos igual a 5%.....	206
Figura 6.23 : VPL para os cenários com codigestão em granja com 2.500 suínos com razão resíduos vegetais/dejetos de suínos igual a 5%.....	207
Figura 6.24 : Produção de biometano em granjas dos municípios de Miraf, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.....	209
Figura 6.25 : Produção de metano por substrato para uma granja com 10.000 frangos no município de Miraf.....	210
Figura 6.26 : Produção de metano por substrato para uma granja com 10.000 frangos no município de São Pedro dos Ferros.....	210
Figura 6.27 : Produção de metano por substrato para uma granja com 10.000 frangos no município de Juiz de Fora.....	211
Figura 6.28 : Produção de metano por substrato para uma granja com 20.000 frangos no município de Miraf.....	212
Figura 6.29 : Produção de metano por substrato para uma granja com 20.000 frangos no município de São Pedro dos Ferros.....	212
Figura 6.30 : Produção de metano por substrato para uma granja com 20.000 frangos no município de Juiz de Fora.....	213
Figura 6.31 : Produção de metano por substrato para uma granja com 30.000 frangos no município de Miraf.....	214
Figura 6.32 : Produção de metano por substrato para uma granja com 30.000 frangos no município de São Pedro dos Ferros.....	215
Figura 6.33 : Produção de metano por substrato para uma granja com 30.000 frangos no município de Juiz de Fora.....	215
Figura 6.34 : Potência e energia elétrica gerada em granjas dos municípios de Miraf, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.....	217
Figura 6.35 : Produção de biofertilizante em granja com 10.000 frangos nos municípios de Miraf, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.....	218
Figura 6.36 : Produção de biofertilizante em granja com 20.000 frangos nos municípios de Miraf, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.....	219

Figura 6.37 : Produção de biofertilizante em granja com 30.000 frangos nos municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.....	220
Figura 6.38 : Potencial de toneladas de dióxido de carbono para granjas de frangos nos municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.....	221
Figura 6.39 : Custo de produção de energia elétrica com codigestão de resíduos agropecuárias em granjas com com 10.000, 20.000, 30.000, 50.000, 80.000 e 150.000 frangos nos municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.....	223
Figura 6.40 : VPL para os cenários sem codigestão em granjas com 10.000, 20.000 e 30.000 frangos.....	225
Figura 6.41 : VPL para os cenários sem codigestão em granjas com 50.000, 80.000 e 150.000 frangos.....	226
Figura 6.42 : VPL para os cenários com codigestão em granja com 10.000 frangos com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 5%.....	227
Figura 6.43 : VPL para os cenários com codigestão em granja com 10.000 frangos com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 10%.....	228
Figura 6.44 : VPL para os cenários com codigestão em granjas com 10.000 frangos com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 20%.....	229
Figura 6.45 : VPL para os cenários com codigestão em granjas com 10.000 frangos com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 20%.....	230
Figura 7.1 : Localização de Faria Lemos na Zona da Mata de Minas Gerais.....	242
Figura 7.2 : Localização das granjas de suínos no município de Faria Lemos.....	243
Figura 7.3 : Produção de biometano por substrato.....	244
Figura 7.4 : Produção de biometano e potência elétrica.....	245
Figura 7.5 : Energia elétrica produzida.....	245
Figura 7.6 : Produção de biofertilizando no Condomínio de Agroenergia de Faria Lemos.....	246
Figura 7.7 : Potencial de mitigação das emissões de CO <sub>2</sub> .....	247
Figura 7.8 : Traçado dos dutos no município de Jequeri.....	249
Figura 7.9 : Custo de produção de energia elétrica para diferentes modais de transporte no Condomínio de Agroenergia de Faria Lemos.....	250
Figura 7.10 : VPL para os cenários sem codigestão.....	251
Figura 7.11 : VPL para os cenários de codigestão com 0,5% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.....	252

Figura 7.12 : VPL para os cenários de codigestão com 1,0% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.....	253
Figura 7.13 : VPL para os cenários de codigestão com 1,5% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.....	254
Figura 7.14 : VPL para os cenários de codigestão com 2,0% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.....	255
Figura 7.15 : Aumento na produção de biometano com a codigestão.....	255
Figura 7.16 : Localização de Piranga na Zona da Mata de Minas Gerais.....	256
Figura 7.17 : Localização das granjas de suínos no município de Piranga.....	258
Figura 7.18 : Produção de biometano por substrato.....	259
Figura 7.19 : Produção de biometano e potência elétrica.....	260
Figura 7.20 : Energia elétrica produzida.....	260
Figura 7.21 : Produção de biofertilizando no Condomínio de Agroenergia de Piranga.....	261
Figura 7.22 : Potencial de mitigação das emissões de CO <sub>2</sub> .....	262
Figura 7.23 : Traçado dos dutos no município de Piranga.....	264
Figura 7.24 : Custo de produção de energia elétrica para diferentes modais de transporte no Condomínio de Agroenergia de Piranga.....	265
Figura 7.25 : VPL para os cenários sem codigestão.....	266
Figura 7.26 : VPL para os cenários de codigestão com 0,5% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.....	267
Figura 7.27 : VPL para os cenários de codigestão com 1,0% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.....	268
Figura 7.28 : VPL para os cenários de codigestão com 1,5% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.....	269
Figura 7.29 : Aumento na produção de biometano com a codigestão.....	270
Figura 7.30 : Localização de Jequeri na Zona da Mata de Minas Gerais.....	271
Figura 7.31 : Localização das granjas de suínos no município de Jequeri.....	272
Figura 7.32 : Produção de biometano por substrato.....	273
Figura 7.33 : Produção de biometano e potência elétrica.....	273
Figura 7.34 : Energia elétrica produzida.....	274
Figura 7.35 : Produção de biofertilizando no Condomínio de Agroenergia de Jequeri.....	275
Figura 7.36 : Potencial de mitigação das emissões de CO <sub>2</sub> .....	276

Figura 7.37 : Traçado dos dutos no município de Jequeri.....	278
Figura 7.38 : Custo de produção de energia elétrica para diferentes modais de transporte no Condomínio de Agroenergia de Jequeri.....	279
Figura 7.39 : VPL para os cenários sem codigestão.....	280
Figura 7.40 : VPL para os cenários de codigestão com 0,5% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.....	281
Figura 7.41 : VPL para os cenários de codigestão com 1,0% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.....	282
Figura 7.42 : VPL para os cenários de codigestão com 1,5% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.....	283
Figura 7.43 : VPL para os cenários de codigestão com 2,0% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.....	284
Figura 7.44 : Aumento na produção de biometano com a codigestão.....	284
Figura 7.45 : Localização de Leopoldina na Zona da Mata de Minas Gerais.....	285
Figura 7.46 : Localização das granjas de suínos no município de Leopoldina.....	286
Figura 7.47 : Produção de biometano por substrato.....	287
Figura 7.48 : Produção de biometano e potência elétrica.....	288
Figura 7.49 : Energia elétrica produzida.....	289
Figura 7.50 : Produção de biofertilizante no Condomínio de Agroenergia de Leopoldina.....	290
Figura 7.51 : Potencial de mitigação das emissões de CO <sub>2</sub> .....	291
Figura 7.52 : Traçado dos dutos no município de Leopoldina.....	292
Figura 7.53 : Custo de produção de energia elétrica para diferentes modais de transporte no Condomínio de Agroenergia de Leopoldina.....	293
Figura 7.54 : VPL para os cenários sem codigestão.....	294
Figura 7.55 : VPL para os cenários de codigestão com 5% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.....	295
Figura 7.56 : VPL para os cenários de codigestão com 10% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.....	296
Figura 7.57 : VPL para os cenários de codigestão com 15% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.....	297
Figura 7.58 : Aumento na produção de biometano com a codigestão.....	298
Figura 7.59 : Localização de Piraúba na Zona da Mata de Minas Gerais.....	299
Figura 7.60 : Localização das granjas de frangos no município de Piraúba.....	300

Figura 7.61 : Produção de biometano por substrato.....	301
Figura 7.62 : Produção de biometano e potência elétrica.....	302
Figura 7.63 : Energia elétrica produzida.....	302
Figura 7.64 : Produção de biofertilizante no Condomínio de Agroenergia de Piraúba.....	303
Figura 7.65 : Potencial de mitigação das emissões de CO <sub>2</sub> .....	304
Figura 7.66 : Traçado dos dutos no município de Piraúba.....	306
Figura 7.67 : Custo de produção de energia elétrica para diferentes modais de transporte no Condomínio de Agroenergia de Piraúba.....	307
Figura 7.68 : VPL para os cenários sem codigestão.....	308
Figura 7.69 : VPL para os cenários de codigestão com 1,0% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.....	309
Figura 7.70 : VPL para os cenários de codigestão com 2,0% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.....	310
Figura 7.71 : VPL para os cenários de codigestão com 3,0% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.....	311
Figura 7.72 : VPL para os cenários de codigestão com 4,0% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.....	312
Figura 7.73 : VPL para os cenários de codigestão com 5,0% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.....	313
Figura 7.74 : VPL para os cenários de codigestão com 6,0% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.....	314
Figura 7.75 : VPL para os cenários de codigestão com 7,0% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.....	315
Figura 7.76 : Aumento na produção de biometano com a codigestão.....	316
Figura 7.77 : Localização de São Miguel do Anta na Zona da Mata de Minas Gerais.....	317
Figura 7.78 : Localização das granjas de frangos no município de São Miguel do Anta.....	319
Figura 7.79 : Produção de biometano por substrato.....	320
Figura 7.80 : Produção de biometano e potência elétrica.....	321
Figura 7.81 : Energia elétrica produzida.....	321
Figura 7.82 : Produção de biofertilizando no Condomínio de Agroenergia de São Miguel do Anta.....	322

Figura 7.83 : Potencial de mitigação das emissões de CO <sub>2</sub> .....	323
Figura 7.84 : Traçado dos dutos no município de São Miguel do Anta Estradas....	326
Figura 7.85 : Custo de produção de energia elétrica para diferentes modais de transporte no Condomínio de Agroenergia de São Miguel do Anta.....	328
Figura 7.86 : VPL para os cenários sem codigestão.....	329
Figura 7.87 : VPL para os cenários de codigestão com 1,0% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.....	330
Figura 7.88 : VPL para os cenários de codigestão com 2,0% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.....	331
Figura 7.89 : VPL para os cenários de codigestão com 3,0% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.....	332
Figura 7.90 : VPL para os cenários de codigestão com 4,0% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.....	333
Figura 7.91 : VPL para os cenários de codigestão com 5,0% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.....	334
Figura 7.92 : Aumento na produção de biometano com a codigestão.....	334

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 : Área plantada e produção de culturas permanentes no Brasil.....	26
Quadro 2.2 : Área plantada e produção de culturas temporárias no Brasil.....	26
Quadro 2.3 : Rebanho efetivo das principais criações do Brasil.....	27
Quadro 3.1 : Composição da mistura gasosa do biogás.....	41
Quadro 4.1 : Informações obtidas a partir das Pesquisas Pecuária Municipal e Agrícola Municipal do IBGE.....	80
Quadro 4.2 : Potencial de metano de resíduos agropecuários.....	83
Quadro 4.3 : Eficiência do conjunto motor-gerador de acordo com a produção de metano.....	85
Quadro 4.4 : Custo de capital dos empreendimentos.....	90
Quadro 4.5 : Custos operacionais.....	90
Quadro 4.6 : Custos Logísticos Típicos.....	91
Quadro 4.7 : Potencial de nutrientes nos resíduos.....	93
Quadro 4.8 : Preços nutrientes (N P K).....	95
Quadro 4.9 : Informações para dimensionamento dos condomínios de agroenergia.....	96
Quadro 4.10 : Custo de produção do gasoduto/residuoduto.....	103
Quadro 4.11 : Quantidade de granjas e rebanho efetivo do município.....	108
Quadro 4.12 : Área plantada e produção de café, feijão, milho e cana-de-açúcar.....	109
Quadro 4.13 : Cenários simulados.....	109
Quadro 4.14 : Granjas e suas respectivas quantidades de suínos e produção de dejetos no município de Urucânia.....	111
Quadro 4.15 : Resíduos de cultivos vegetais disponíveis no município de Urucânia.....	113
Quadro 4.16 : Comprimento dos dutos dimensionados para o Condomínio de Agroenergia de Urucânia.....	117
Quadro 4.17 : Comprimento das rotas de transporte dos resíduos de suínos por estradas.....	119

Quadro 5.1 : Pequenas Centrais Hidrelétricas instaladas na região da Zona da Mata de Minas Gerais e suas respectivas potências.....	134
Quadro 5.2 : Consumo de energia per capita nas microrregiões da Zona da Mata de Minas Gerais, ano 2012.....	136
Quadro 5.3 : Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) para os municípios da Zona da Mata de Minas Gerais, ano 2013.....	137
Quadro 5.4 : Área plantada e produção de café, feijão, milho e cana-de-açúcar, ano de 2012.....	138
Quadro 5.5 : Rebanho efetivo de suínos da Zona da Mata de Minas Gerais, ano de 2012.....	139
Quadro 5.6 : Rebanho efetivo de frangos da Zona da Mata de Minas Gerais, ano de 2012.....	140
Quadro 5.7 : Consumo de combustíveis nos estabelecimentos agropecuários da Zona da Mata de Minas Gerais.....	142
Quadro 5.8 : Rendimento do conjunto motor-gerador.....	153
Quadro 5.9 : Tempo de operação da usina.....	154
Quadro 5.10 : Produção de dejetos suínos e de frangos por microrregião.....	155
Quadro 5.11 : Resíduos vegetais disponíveis na Zona da Mata de Minas Gerais.....	156
Quadro 5.12 : Potencial de produção de biometano e de energia.....	156
Quadro 5.13 : Estimativa da potência elétrica gerada a partir dos dejetos da suinocultura e resíduos vegetais por microrregião da Zona da Mata de Minas Gerais.....	159
Quadro 5.14 : Comparação da potência elétrica gerada com biometano (de dejetos de suínos e resíduos vegetais) com hidrelétricas.....	161
Quadro 5.15 : Produção de energia elétrica a partir do biometano de dejetos suínos e resíduos vegetais.....	161
Quadro 5.16 : Estimativa da potência elétrica gerada com biometano produzido a partir dos dejetos da avicultura e resíduos agropecuários por microrregião da Zona da Mata de Minas Gerais.....	164
Quadro 5.17 : Comparação da potência elétrica gerada com biometano (de dejetos de frangos e resíduos vegetais) com hidrelétricas.....	166
Quadro 5.18 : Produção de energia elétrica a partir do biometano de dejetos suínos e resíduos vegetais.....	167

Quadro 6.1 : Rebanho efetivo e quantidade de suínos na maior granja do município.....	184
Quadro 6.2 : Área plantada e produção de café, feijão, milho e cana-de-açúcar.....	184
Quadro 6.3 : Rebanho efetivo e quantidade de frangos na maior granja do município.....	186
Quadro 6.4 : Área plantada e produção de café, feijão, milho e cana-de-açúcar.....	187
Quadro 6.5 : Cenários Simulados.....	188
Quadro 6.6 : Produção de dejetos suínos nas granjas simuladas.....	189
Quadro 6.7 : Resíduos de cultivos vegetais disponíveis nos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri.....	189
Quadro 6.8 : Consumo de energia elétrica para a produção de suínos.....	195
Quadro 6.9 : Emissão e mitigação de CO <sub>2</sub> eq. com geração de eletricidade.....	201
Quadro 6.10 : Produção de dejetos de frangos nas granjas simuladas.....	208
Quadro 6.11 : Resíduos de cultivos vegetais disponíveis nos municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.....	208
Quadro 6.12 : Consumo de energia elétrica para a produção de frangos.....	216
Quadro 6.13 : Emissão e mitigação de CO <sub>2</sub> eq. com geração de eletricidade.....	222
Quadro 7.1 : Quantidade de granjas e rebanho efetivo do município.....	239
Quadro 7.2 : Área plantada e produção de café, feijão, milho e cana-de-açúcar.....	239
Quadro 7.3 : Quantidade de granjas e rebanho efetivo do município.....	240
Quadro 7.4 : Área plantada e produção de café, feijão, milho e cana-de-açúcar.....	240
Quadro 7.5 : Cenários simulados.....	241
Quadro 7.6 : Granjas e suas respectivas quantidades de suínos e produção de dejetos no município de Faria Lemos.....	243
Quadro 7.7 : Resíduos de cultivos vegetais disponíveis no município de Faria Lemos.....	244
Quadro 7.8 : Intensidade do uso de fertilizantes por culturas no município de Faria Lemos.....	247

Quadro 7.9 : Comprimento dos dutos dimensionados para o Condomínio de Agroenergia de Jequeri.....	248
Quadro 7.10 : Comprimento das rotas de transporte dos resíduos de suínos por estradas.....	249
Quadro 7.11 : Granjas e suas respectivas quantidades de suínos e produção de dejetos no município de Piranga.....	257
Quadro 7.12 : Resíduos de cultivos vegetais disponíveis no município de Piranga.....	258
Quadro 7.13 : Intensidade de uso fertilizantes por culturas no município de Piranga.....	261
Quadro 7.14 : Comprimento dos dutos dimensionados para o Condomínio de Agroenergia de Piranga.....	263
Quadro 7.15 : Comprimento das rotas de transporte dos resíduos de suínos por estradas.....	265
Quadro 7.16 : Granjas de suínos e suas respectivas quantidades de suínos e produção de dejetos no município de Jequeri.....	271
Quadro 7.17 : Resíduos de cultivos vegetais disponíveis no município de Jequeri.....	272
Quadro 7.18 : Intensidade de uso fertilizantes por culturas no município de Jequeri.....	275
Quadro 7.19 : Comprimento dos dutos dimensionados para o Condomínio de Agroenergia de Jequeri.....	277
Quadro 7.20 : Comprimento das rotas de transporte dos resíduos de suínos por estradas.....	278
Quadro 7.21 : Granjas e suas respectivas quantidades de frangos e produção de dejetos no município de Leopoldina.....	286
Quadro 7.22 : Resíduos de cultivos vegetais disponíveis no município de Leopoldina.....	287
Quadro 7.23 Intensidade de uso fertilizantes por culturas no município de Leopoldina.....	290
Quadro 7.24 : Comprimento dos dutos dimensionados para o Condomínio de Agroenergia de Leopoldina.....	292
Quadro 7.25 : Comprimento das rotas de transporte dos resíduos de frangos por estradas.....	293

Quadro 7.26 : Granjas e suas respectivas quantidades de frangos e produção de dejetos no município de Piraúba.....	300
Quadro 7.27 : Resíduos de cultivos vegetais disponíveis no município de Piraúba.....	301
Quadro 7.28 : Intensidade de uso fertilizantes por culturas no município de Piraúba.....	305
Quadro 7.29 : Comprimento dos dutos dimensionados para o Condomínio de Agroenergia de Piraúba.....	305
Quadro 7.30 : Comprimento das rotas de transporte dos resíduos de frangos por estradas.....	306
Quadro 7.31 : Granjas e suas respectivas quantidades de frangos e produção de dejetos no município de São Miguel do Anta.....	317
Quadro 7.32 : Resíduos de cultivos vegetais disponíveis no município de São Miguel do Anta.....	319
Quadro 7.33 : Intensidade de uso fertilizantes por culturas no município de São Miguel do Anta.....	323
Quadro 7.34 : Comprimento dos dutos dimensionados para o Condomínio de Agroenergia de São Miguel do Anta.....	324
Quadro 7.35 : Comprimento das rotas de transporte dos resíduos de frangos por estradas.....	326

## RESUMO

FERRAREZ, Adriano Henrique, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2015. **Soluções energéticas para as cadeias produtivas de frango de corte e da suinocultura na Zona da Mata de Minas Gerais**. Orientador: Delly Oliveira Filho. Coorientadores: Luis Manuel Navas Gracia, Aziz Galvão da Silva Júnior e Roberto Precci Lopes.

A questão energética é um dos pontos centrais do conceito de desenvolvimento sustentável, entendido como o processo que busca satisfazer as necessidades do presente sem comprometer o futuro. A energia está presente em todas as ações de nossa vida cotidiana sendo, portanto, fundamental conhecer e dominar as técnicas de geração e conversão energéticas visando garantir a preservação do meio ambiente e o desenvolvimento social. O esgotamento das reservas de petróleo e os impactos ambientais causados pelo uso intensivo de combustíveis fósseis colocou na ordem do dia a discussão sobre novas fontes alternativas de energia. Esse tema tem sido pauta das reuniões dos chefes de estado, objeto de pesquisa em universidades e preocupação dos cidadãos ao redor do mundo. Uma das fontes renováveis para a geração de energia é o biogás resultante da digestão anaeróbia de resíduos animais, vegetais, industriais ou residenciais. Para melhorar o rendimento da digestão anaeróbia uma das tecnologias que vem sendo estudadas é a codigestão. Essa tecnologia é definida como a digestão simultânea de dois ou mais substratos orgânicos com o objetivo de maximizar a produção de biogás/biometano. O biometano é o metano produzido a partir da biomassa com propriedades energéticas semelhantes as do gás natural. A maioria dos projetos energéticos no meio rural não aproveita o potencial de geração de energia *in loco*, sendo caracterizados somente pela expansão da rede elétrica até as propriedades. A geração distribuída de energia elétrica se caracteriza por sua localização próxima aos centros de carga, sendo conectada ao sistema de distribuição ou na própria unidade consumidora apresentando como vantagens: (i) aumento da confiabilidade de fornecimento para consumidores; (ii) aumento da qualidade de energia; (iii) possibilidade de gerenciamento da ponta; (iv) possibilidade de redução de custos de expansão; (v) redução dos custos de transmissão e distribuição; (vi) adiamento e descentralização de investimentos; (vii) viabilidade econômica para atendimento de

regiões remotas; e (viii) diversificação da matriz energética. O uso de ferramentas computacionais para o dimensionamento e planejamento integrado de recursos é uma opção para avaliar o potencial local e regional para a geração de energia a partir de resíduos agropecuários. Atualmente existem no mercado vários *softwares* de dimensionamento energético, a maioria tem um alto custo de licenciamento e uma vez que foram desenvolvidos em países do hemisfério norte não contemplam dados da realidade dos países em desenvolvimento como o Brasil. Neste trabalho foi desenvolvida a ferramenta computacional SAUDADE. (Sistema de Avaliação do Uso da Digestão Anaeróbia para o Dimensionamento Energético) composta por planilhas de cálculo do Microsoft Excel. A ferramenta possui uma base de dados constituída em uma *geodatabase* com a finalidade de criar o vínculo com o Sistema de Informação Geográfica (SIG) desenvolvido em ArcGIS. Para otimizar a mistura de resíduos animais e vegetais visando maximizar a produção de biometano foi utilizado o complemento do Microsoft Excel chamado Solver que permite o cálculo por programação linear. A ferramenta computacional SAUDADE pode ser aplicada para determinar o potencial de aproveitamento de resíduos agropecuários a nível de propriedade individual (uma granja) ou por meio de condomínios (associação de várias granjas) para o uso energético. O objetivo deste trabalho foi buscar soluções energéticas para as cadeias produtivas de frango de corte e de suínos da região da Zona da Mata de Minas Gerais a partir de resíduos agropecuários. A região é formada por 142 municípios e situa-se na porção sudeste do estado, próxima à divisa dos estados do Rio de Janeiro e do Espírito Santo. Os 2,19 milhões de habitantes da Zona da Mata representam 10,63% da população de Minas Gerais. Em 2011, a participação da região no Produto Interno Bruto (PIB) do Estado foi de apenas 7,47%. Em 2001, a Zona da Mata era responsável por 8,3% do PIB mineiro. Com mais de 5% da população abaixo da linha da miséria e crescente perda de dinamismo econômico, o combate à pobreza extrema é um desafio para a região. A avicultura e a suinocultura estão entre os segmentos que mais se destacam na agropecuária da Zona da Mata de Minas Gerais. De acordo com o IMA existem 241 granjas de suínos e 530 granjas de frango na região. O descarte dos dejetos da produção de suínos e frangos constituem um grave problema ambiental caso não sejam tratados convenientemente causando danos a saúde humana e animal. O aproveitamento desses resíduos agropecuários pode consistir numa nova cadeia de produção com um conjunto de processos para a geração, coleta, transporte e

conversão energética, além da utilização como fertilizantes agrícolas. A aplicação da ferramenta computacional SAUDADE no estudo de caso da região da Zona da Mata de Minas Gerais teve os seguintes objetivos: (i) estimar os resíduos agropecuários disponíveis; (ii) estimar o potencial de produção de biometano a partir da codigestão de dejetos animais e resíduos de cultivos vegetais; (iii) comparação entre o potencial de geração de energia com o biometano produzido somente com os dejetos animais e o biometano produzido com a codigestão dos dejetos animais e resíduos de cultivos vegetais; (iv) avaliar os impactos da energia gerada com o biometano na matriz energética da região; (v) avaliar o potencial de produção de biofertilizante; (vi) avaliar o potencial de mitigação de emissões equivalentes de CO<sub>2</sub>; (vii) avaliar a viabilidade econômica da geração de energia a partir do biometano em granjas de suínos e de frangos; (viii) avaliar a viabilidade econômica de condomínios de agroenergia considerando o transporte de resíduos por dutos ou estradas e o transporte do biometano por gasodutos. Os resultados deste estudo demonstraram que: (i) a codigestão contribui para aumentar a produção de biometano; (ii) o biofertilizante contribui para a viabilidade econômica dos cenários simulados; (iii) o potencial de energia gerada a partir do biometano pode satisfazer a demanda energética para produção de suínos e frangos nas granjas; (iv) o potencial de energia gerada a partir do biometano, produto da codigestão anaeróbia, pode satisfazer a demanda energética da maioria dos municípios em que foram simulados condomínios de agroenergia; (v) a inserção da eletricidade gerada a partir do biometano pode evitar a construção de novas pequenas centrais hidrelétricas na região evitando-se assim impactos ambientais e sociais; (vi) apesar dos benefícios da codigestão, a grande maioria dos cenários simulados não tiveram viabilidade econômica; e (vii) sem o estabelecimento de políticas públicas claras e eficazes para fomentar o uso dos resíduos agropecuários para a produção de biometano, esse potencial de energia não trará os benefícios energéticos e ambientais tão importantes para o setor.

## ABSTRACT

FERRAREZ, Adriano Henrique, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2015. **Energy solutions for production chains of poultry and swine in the Zona da Mata of Minas Gerais.** Advisor: Delly Oliveira Filho. Co-advisors: Luis Manuel Navas Gracia, Aziz Galvão da Silva Júnior and Roberto Precci Lopes.

The energy issue is one of the central points of the concept of sustainable development, understood as the process that seeks to satisfy the needs of the present without compromising the future. The energy is present in all the actions of our everyday lives is fundamental to know and master the techniques of generation and energy conversion in order to ensure the preservation of the environment and social development. The depletion of oil reserves and the environmental impacts caused by the intensive use of fossil fuels put on the agenda the discussion of new renewable energy sources. This theme has been the agenda of meetings of heads of states, the research object in universities and preoccupation of citizens around the world. One of renewable energy options for power generation is the biogas resulting from the anaerobic digestion of animal waste, vegetable, industrial or residential. To improve the efficiency of the anaerobic digestion one of the technologies that is being studied is the co-digestion. This technology is defined as the simultaneous digestion of two or more organic substrates in order to maximize production of biogas/biomethane. The bio-methane is methane (CH<sub>4</sub>) produced from biomass with properties similar to those of the natural gas. Most energetic projects in rural areas despises power generation *in loco*, being characterized only by the expansion of the power grid until the properties. Distributed power generation is characterized by its location close to load centers, being connected to the distribution system or in the consumer unit. This type of generation has the following advantages: (i) increase the reliability of energy supply to consumers; (ii) increased power quality; (iii) peak hour management; (iv) the possibility of reducing expansion costs; (v) reduction in electrical transmission and distribution costs; (vi) delay and decentralization of investment; (vii) economic viability for service in remote areas; and (viii) diversification of energy sources. The use of computational tools for the design and integrated resource planning is an option to assess the local and regional potential

for generating energy from agricultural waste. Currently exist in the market several energetic sizing *software*, most have a high cost of licensing and since been developed in northern countries do not match the reality of developing countries like Brazil. In this work was developed a computational tool named SAUDADE (System of Anaerobic Digestion Use and Assessment for the Energetic System Sizing) consists of Microsoft Excel spreadsheets. The tool has a database consisting in a geodatabase in order to create the link with the Geographic Information System (GIS) developed in ArcGIS. To optimize the mix of animal and vegetable waste to maximize the production of biomethane was used Microsoft Excel Solver that allows the optimization calculation by linear programming. The computational tool SAUDADE can be applied to size the use of agricultural waste to individual property level (a farm) or through condominiums (association of several farms). The objective was to seek energy solutions for production chains poultry and swine in the area of Zona da Mata of Minas Gerais State from agricultural waste. The region is composed by 142 municipalities and is located in the Southeastern portion of the state, near the border of Rio de Janeiro and Espirito Santo States. The 2.19 million inhabitants of the Zona da Mata represent 10.63% of the population of Minas Gerais. In 2011, the region's share in gross domestic product (GDP) of the State was only 7.47%. In 2001, the Zona da Mata was responsible for 8.3% of the state GDP. With more than 5% of the population below the poverty line and with increasing loss of economic dynamism, combating extreme poverty is a challenge for the region. The poultry and swine production are among the segments that stand out in agriculture in the Mata region of Minas Gerais. According to the Agricultural Institute of Minas Gerais (IMA) there are 241 swine farms and 530 poultry farms in the region. The waste from the production of swine and poultry are a serious environmental problem causing damage to human and animal health. The use of these agricultural waste may consist of a new production chain with a set of processes for the generation, collection, transportation and energy conversion. The application of computational tool SAUDADE in the case study of Minas Gerais Zona da Mata region had the following objectives: (i) estimate agricultural waste available; (ii) estimate the biomethane production potential from co-digestion of animal and waste vegetable; (iii) comparison of the potential for energy generation with biomethane produced only of animal waste and biomethane produced with the codigestion of animal waste and vegetable waste; (iv) evaluate the energy impact generated with biomethane in the

energy matrix of the region; (v) evaluate the biofertilizer production potential; (vi) assess the potential for mitigation of CO<sub>2</sub> equivalent emissions; (vii) evaluate the economic feasibility of energy generation from biomethane in swine and poultry farms; (viii) evaluating the economic viability of bioenergy condominiums considering the transport of waste through pipelines or roads and the transport of biomethane by pipelines. The results showed that: (i) the co-digestion helps to increase the production of biomethane; (ii) the biofertilizer contributes to the economic viability of simulated scenarios; (iii) the potential for energy generated from biomethane can meet the energy demand for the production of swine and poultry on the farms level; (iv) the potential for energy generation from biomethane can satisfy the energy demand of most of the municipalities in which they simulated condominiums agro-energy; (v) the inclusion of electricity generated from biomethane into the regional energy matrix can prevent the construction of new small hydropower plants in the region thus avoiding environmental and social impacts; (vi) despite the benefits of co-digestion, the vast majority of scenarios simulated presented no economic feasibility; and (vii) without establishing clear and effective public policies to promote the use of agricultural waste for the production of biomethane, the energy potential will not become in installed capacity.

## RESUMEN

FERRAREZ, Adriano Henrique, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2015. **Soluciones energéticas para las cadenas de producción de la avicultura de engorde y la porcicultura en la Zona da Mata de Minas Gerais**. Director: Delly Oliveira Filho. Co-directores: Luis Manuel Navas Gracia, Aziz Galvão da Silva Júnior y Roberto Precci Lopes.

La generación y uso de la energía es uno de los aspectos fundamentales implicados en el concepto de desarrollo sostenible, entendido como el proceso que busca satisfacer las necesidades del presente sin poner en peligro las del futuro. La energía está presente en todas las acciones de nuestra vida cotidiana por lo que es muy importante fundamental conocer y dominar las técnicas de generación y conversión de energía con el fin de garantizar la preservación del medio ambiente y el desarrollo social. El agotamiento de las reservas de petróleo y los impactos ambientales causados por el uso intensivo de combustibles fósiles, han puesto en la agenda la discusión de sobre las nuevas fuentes de energía renovables. Este tema ha sido discutido debatido en reuniones de jefes de Estado, es objeto de investigación en las universidades y de conversaciones de ciudadanos interesados de todo el mundo. Una de estas fuentes de energías renovables es el biogás resultante de la digestión anaerobia de los residuos animales, vegetales, industriales o residenciales. Para mejorar la eficiencia de la digestión anaeróbica una de las tecnologías que se están estudiando objeto de estudio es la codigestión. Esta tecnología se define como la digestión simultánea de dos o más sustratos orgánicos con el fin de maximizar la producción de biogás / biometano. El biometano es el metano (CH<sub>4</sub>) producido a partir de biomasa con propiedades similares próximas a las del gas natural. La mayoría de los proyectos de energía en las zonas rurales desprecia la generación "in situ", consistiendo solamente en la expansión de la red eléctrica a las propiedades. La generación distribuida de energía distribuida se caracteriza por su ubicación cerca de los centros de carga demanda, pudiendo estar conectado o no a la red de distribución o en la unidad de consumo que, presentando las siguientes ventajas: (i) aumentar la fiabilidad del suministro a los consumidores; (ii) una mayor calidad de la energía; (iii) posibilidad de gestión de la demanda en las horas de consumo máximo; (iv) la posibilidad de reducción de los costes de expansión de la red pública de distribución; (v) reducción de los costes de transporte

y distribución; (vi) aplazamiento y descentralización de la inversión; (vii) la viabilidad económica para el servicio en zonas remotas; y (viii) la diversificación de las fuentes de energía. El uso de herramientas computacionales para el dimensionamiento y la planificación integrada de los recursos es una opción para evaluar el potencial local y regional para de la generación de energía a partir de residuos agrícolas. Actualmente existen en el mercado varios *softwares* de dimensionamiento energético, la mayoría de los cuales tienen un alto costo de la licencia. Además, dado que y una vez que son desarrollados en los países del nortedel hemisferio norte, no atiendencoinciden con la realidad de los países en desarrollo, como es Brasil. En este trabajo fue desarrollada una herramienta computacional llamada SAUDADE (Sistema de Evaluación del Uso de la Digestión Anaerobia para el Dimensionamiento Energético), consistente mpuesta deen un conjunto de hojas de cálculo desarrolladas en el entornodel Microsoft Excel. La herramienta tiene una base de datos creada en unaconsistente en una *geodatabase*, con el fin de crear el vínculo con el Sistema de Información Geográfica (SIG) desarrollado en con el programa ArcGIS. Para optimizar la mezcla de residuos animales y vegetales con el objetivo de maximizar la producción de biometano, fue utilizado el complemento del Microsoft Excel llamado Solver que permite el cálculo coen programación lineal. La herramienta computacional S.A.U.D.A.D.E. se puede aplicar para dimensionar la utilización de residuos agroganaderos a nivel de propiedad individual (una granja) o a través de condominios (asociaciones ón de varias granjas). El objetivo de este trabajo fue buscar soluciones energéticas para las cadenaslos sectores productivos de producción de pollo de engorde y de cerdos en la región de Zona da Mata de Minas Gerais. La región está formada por 142 municipios y se encuentra en la parte sureste del estado, cerca de la frontera de los estados de Río de Janeiro y Espirito Santo. La región tiene 2,19 millones de habitantes que representan 10,63% de la población de Minas Gerais. En 2011, la región fue responsable porgeneró el 7,47% del producto interno bruto (PIB) del Estado. En 2001, esa poercentajge era de 8,3%. Con más de 5% de la población por debajo del umbral la línea de la pobreza y el aumento de la pérdida de dinamismo económico, la lucha contra la pobreza extrema es un desafío para la región. La avicultura y porcincultura se encuentran entre los segmentos que se destacan en la agroganadería de la región de Zona da Mata de Minas Gerais. De acuerdo con el Instituto de Agroganadería de Minas Gerais (IMA), existen 241 granjas de cerdos y 530 granjas avícolas en la región. Los residuos de la

producción de cerdos y pollos son un grave problema ambiental que causan daños a la salud humana y animal. El uso energético de estos residuos ganaderos puede consistir en una nueva cadena de producción, con un conjunto de procedimientos para la conversión de generación y, recolección, transporte de la energía. La aplicación de la herramienta computacional SAUDADE en el estudio de caso de la región de Zona da Mata de Minas Gerais tuvo los siguientes objetivos: (i) estimar los residuos agroganaderos disponibles; (ii) estimar el potencial de producción de biometano a partir de los residuos animales y vegetales a través de la codigestión; (iii) comparación del potencial de generación de energía con el biometano producido solamente con residuos animales con el biometano producido con la codigestión de residuos animales y vegetales; (iv) evaluar el impacto de la energía generada con el biometano en la matriz energética de la región; (v) evaluar el potencial de producción de biofertilizante; (vi) evaluar estudiar el potencial de mitigación de las emisiones de CO<sub>2</sub>; (vii) evaluar la viabilidad económica de la generación de energía a partir del biometano en granjas de cerdos y pollos; (viii) evaluar analizar la viabilidad económica de condominios agrupaciones de bioenergía, considerando el transporte de los residuos a través de tuberías o camiones y el transporte de biometano por gasoducto. Los resultados mostraron que: (i) la codigestión ayuda a aumentar la producción de biometano; (ii) el biofertilizante contribuye a la viabilidad económica de los escenarios simulados; (iii) el potencial de la energía generada a partir de biometano puede satisfacer la demanda de energía para la producción de cerdos y pollos en las granjas; (iv) el potencial de la energía generada a partir de biometano puede satisfacer la demanda de energía de la mayoría de los municipios en los que fueran simuladas agrupaciones o condominios agroenergéticas de productores; (v) la inclusión de la electricidad generada a partir de biometano puede evitar la construcción de nuevas pequeñas centrales hidroeléctricas en la región, evitando así impactos ambientales y sociales; (vi) aunque existan ventajas en la codigestión, la gran mayoría de los escenarios simulados no tenía viabilidad económica; y (vii) sin establecer políticas públicas claras y eficaces para promover el uso de residuos agroganaderos para la producción de biometano, el potencial de la energía no se convertirá en capacidad instalada.



---

**Universidad de Valladolid**

**E.T.S. INGENIERIAS AGRARIAS**

TESIS DOCTORAL:

**SOLUÇÕES ENERGÉTICAS PARA AS  
CADEIAS PRODUTIVAS DE FRANGO DE  
CORTE E DA SUINOCULTURA NA ZONA DA  
MATA DE MINAS GERAIS**

Presentada por **Adriano Henrique Ferrarez** para  
optar al grado de doctor por la Universidad de  
Valladolid

Dirigida por:  
Dr. Delly Oliveira Filho  
Dr. Luis Manuel Navas Gracia

O autor desta Tese iniciou seus estudos de doutorado em 01 de agosto de 2011 na Universidade Federal de Viçosa. No período de 01/09/2013 a 30/06/2015 recebeu bolsa de estudos, na modalidade doutorado-sanduíche no exterior, do Programa Ciência sem Fronteiras concedida pelo governo federal brasileiro por meio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

A Tese de Doutorado foi realizada por meio de acordo de co-tutela entre a Universidade Federal de Viçosa – Brasil e a Universidad de Valladolid – Espanha.

## **CAPÍTULO 1**

### **RESUMEN AMPLIADO DE LA TESIS EN ESPAÑOL**

Los aspectos relacionados con la generación y aprovechamiento de la energía son unos de los puntos fundamentales tratados en el concepto de desarrollo sostenible, entendido como el proceso que busca satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las del futuro (MARKOVSKA *et al.*, 2014). La energía está presente en todas las acciones de nuestra vida cotidiana, lo que hace que sea importante conocer y dominar las tecnologías de conversión y uso con el fin de garantizar la preservación del medio ambiente y el desarrollo social (VOLPI *et al.*, 2006).

El fin inminente de las reservas de petróleo y los impactos ambientales causados por el uso de combustibles fósiles ha hecho con que la discusión sobre las nuevas fuentes de energía ocupe el orden del día de las reuniones de los Jefes de Estado y de Gobierno de todo el mundo, que sea objeto de investigación en un altísimo número de Universidades y Centros de Investigación, y motivo de preocupación de la inmensa mayoría de los ciudadanos de todo el planeta.

Pues bien, una de las fuentes renovables para la generación de energía es el biogás resultante de la digestión anaerobia de residuos animales, vegetales, industriales o residenciales. La digestión anaerobia se corresponde con la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Se divide en cuatro etapas donde actúan diferentes grupos de microorganismos, a saber: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (SALMINEM y RENTALA, 2002). La digestión anaerobia se realiza en cámaras cerradas llamadas digestores. Los principales parámetros para el diseño de los digestores son la carga orgánica, el tiempo de retención hidráulica y la temperatura de funcionamiento (ROMANO y ZHANG, 2007). De acuerdo con la temperatura de funcionamiento, la digestión anaerobia se puede clasificar en mesofílica (35 °C) y termofílica (55 °C) (LI *et al.*, 2015). Para mejorar su rendimiento se están investigando nuevas tecnologías y técnicas, entre las cuales se encuentra la codigestión (WU, 2007).

## **CODIGESTIÓN ANAERÓBIA**

La codigestión anaerobia es definida como la digestión simultánea de dos o más sustratos orgánicos con el objetivo de maximizar la producción de metano. El

término codigestión se utiliza independientemente de la relación de residuos utilizados. Los experimentos realizados utilizando la mezcla de diferentes sustratos mostraron el aumento de la producción de biogás en comparación con la digestión anaerobia de un solo sustrato. (WANG *et al.*, 2012).

Otras ventajas de la codigestión anaeróbica son: (i) mantenimiento del pH óptimo para las bacterias metanogénicas; (ii) disminución del amoníaco libre, que es inhibidor de la producción de metano (XIE *et al.*, 2011); (iii) disminución de la demanda biológica de oxígeno (DBO) (ORRICO JR *et al.*, 2010); (iv) equilibrio de nutrientes, debido a la variedad de sustratos que contribuyen a la estabilidad de la digestión y que resulta en un digestato con mayor potencial de fertilización (JINGURA y MATENGAIFA, 2009); (v) reducción del costo y el uso eficiente de los equipos, ya que centraliza la gestión de diversos tipos de residuos en un solo lugar (MONDRAGÓN *et al.*, 2006; ÁLVAREZ *et al.*, 2010; LANSING *et al.*, 2010); y (vi) beneficiosos efectos de las economías de escala (MARTÍNEZ-GARCÍA *et al.*, 2007).

La Figura 1.1 presenta el diseño de una planta de codigestión para la producción de biogás y las etapas de generación de electricidad y calor.

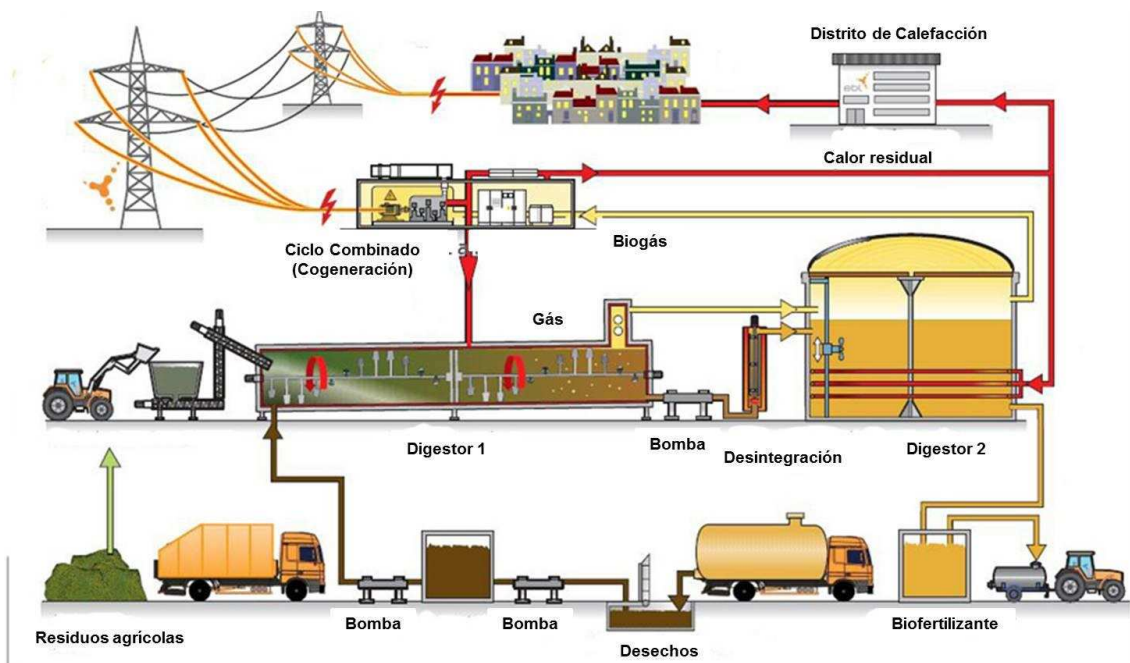


Figura 1.1 – Planta de codigestión.

Fuente: (FABbiogas, 2015).

## **BIOMETANO**

El biometano es el metano ( $\text{CH}_4$ ) producido a partir de la transformación de la biomasa, con propiedades cercanas al gas natural (ISO 16559: 2014). Se puede obtener por dos procesos: (i) conversión térmica (gasificación o metanización), resultando en un gas rico en metano conocido como gas de síntesis o bio-NGA; y (ii) a partir de la digestión anaerobia de residuos orgánicos, cuyo producto inicial es el biogás y que después de ser purificado queda con un alto contenido de  $\text{CH}_4$  para convertirse en lo que conocemos como biometano. Para la inyección del biometano en la tubería es necesario cumplir con las especificaciones técnicas y garantizar una composición química idéntica a la del gas natural.

El biometano se puede utilizar para sustituir a los combustibles líquidos en el sector del transporte, la producción de electricidad y calor a través de ciclos de cogeneración y como materia prima para la industria química (fabricación de pinturas, plásticos, detergentes, etc.). El biometano y el gas natural son totalmente intercambiables, siendo que tienen los mismos usos finales. Por lo tanto se puede producir mezcla de estos dos combustibles en diferentes proporciones, como ocurre con las mezclas de bioetanol / gasolina y biodiesel / diesel. Las unidades de medida del biometano son las mismas que las del gas natural y se dan en  $\text{Nm}^3$  o kWh (1  $\text{Nm}^3$  de biometano por lo general contiene 10 kWh de energía primaria equivalente a 36 MJ). Para la utilización de las instalaciones de transporte (gaseoductos), almacenamiento e infraestructura disponibles para el gas natural es necesario que el biometano tenga un determinado grado de presurización (THRAN *et al.*, 2014).

## **ESTADO DEL ARTE DEL BIOGÁS EN LOS PAÍSES DE LA UNIÓN EUROPEA**

Según el Informe del Observatorio de las Energías Renovables, en 2013 la energía primaria generada a partir del biogás en Europa fue de 13,5 Mtep. Alemania fue responsable de más del 50% de la producción, seguida por el Reino Unido e Italia, con 13,5% y 13,4%, respectivamente. La generación de biogás industrial representó el 69,8% de la producción, los vertederos un 20,7% y la depuración de aguas residuales (municipales e industriales) un 9,5% (EurObserv'ER, 2014).

La fuente del biogás varía dependiendo del país. Así, Alemania lidera la producción de biogás a partir de residuos agrícolas y aguas residuales. Por su parte, países como Italia, Austria y la República Checa predominan las plantas para el tratamiento de residuos agroindustriales y los cultivos energéticos. En el Reino Unido, España, Portugal e Irlanda la producción de biogás está ligada al aprovechamiento de los vertederos. En el caso de Suecia y Polonia la mayor producción de biogás proviene de purificación de aguas residuales (EurObserv'ER, 2014).

El principal vector energético a partir de biogás fue la electricidad, con una producción de 52.729,6 GWh en 2013. Las plantas de cogeneración (electricidad y calor) representaron el 61% de la electricidad total producida. Los principales productores de electricidad a partir de biogás de Europa son Alemania, Italia, Reino Unido, República Checa y Francia. En este mismo año de 2013 se produjeron 469,3 ktep de calor a partir de biogás.

Las principales políticas públicas de fomento de la producción de biogas vigentes en países de la Unión Europea son: (i) exención de impuestos; (ii) *feed-in tariff* para la electricidad; (iii) *feed-in tariff* para el biogas; (iv) *feed-in tariff* para el calor; (v) fomento a la inversión; (vi) costes evitados en el transporte de gas natural; (vii) cuota de biocombustibles; y (viii) cuota de las energías renovables (certificados de origen de comercio).

## **ESTADO DEL ARTE DEL BIOGÁS EN BRASIL**

Brasil tiene una matriz energética con amplia participación de las fuentes renovables debido a la energía hidroeléctrica (POTTMAIER *et al.*, 2013). La hidroelectricidad en Brasil corresponde aproximadamente al 13,8% de la oferta de energía primaria. El potencial hidroeléctrico de Brasil es aproximadamente el doble de la potencia instalada en el país, explotándose actualmente el 35% de este potencial (BRASIL, 2014). La generación de electricidad a través de grandes plantas hidroeléctricas, debido a los impactos ambientales y al hecho de que el 63% del potencial hidroeléctrico se encuentra en la amazonia brasileña, ha sido fuertemente

criticada, lo que puede reducir la explotación de este potencial. Por tanto, existe en el país la necesidad de nuevas fuentes de generación de electricidad (SOITO y FREITAS, 2011; BRASIL, 2014).

Desde octubre de 2012, el sistema eléctrico brasileño se enfrenta a graves problemas debido al bajo nivel de los embalses hidroeléctricos. Como resultado, el país aumentó la capacidad instalada de las centrales térmicas alcanzando 37,8 GW en 2014, de los cuales más del 70% se generaron a partir de combustibles fósiles (ANEEL, 2015). Según los expertos, si este escenario continúa, puede haber racionamiento de energía. Por otro lado, muchos estudios demuestran que existe una relación directa entre el aumento del consumo de energía y el desarrollo económico (WARR y AYRES, 2010). El aumento en el consumo de energía también se ha relacionado con un mayor bienestar de las personas, teniendo reflejo sobre el Índice de Desarrollo Humano (IDH) (OUEDRAOGO, 2013).

El uso de otras fuentes renovables en el país fue restringido durante algún tiempo a la investigación y demostración de proyectos piloto para la electrificación de las zonas rurales y comunidades aisladas, donde la expansión de la red eléctrica se convirtió en inviable (COSTA *et al.*, 2008). Algunas de las tecnologías renovables, como el uso de la energía del biogás, fueron estudiadas resultando no atractivas desde un punto de vista estrictamente económico. Sin embargo, si en la forma tradicional de la evaluación de los costos de energía fuesen considerados los costos ambientales de las fuentes convencionales y las ventajas de las energías renovables para el medio ambiente, sin duda esta situación se modificaría (CAVALIERO y SILVA, 2005).

En Brasil, la Política Nacional de Cambio Climático, establecida en 2009, estableció la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de 36,1% a 38,9% para el año 2020. Fueran desarrollados planes de acción sectoriales en las siguientes categorías: (i) el cambio de uso del suelo; (ii) la agricultura; y (iii) energía. En cuanto a la mitigación de las emisiones de la agricultura, el Gobierno creó el Plan Agricultura de Bajo Carbono (ABC), que proporciona apoyo financiero para la implementación, mantenimiento y mejora de los sistemas de tratamiento de residuos y desechos de la producción animal para la generación de energía (IEA BIOENERGY, 2014).

El potencial de biogás de Brasil es grande, sin embargo, la participación de esta fuente en la matriz energética nacional es extremadamente pequeña. De acuerdo con el Balance Nacional de Energía del año 2013, la capacidad instalada de generación de electricidad a partir de biomasa fue de 11.337 MW. Las plantas de biogás representaron aproximadamente 80 MW de este total.

Según la Agencia Nacional de Energía Eléctrica (ANEEL), en Brasil hay 22 plantas de biogás instaladas en granjas, agroindustrias y vertederos, que proporcionan electricidad a la red. El biogás producido en el país se utiliza para la generación de electricidad y calor (IEA BIOENERGY, 2014).

Respecto a la regulación de la producción de biogás en Brasil, en enero de 2015 fue establecido por la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (ANP) la Resolución N° 8, que regula el uso de biogás en el país. Las disposiciones generales de esta resolución establecen: (i) las normas de uso y de control de calidad del biometano; (ii) las especificaciones para la comercialización (compresión, distribución y reventa iguales a las existentes para el gas natural); y (iii) la posibilidad de mezcla de biometano y gas natural.

El biometano producido a partir de los residuos orgánicos de la agrosilvicultura y destinado al uso vehicular, en instalaciones residenciales y comerciales, de origen nacional, puede ser comercializado en la red de distribución en todo el país. Muchos municipios del interior de Brasil no son atendidos por la red de gas natural, por lo que existe la expectativa de que la Resolución N° 8 de ANP contribuya a la interiorización del uso de este combustible.

Por su parte, entre las propuestas para fomentar la generación de energía a partir de biogás que están en discusión en el Parlamento de Brasil se encuentra el Proyecto de Ley 6559/2013 que regula las actividades relacionadas con la generación, transmisión, filtración, almacenamiento y generación de energía eléctrica, térmica y automotriz del biogás, desde el tratamiento sanitario de los residuos y efluentes orgánicos, especialmente los generados en la agricultura y las actividades de producción agroindustriales. Actualmente este proyecto está a la espera de una decisión de los comités internos del parlamento (BRASIL, 2015).

## HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO ENERGÉTICO

La mayoría de los proyectos energéticos en las zonas rurales se desarrollan con la expansión de la red eléctrica a las propiedades, despreciando la generación *in situ*. La generación distribuida de energía se caracteriza por su ubicación cerca de los centros de demanda, pudiendo estar o no los generadores conectados a la red de distribución, con pequeña y mediana potencia (ANEEL, 2011). En los países europeos, Estados Unidos y Australia, la generación distribuida ha tenido un fuerte incentivo económico (BUDZIANOWSKI, 2012; FERREIRA *et al.*, 2012).

El uso de herramientas informáticas para el dimensionamiento y la planificación integrada de los recursos es una opción para evaluar el potencial local y regional para la generación de energía a partir de residuos agroganaderos. Actualmente existen en el mercado varios programas de dimensionamiento energético, por ejemplo INSEL, PV-DESIGN PRO, GREENIUS, HOMER e RETScreen, la mayoría de los cuales tienen alto costo de licencias. Además, y puesto que se han desarrollado en los países del hemisferio norte, no atienden correctamente con la realidad de los países en desarrollo, como Brasil (BORGES NETO y CARVALHO, 2009).

En este trabajo fue desarrollada una herramienta computacional llamada SAUDADE (Sistema de Evaluación del Uso de la Digestión Anaerobia para el Dimensionamiento Energético), consistente en un conjunto de hojas de cálculo desarrolladas en el entorno Microsoft Excel. La herramienta tiene una base de datos consistente en una *geodatabase*, con el fin de crear el vínculo con el Sistema de Información Geográfica (SIG) desarrollado con el programa ArcGIS. Para optimizar la mezcla de residuos animales y vegetales con el objetivo de maximizar la producción de biogás, fue utilizado el complemento del Microsoft Excel llamado Solver que permite el cálculo con programación lineal. La herramienta computacional SAUDADE se puede aplicar para dimensionar la utilización de residuos agroganaderos a nivel de propiedad individual (una granja) o asociaciones de varias granjas.

La Figura 1.2 presenta el diagrama de flujo de la herramienta SAUDADE.

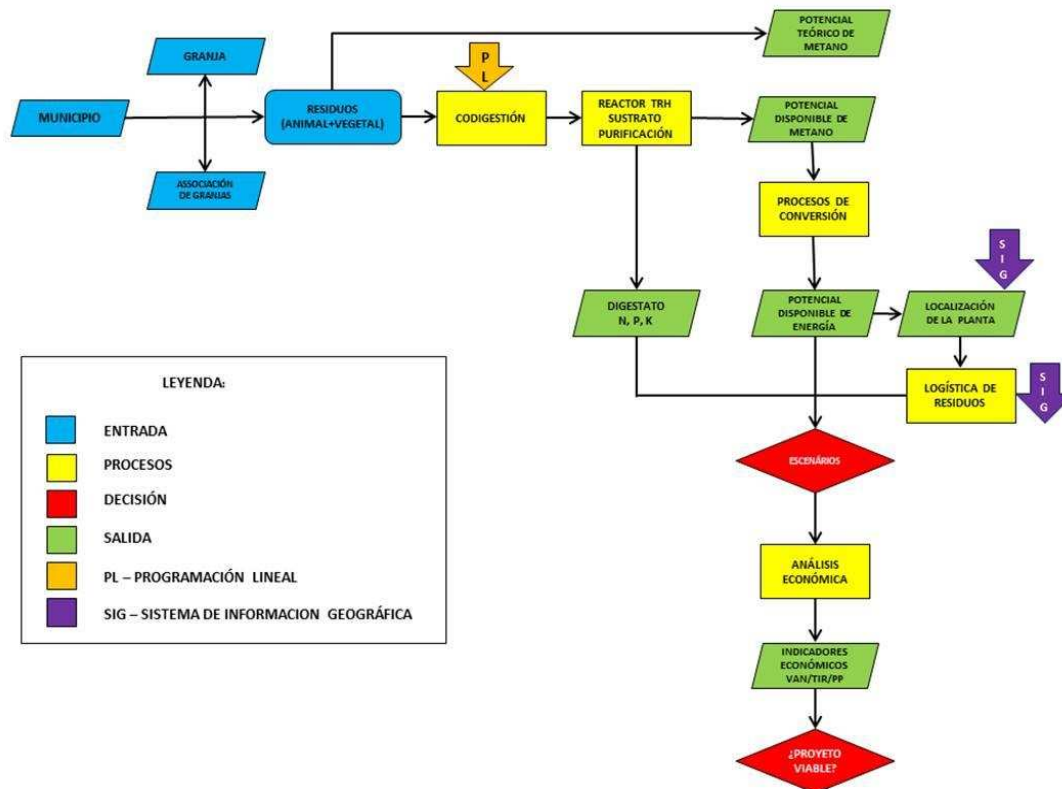


Figura 1.2 – Diagrama de flujo de la herramienta informática SAUDADE.

El objetivo de la Tesis fue desarrollar soluciones energéticas para los sectores de producción de pollos y de cerdos de la región de Zona da Mata, Minas Gerais (Brasil) a partir de residuos agroganaderos. Esta región se compone de 142 municipios y está ubicada en la zona sureste del estado de Minas Gerais, cerca de la frontera con los estados de Río de Janeiro y Espírito Santo. La población total de la región de Zona da Mata es de 2.190.000 habitantes, que representan el 10,63% del estado. En 2001, la región generó el 8,3% del producto interior bruto (PIB) de Minas Gerais, mientras que en 2011 fue sólo el 7,47%. Con más del 5% de la población por debajo del umbral de la pobreza y con la pérdida de dinamismo económico, la lucha contra la pobreza extrema es un reto para la región (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2011).

La Figura 1.3 presenta la ubicación de la región de Zona da Mata en el Estado de Minas Gerais y su localización en Brasil.



Figura 1.3 – Mesorregión de Zona da Mata de Minas Gerais (Brasil).

Fuente: (DUTCHMAN, 2015) y (MINAS GERAIS, 2014).

En la región de Zona da Mata hay un total de 24 pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) instaladas, totalizando 242,74 MW de potencia (ANEEL, 2014). Estas instalaciones no necesariamente traen beneficios a la población local, ya que los municipios reciben una carga tributaria directa por su implantación, sin recibir compensación alguna por daños ambientales (PAULA *et al.*, 2013). El consumo per cápita de energía en la región es inferior al de los países de la OCDE, al de Brasil y al del estado de Minas Gerais (IEA, 2013; EPE, 2012; CEMIG, 2012).

La agricultura en la región es tradicional, atendiendo sobre todo al mercado local y regional, con la excepción de los sectores del café, y la producción de cerdos y de pollos (NETTO y DINIZ, 2005). Los principales cultivos agrícolas, además de café, son las judías, el maíz y la caña de azúcar.

## **PORCINOCULTURA EN LA ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS**

La región es el segundo pólo más grande de cría de cerdos de engorde de Minas Gerais, con 21,18% del rebaño efectivo del estado (ABIPECS, 2012).

Predomina en la región el productor de hasta 500 cerdas matrices, con ventas anuales por debajo de 300.000 euros, que emplean mano de obra asalariada y cuya gestión de la propiedad se realiza por miembros de la familia. Entre los insumos necesarios para la producción se pueden señalar los ingredientes para la formulación de las raciones, la asistencia veterinaria y genética, equipos, etc. (MOURA, 2004).

De acuerdo con el Catastro de Productores de Cerdos realizado por el Instituto Agroganadero de Minas Gerais (IMA), en 2013 había 241 granjas en la región. La Figura 1.4 presenta el número de granjas en función de la cantidad de cerdos.

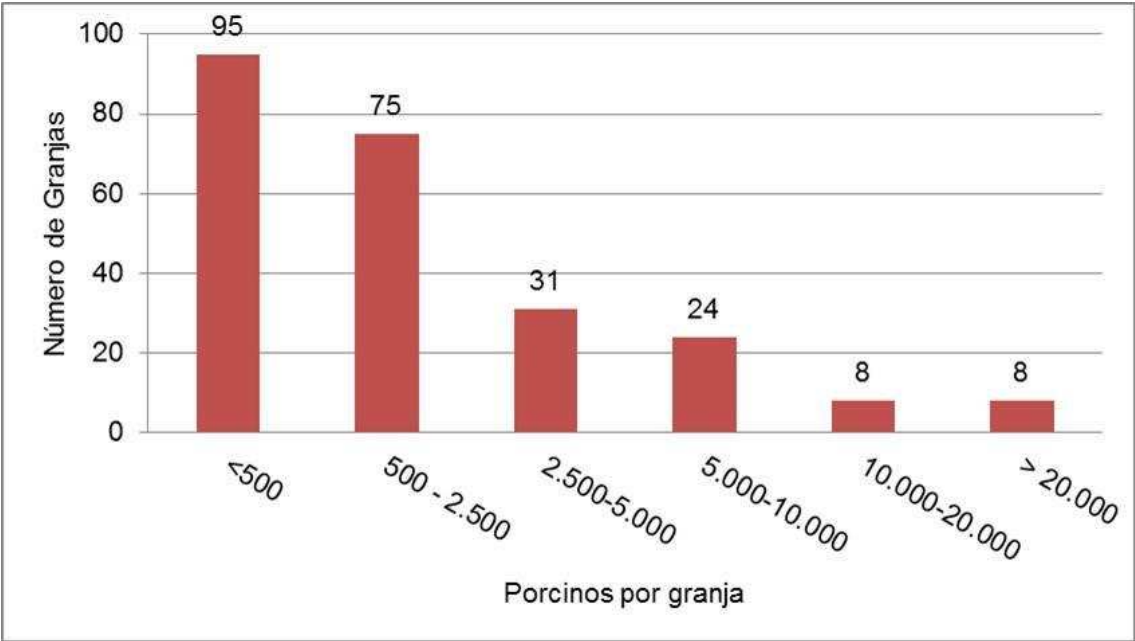


Figura 1.4 – Número de granjas en función de la cantidad de cerdos en la región Zona da Mata (Minas Gerais, Brasil).

**AVICULTURA EN LA ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS**

La región es el cuarto mayor centro de producción de pollos de Minas Gerais, con el 11% del rebaño efectivo del estado. De acuerdo con el Catastro de Productores de Pollos realizado por el Instituto Agroganadero de Minas Gerais

(IMA), en 2013 había 530 granjas, con un 95% clasificados como agricultores familiares. La Figura 1.5 presenta el número de granjas en función de la cantidad de pollos.

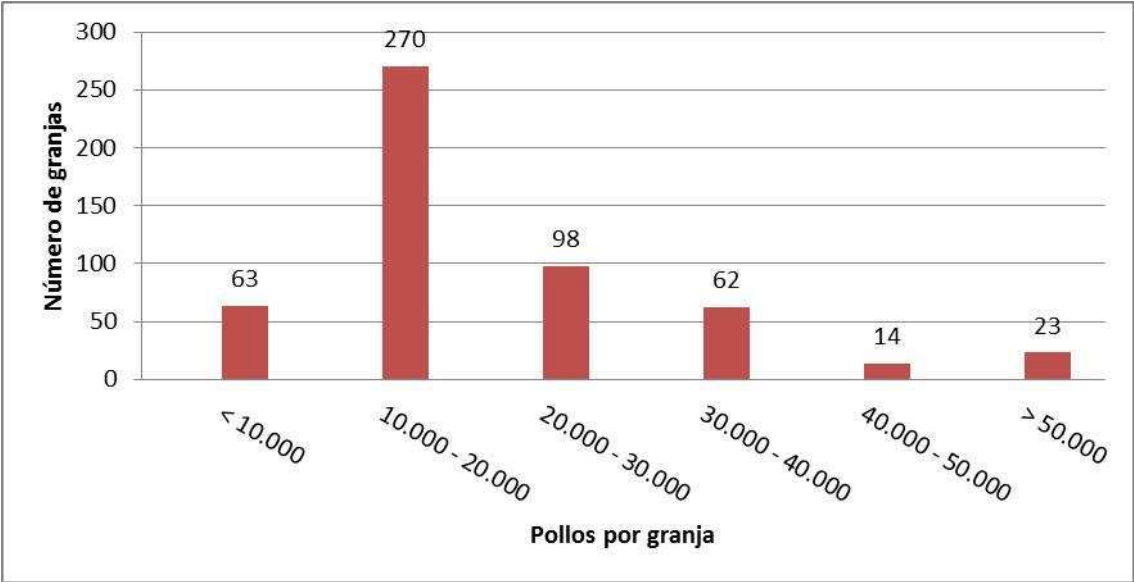


Figura 1.5 – Número de granjas en función de la cantidad de pollos en la región Zona da Mata (Minas Gerais, Brasil).

### IMPACTOS AMBIENTALES DE LA PORCINOCULTURA Y AVICULTURA

Los desechos de la producción de cerdos y pollos constituyen un grave problema ambiental que causan daños a la salud humana y animal (ABOUELENIEN *et al.*, 2014; RIAÑO y GARCÍA-GONZÁLEZ, 2015). El manejo inadecuado de estos residuos provoca la contaminación de los ríos, los acuíferos poco profundos y del agua potable que abastecen tanto al medio rural como al urbano, causando el desequilibrio ecológico, la propagación de agentes patógenos y la contaminación con amoníaco, nitratos y otros elementos tóxicos. Otro tipo de contaminación asociada con estas actividades es el olor desagradable de los residuos, provocado por la evaporación de los compuestos volátiles que además contribuyen al efecto invernadero (COOLS *et al.*, 2001; DIESEL *et al.* 2002; OLIVEIRA *et al.*, 2003).

## ASOCIACIONES AGROENERGÉTICAS

El aprovechamiento energético de los residuos agroganaderos puede constituir un nuevo modelo de negocio en el sector productivo, con un conjunto de procesos para generar, recolectar, transportar y convertir la biomasa residual de la agricultura en energía.

Las asociaciones agroenergéticas se definen como el área donde se produce y utiliza la energía generada por la agricultura local y regional. Además presentan beneficios como la apropiación local de la energía, la creación de empleo y la reducción de los impactos ambientales (MANGOYANA y SMITH, 2011)

Los primeros proyectos de asociaciones agroenergéticas surgieron en Europa a principios de la década de los 80 del siglo pasado. La planta de generación de energía centralizada debe estar ubicada a fin de beneficiar al mayor número posible de agricultores (RAVEN y GREGERSEN, 2007). La amplia disponibilidad de los residuos agroganaderos y los procesos de conversión existentes pueden convertirlos en una importante fuente de energía. Las asociaciones agroenergéticas presentan otras ventajas: (i) la seguridad alimentaria; (ii) el desarrollo rural; (iii) la autosuficiencia energética local; (iv) la gestión sostenible de la agricultura; (v) la conservación de la biodiversidad y la mitigación del cambio climático; (vi) la mejora de la seguridad del suministro de energía; (vii) la creación de empleo; y (viii) la reducción de los impactos ambientales (BEST, 2003; MANGOYANA y SMITH, 2011).

La aplicación de la herramienta informática SAUDADE en el estudio de la región de Zona da Mata de Minas Gerais tuvo los siguientes objetivos:

- (i) estimación de los residuos agroganaderos disponibles;
- (ii) estimación del potencial de producción de biogás a partir de la codigestión anaerobia de desechos de animales y residuos de cultivos vegetales;
- (iii) comparación entre el potencial de generación de energía con el biogás producido solamente a partir de desechos de animales y con la codigestión de residuos de cultivos vegetales;

- (iv) evaluación de los impactos de la energía generada con el biogás en la matriz energética de la región;
- (v) evaluación del potencial de producción de biofertilizantes;
- (vi) evaluación del potencial de mitigación de emisiones de CO<sub>2</sub>;
- (vii) evaluación de la viabilidad económica de la generación de energía a partir del biogás en granjas de cerdos y pollos;
- (viii) evaluación de la viabilidad económica de las asociaciones agroenergéticas teniendo en cuenta el transporte de residuos por tuberías o carreteras y del biometano por gasoductos.

Los resultados de este estudio demostraron:

- (i) la codigestión contribuye a aumentar la producción de biometano;
- (ii) el biofertilizante garantiza la viabilidad económica en algunos de los escenarios simulados;
- (iii) el potencial de energía generada a partir del biogás puede satisfacer la demanda energética de la producción de cerdos y pollos en las granjas;
- (iv) el potencial de la energía generada a partir del biogás puede satisfacer a la demanda energética de la mayoría de los municipios en los que fueron simulados las asociaciones agroenergéticas;
- (v) la inserción de la electricidad generada puede evitar la construcción de nuevas pequeñas centrales hidroeléctricas en la región evitando así impactos ambientales y sociales;
- (vi) a pesar de los beneficios de la codigestión, la gran mayoría de los escenarios simulados no mostraron viabilidad económica;
- (vii) sin el establecimiento de políticas públicas claras y eficaces para fomentar el uso de residuos agroganaderos para generar biogás, el potencial de generación de energía no se materializará en potencia instalada.

## 1.1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ABIPECS – Associação Brasileira das Indústrias Produtoras e Exportadoras de Carne Suína. Carne Suína Brasileira em 2011. Disponível em: [www.abipecs.org.br](http://www.abipecs.org.br), Consulta em: 09/2012.

ABOUELENIEN, F., NAMBA, Y., KOSSEVA, M. R., NISHIO, N., NAKASHIMADA, Y. (2014). Enhancement of methane production from co-digestion of chicken manure with agricultural wastes, *Bioresource Technology*, Vol 159, 80-87.

ÁLVAREZ, J.A., OTERO, L., LEMA, J.M. (2010). A methodology for optimising feed composition for anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes. *Bioresour. Technol.* 101, 1153–1158.

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa nº 482/2012. 21 p. 2011.

ANEEL, 2014. Banco de Informações de Geração: Capacidade de Geração do Estado de Minas Gerais. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/GeracaoTipoFase.asp?tipo=5&fase=3&UF=MG:MINAS%20GERAIS>, (Consulta em: 09/2014).

ANEEL, 2015. Resumo Geral dos Novos Empreendimentos de Geração. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=37&idPerfil=2>, (Consulta em: 03/2015).

BEST, G. (2003). Agroenergy: A New function in Agriculture, *LAMNET-NEWS* 3rd Issue.

BORGES NETO, M. R., CARVALHO, P. C. M. (2009). Planejamento energético rural assistido por computador. *Eng. Agríc.* 2009, Vol.29 (2), 172-184.

BRASIL, Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Balanço Energético Nacional 2014 – Ano Base 2013. [www.epe.gov.br/](http://www.epe.gov.br/) (Consulta em: 06/2014).

BRASIL. Câmara dos Deputados. Projetos de Lei e Outras Proposições. PL 6559/2013. Disponível em: <<http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/fichaDetramitacao?idProposicao=596099>>. Acesso em: 06/2015.

BUDZIANOWSKI, W. M. (2012). Sustainable biogas energy in Poland: Prospects and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 16 (1), 342-349.

CAVALIERO, C. K. N., SILVA, E. P. (2005). Electricity generation: regulatory mechanisms to incentive renewable alternative energy sources in Brazil, *Volume 33 (13)*, 1745-1752.

CEMIG, (2012). 27º Balanço Energético de Minas Gerais - BEEMG, 2012, Ano base 2011. Companhia Energética de Minas Gerais.

COOLS, D.; MERCKX, R.; VLASSAK, K.; VERHAEGEN, J. (2001). Survival of *E. Coli* and *Enterococcus* spp. Derived From Pig Slurry in Soils of Different Texture. *Applied Soil Ecology*. Vol 17, 53-62.

COSTA, C. V., ROVEREA, E., ASSMANN, D. (2008). Technological innovation policies to promote renewable energies: Lessons from the European experience for the Brazilian case. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 12 (1), 65-90.

DIESEL, R.; MIRANDA, C. R.; PERDOMO, C. C. (2002) Coletânea de tecnologias sobre dejetos suínos. *Boletim Informativo – BIPERS*, Vol 10 (14).

DUTCHMAN, 2015. Disponível em: <http://lostdutchmancoffee.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/09/Map.jpg>, (Consulta em: 03/2015).

EPE, (2012). EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2012. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Formas/Anurio.aspx>. (Consulta em:06/2014).

EurObserv'ER. Disponible en: [http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat\\_baro/observ/baro224\\_Biogas\\_en.pdf](http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/observ/baro224_Biogas_en.pdf) . (Consulta em: 10/2014).

FABbiogas, [http://www.fabbiogas.eu/fileadmin/user\\_upload/Home/AD-process-diagram2.jpg](http://www.fabbiogas.eu/fileadmin/user_upload/Home/AD-process-diagram2.jpg). (Consulta em: 06/2015).

FERREIRA, M., MARQUES, I. P., MALICO, I. (2012). Biogas in Portugal: Status and public policies in a European context, *Energy Policy*, Vol 43, 267-274.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO – FJP. (2011). Índice Mineiro de Responsabilidade Social. Versão 2011. Belo Horizonte: FJP.

IEA, (2013). Key World Energy Statistics, International Energy Agency. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2013.pdf>, (Consulta em: 08/2014).

IEA BIOENERGY (2014) Task 37 Biogas Country Overview, Disponível em: <http://www.iea-biogas.net/country-reports.html?file=files/daten-redaktion/down>. (Consulta em: 08/2014).

JINGURA, R. M., MATENGAIFA, R. (2009). Optimization of biogas production by anaerobic digestion for sustainable energy development in Zimbabwe, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 13 (5), 1116-1120.

LANSING, S., MARTIN, F., BOTERO, R.B., NOGUEIRA DA SILVA, T., DIAS DA SILVA, E. (2010). Methane production in low-cost, unheated, plug-flow digesters treating swine manure and used cooking grease. *Bioresour. Technol.* 101, 4362–4370.

LI, Q., QIAO, W., WANG, X., TAKAYANAGI, K., SHOFIE, M., LI, Y-Y. (2015). Kinetic characterization of thermophilic and mesophilic anaerobic digestion for coffee grounds and waste activated sludge, *Waste Management*, Vol 36: 77-85.

MANGOYANA, R. B., SMITH, T. F. (2011). Decentralised bioenergy systems: A review of opportunities and threats, *Energy Policy*, Vol 39 (3) 1286-1295.

MARKOVSKA, N., KLEMEŠ, J. J., DUIĆ, N., GUZOVIĆ, Z., MATHIESEN, B. V., LUND, H., YAN, J. (2014). Sustainable development of energy, water and environment systems, *Applied Energy*, Vol 135 pp. 597-599.

MARTÍNEZ-GARCÍA, G., JOHNSON, A.C., BACHMANN, R.T., WILLIAMS, C.J., BURGOYNE, A., EDYVEAN, R.G.J. (2007). Two-stage biological treatment of olive mill wastewater with whey as co-substrate. *International Biodeterioration Biodegradation* 59, 273–282.

MINAS GERAIS, 2014. Disponível em: [http://www.minas-gerais.net/diretorio/index.php?cat\\_id=763](http://www.minas-gerais.net/diretorio/index.php?cat_id=763), (Consulta em: 08/2014).

MONDRAGÓN, F. A., SAMAR, P., COX, H. H. J., AHRING, B. K., IRANPOUR, R. (2006). Anaerobic codigestion of municipal, farm, and industrial organic wastes: A survey of recent literature. *Water Environ. Res.* 78: 607-636.

MOURA, A. D., JUNQUEIRA, B. A., ROCHA, D. T., SILVA Jr., A. G. (2004). Relatório complementar de caracterização do arranjo produtivo da suinocultura de Ponte Nova (MG) e região. SEBRAE – MG, 16 p.

NETTO, M. M., DINIZ, A. M. A. (2005). A estagnação sócio-econômica da Zona da Mata de Minas Gerais: uma abordagem geohistórica. X Encontro de Geógrafos da América Latina, São Paulo.

OLIVEIRA, P. A. V.; HIGARASHI, M. M.; NUNES, M. L. A. (2003) Efeito Estufa. *Suinocultura Industrial*, São Paulo, v. 25, n. 7, ed. 172, p. 16-20.

ORRICO JUNIOR, M.A.P., ORRICO, A.C.A., LUCAS JUNIOR, J. (2010). Biodigestão anaeróbia dos resíduos da produção avícola: cama de frangos e carcaças. *Eng. Agríc.*, 30 (3), 546-554.

OUEDRAOGO, N. S. (2013). Energy consumption and human development: Evidence from a panel cointegration and error correction model. *Energy*, 63, 28-41.

PAULA, A. R. P. ; CRISTOVAO, E. C. ; MIRANDA, H. P. ; AMARAL, T. O. (2013). Vocaç o Energética na Zona da Mata Mineira. XIV Encontro de Geógrafos da América Latina, Lima – Peru.

POTTMAIER, D. ; MELO, C.R. ; SARTOR, M.N. ; KUESTER, S. ; AMADIO, T.M. ; FERNANDES, C.A.H. ; MARINHA, D. ; ALARCON, O.E. (2013). The Brazilian energy

matrix: From a materials science and engineering perspective. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 19, 678-691.

RAVEN, R.P.J.M., GREGERSEN, K.H. (2007). Biogas plants in Denmark: successes and setbacks, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 11 (1), 116-132.

RIAÑO, B., GARCÍA-GONZÁLEZ, M.C. (2015). Greenhouse gas emissions of an on-farm swine manure treatment plant – comparison with conventional storage in anaerobic tanks, *Journal of Cleaner Production*, Volume 103 542-548.

ROMANO, R. T., ZHANG, R. (2008). Co-digestion of onion juice and wastewater sludge using an anaerobic mixed biofilm reactor, *Bioresource Technology*, Vol 99 (3): 631-637.

SALMINEN, E., RINTALA, J. (2002). Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste – a review, *Bioresource Technology*, Vol 83 (1): 13-26.

SOITO, J. L. S. ; FREITAS, M. A. V. (2011). Amazon and the expansion of hydropower in Brazil: Vulnerability, impacts and possibilities for adaptation to global climate change. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 15, p. 3165-3177.

THRÄN, D., PERSSON, T., SVENSSON, M., DANIEL-GROMKE, J., PONITKA, J., SEIFFERT, M., BALDWIN, J., KRANZL, L., SCHIPFER, F., MATZENBERGER, J., DEVRIENDT, N., DUMONT, M., DAHL, J., BOCHMANN, G. (2014). Biomethane – status and factors affecting market development and trade. IEA Task 40 and Task 37 Joint Study.

VOLPI, G., JANUZZI, G. M., GOMES, R. D. M. (2006). A sustainable electricity blueprint for Brazil. *Energy for Sustainable Development Journal*. Vol 4: 14-24.

WANG, X.J., YANG, G.H., FENG, Y.Z., REN, G.X. (2012). Potential for biogas production from anaerobic co-digestion of dairy and chicken manure with corn stalks. *Adv. Mat. Res.* 347, 2484–2492.

WARR, B.S., AYRES, R.U. (2010). Evidence of causality between the quantity and quality of energy consumption and economic growth, *Energy*, Vol 35 (4), 1688-1693.

WU, W. (2007). Anaerobic co-digestion of biomass for methane production: recent research achievements. Iowa State University.

XIE, S., LAWLOR, P.G., FROST, J.P., HU, Z., ZHAN, X. (2011). Effect of pig manure to grass silage ratio on methane production in batch anaerobic co-digestion of pig manure and grass silage. *Bioresour. Technol.* 102, 5728–5733

## **CAPÍTULO 2**

### **INTRODUÇÃO GERAL**

## 2. 1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

### 2.1.1. ENERGIAS RENOVÁVEIS NO BRASIL

O Brasil é o quinto maior país do mundo em área e em população com mais de 200 milhões de habitantes (IBGE, 2015). Desde outubro de 2012 o Sistema Elétrico Brasileiro vem enfrentando problemas na geração de eletricidade devido o baixo nível dos reservatórios das hidrelétricas. Como consequência o país aumentou a capacidade instalada de usinas térmicas que chegou a 37,8 GW em 2014, dos quais mais de 70% são gerados a partir de combustíveis fósseis (ANEEL, 2015). De acordo com especialistas, se persistir esse cenário, pode ocorrer racionamento de energia com reflexos na qualidade de vida da população e no crescimento econômico.

A participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira está diminuindo nos últimos anos conforme pode ser visto na Figura 2.1.

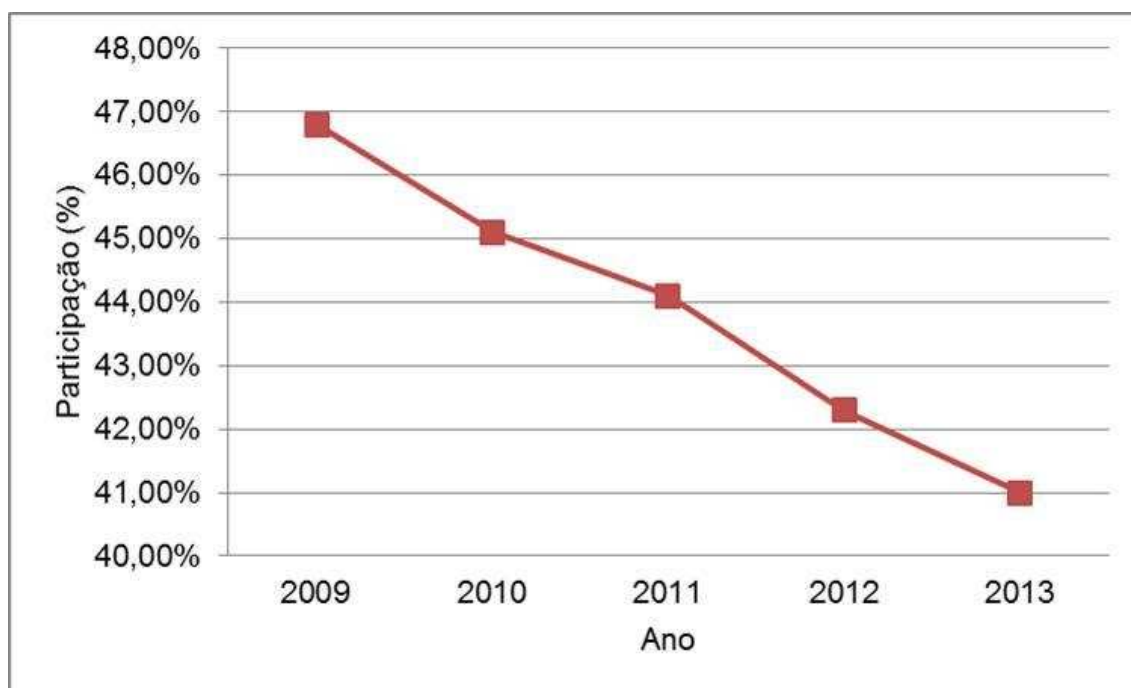


Figura 2.1 – Participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira de 2009 a 2013.

Fonte: Elaborado com base no Balanço Energético Nacional dos anos de 2009, 2010, 2011, 2012 e 2013.

A energia hidráulica respondeu pela maior parte da oferta de eletricidade no Brasil no ano de 2013 conforme pode ser visto na Figura 2.2.

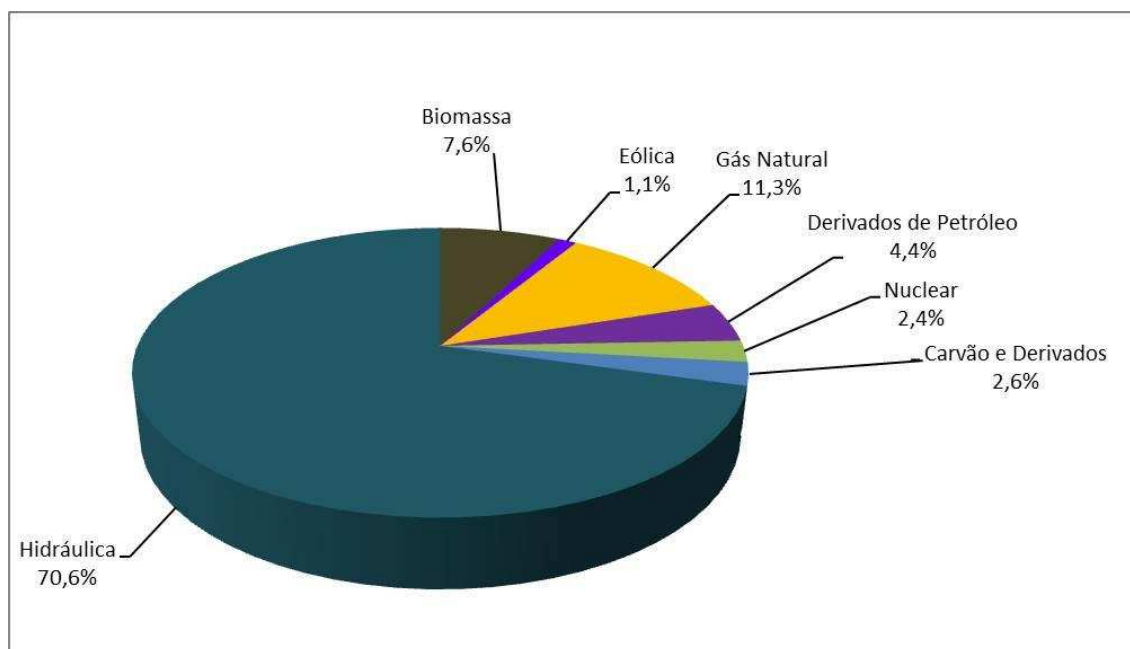


Figura 2.2 - Oferta interna de energia elétrica no Brasil.

Fonte: (BRASIL, 2015).

A geração de eletricidade por meio de grandes usinas hidrelétricas, devido aos impactos ambientais advindos de sua implantação e ao fato de 63% do potencial hidrelétrico estar localizado no norte do país principalmente na bacia amazônica, vem sendo duramente criticada, o que pode reduzir a exploração deste potencial. Surge então a necessidade de exploração de novas formas de geração de energia elétrica de fontes renováveis (SOITO e FREITAS, 2011; BRASIL, 2015).

A participação da energia eólica na matriz energética brasileira vem crescendo nos últimos anos. A previsão é de que a capacidade instalada de energia eólica no país chegará a 11% no final de 2023 (BRASIL, 2014). No entanto a expansão dessa fonte de energia tem enfrentado barreiras técnicas e econômicas (SILVA, et al., 2013).

A biomassa foi a principal fonte primária de energia durante grande parte da história da humanidade, sendo substituída pelo carvão mineral e pelo petróleo a partir da segunda metade do século XVIII com o surgimento da Revolução Industrial. No ano de 2013 a biomassa (lenha, bagaço de cana, lixo e outras) respondeu por

7,6% da oferta de eletricidade gerada no Brasil. Um valor pequeno considerando-se o enorme potencial de aproveitamento energético da biomassa no país.

## 2.1.2. PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NO BRASIL

A agropecuária tem um importante papel para o desempenho da economia brasileira com uma participação de 22,24% do PIB do ano de 2012 (CEPEA, 2015).

A seguir são apresentadas informações sobre a área plantada e a produção das lavouras permanentes e temporárias com maior representatividade na produção vegetal e os principais rebanhos efetivos da pecuária do país.

Quadro 2.1 – Área plantada e produção de culturas permanentes no Brasil no ano de 2014

Cultura	Área Plantada (ha)	Produção (t ano <sup>-1</sup> )
Café	2.122.573	3.037.534
Cacau	686.541	253.211
Banana	490.423	6.902.184
Laranja	762.765	18.012.560
Coco-da-baía	259.737	1.954.354
Castanha-de-caju	765.030	80.630
Uva	82.897	1.514.768

Fonte: (IBGE, 2014a).

Quadro 2.2 – Área plantada e produção de culturas temporárias no Brasil no ano de 2014

Cultura	Área Plantada (ha)	Produção (t ano <sup>-1</sup> )
Soja	25.090.559	65.848.857
Milho	15.065.288	71.072.818
Cana-de-açúcar	9.752.328	721.077.287
Feijão	3.182.815	2.794.854
Arroz	2.443.182	11.549.881
Trigo	1.941.703	4.418.388
Mandioca	1.757.734	23.044.557

Fonte: (IBGE, 2014a).

Quadro 2.3 – Rebanho efetivo das principais criações do Brasil no ano de 2014

Tipo de Rebanho	Rebanho Efetivo (nº de cabeças)
Galos, frangas, frangos e pintos	1.032.038.992
Galinhas	213.230.493
Bovinos	211.279.082
Suínos	38.795.902
Caprinos	8.646.463
Ovinos	16.789.492

Fonte: (IBGE, 2014b).

Juntamente com os benefícios que a agropecuária traz para o país estão os impactos ao meio ambiente, principalmente os relacionados com os resíduos. O manejo inadequado desses resíduos provoca a poluição do ar, a contaminação dos rios e lençóis de água superficiais que abastecem tanto o meio rural como o urbano acarretando desequilíbrios ecológicos, disseminação de patógenos e contaminação das águas potáveis com amônia, nitratos e outros elementos tóxicos (DIESEL, *et al.* 2002; COOLS *et al.*, 2001). Uma alternativa para mitigar os danos ambientais e aumentar a competitividade da atividade agropecuária é o aproveitamento dos resíduos para a produção de biogás/biometano e de biofertilizante, o que contribui para a diversificação da matriz energética e melhoria do meio ambiente. (COIMBRA-ARAÚJO, *et al.*, 2014).

### 2.1.3. CODIGESTÃO ANAERÓBIA

Um dos possíveis processos de conversão dos resíduos agropecuários em energia é a biodigestão anaeróbia que consiste na transformação da biomassa orgânica em biogás/biometano pela ação de microorganismos. Considerando que a relação carbono/nitrogênio (C/N) para dejetos animais é muito baixa para que o processo de digestão aneróbia ocorra de forma eficiente, uma solução visando melhorar o processo de biodigestão anaeróbia e maximizar a produção de biogás é a codigestão de resíduos animais com resíduos vegetais. Os benefícios das usinas de codigestão foram relatados pela primeira vez por Hills e Roberts (1981) e Hashimoto (1983), constatando-se que os resíduos animais tem a capacidade de tamponamento e de fornecer uma grande quantidade de nutrientes para os microorganismos. Os resíduos vegetais adicionados com alto teor de carbono

podem melhorar a relação C/N da matéria-prima, diminuindo assim o risco de inibição por amoníaco para o processo de digestão. Além disso, a codigestão com diferentes substratos permite que as substâncias tóxicas sejam diluídas permitindo ainda o incremento da biodegradabilidade da mistura e o estímulo da atividade microbiológica (CONVERTI *et al.*, 1997). Esta sinergia positiva implica num maior rendimento de metano (MATA-ALVAREZ *et al.*, 2000).

A codigestão anaeróbia é uma solução com viabilidade técnica-econômica para muitas situações e devido ao seu grande potencial inexplorado para a produção de biogás por meio da digestão anaeróbia, os resíduos vegetais merecem ser mais estudados como matéria-prima para a codigestão com resíduos animais (WANG, 2009). O processo de codigestão apresenta como principais vantagens a redução da demanda bioquímica de oxigênio (DBO), produção de biogás e de biofertilizante, baixo custo operacional, baixo custo de investimento e tratamento descentralizado dos dejetos (ORRICO JÚNIOR *et al.*, 2010). Esse processo ocorre dentro de câmaras denominadas biodigestores que realizam a fermentação anaeróbia da matéria orgânica que consiste na transformação de compostos orgânicos complexos principalmente em metano e dióxido de carbono por ação de microorganismos que atuam na ausência de oxigênio (KIRB *et al.*, 1987).

O teor de metano no biogás é de aproximadamente 65%, a proporção de dióxido de carbono é de cerca de 30%, e em menores proporções estão nitrogênio, hidrogênio, monóxido de carbono e gás sulfídrico (RIBEIRO e RAIHER, 2013). Embora não exista uma norma internacional, na Holanda com 85% de metano o biogás é considerado biometano, enquanto que este percentual aumenta para 96% e 97% para Suíça e Suécia, respectivamente (SUWANSRI, *et al.*, 2014).

O processamento de resíduos agropecuários por meio da codigestão anaeróbica e a consequente produção de biogás/biometano têm importante contribuição para as questões de sustentabilidade ambiental, especialmente relacionada com o aquecimento global, acidificação e eutrofização (DRESSLER *et al.*, 2012;. MEYER AURICH, *et al.*, 2012).

#### 2.1.4. BIOFERTILIZANTE

O Brasil é o quarto consumidor mundial de fertilizantes, ficando atrás somente da China, Índia e Estados Unidos. O país é dependente das importações de adubo químico o que provoca o encarecimento da produção de alimentos. A Figura 2.3 apresenta a produção nacional, a importação e o consumo total de fertilizantes no Brasil no período de 2011 a 2014.

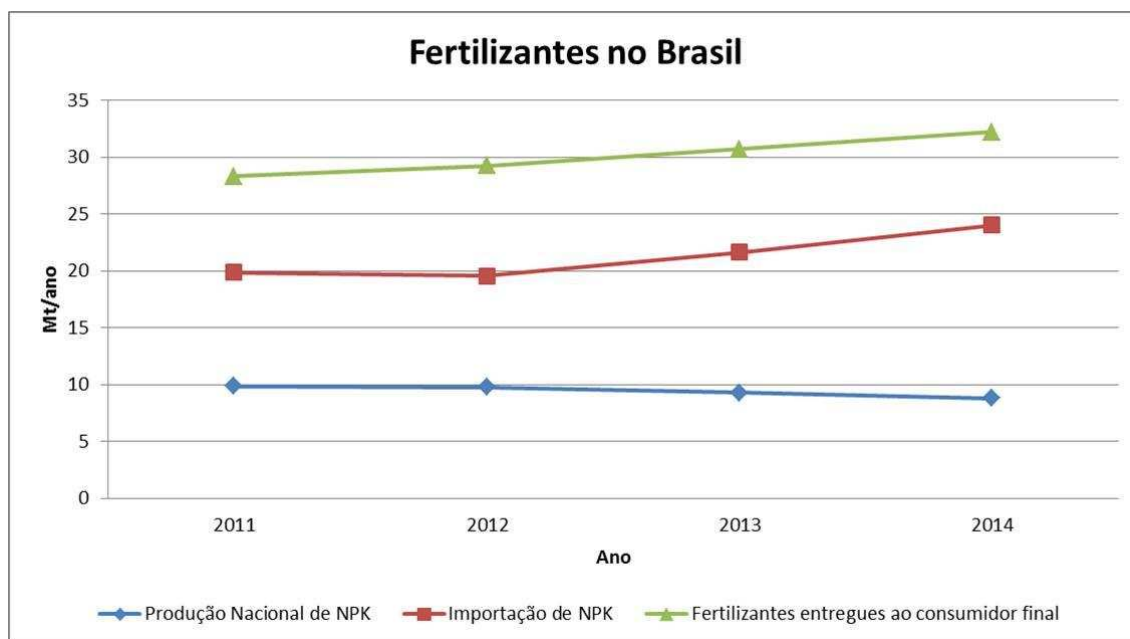


Figura 2.3 – Produção, importação e consumo total de fertilizantes no Brasil.

Fonte: Elaborado com base nos dados fornecidos por ANDA, 2015.

A produção de fertilizantes nitrogenados e produtos fitossanitários respondem por grande parcela da energia indireta consumida no setor agropecuário. A obtenção desses produtos é feita a partir de petróleo e/ou gás natural ou sua obtenção é feita por meio de processos físicos-químicos utilizando nitrogênio atmosférico, o que demanda grandes quantidades de energia, fornecida por combustíveis fósseis (ALBIERO, 2012).

O uso do biofertilizante, resultante da biodigestão anaeróbia dos dejetos de animais e da codigestão com resíduos vegetais, pode representar uma alternativa para a redução do custo na produção de alimentos e para a redução dos impactos ambientais (DIAS e FERNANDES, 2006).

### 2.1.5. A ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS

Esse estudo teve por objetivo a busca de soluções energéticas para as cadeias produtivas de frango de corte e da suinocultura da mesorregião da Zona da Mata de Minas Gerais a partir do aproveitamento dos resíduos agropecuários. Essa mesorregião é formada por 142 municípios agrupados em sete microrregiões. Situa-se na porção sudeste do estado, próxima à divisa dos estados do Rio de Janeiro e do Espírito Santo. Os 2,19 milhões de habitantes da Zona da Mata representam 10,63% da população de Minas Gerais. Em 2011, a participação da região no Produto Interno Bruto (PIB) do Estado foi de apenas 7,47%. Em 2001, a Zona da Mata era responsável por 8,3% do PIB mineiro. Com mais de 5% da população abaixo da linha da miséria e crescente perda de dinamismo econômico, o combate à pobreza extrema é um desafio para a região (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2011).

A Figura 2.4 mostra a localização da Zona da Mata de Minas Gerais e suas respectivas microrregiões.



Figura 2.4 – Mesorregião da Zona da Mata de Minas Gerais.

Fonte: (DUTCHMAN, 2015) e (MINAS GERAIS, 2014)

A agropecuária na região é tradicional e voltada majoritariamente para o atendimento do mercado local/regional, com exceção dos segmentos da cafeicultura, suinocultura e avicultura (NETTO e DINIZ, 2005). Dentre os cultivos agrícolas se destacam, além do café, o feijão, o milho e a cana de açúcar.

## **2.2. LIMITAÇÕES**

A avaliação do potencial de codigestão dos dejetos da suinocultura e avicultura com os resíduos dos cultivos vegetais da região da Zona da Mata e a produção de biometano foi realizada a partir de dados da literatura científica sobre o assunto. Na análise econômica considerou-se toda a energia elétrica gerada nas propriedades ou condomínios de agroenergia sendo comercializada. O estudo mostrou que a eletricidade gerada é capaz de atender à demandas de energia elétrica da produção de suínos e frangos, no entanto não foi possível avaliar a independência energética das granjas devido as características heterogêneas das mesmas (número de residências, número de pessoas, equipamentos eletroeletrônicos, etc.). Devido o custo de transação de projetos de geração de créditos de carbono ser extremamente elevado a geração de receitas a partir dos Certificados de Emissões Reduzidas (CER) não foi considerada na análise econômica dos empreendimentos.

Apesar das limitações acima apresentadas o trabalho contribui para o planejamento energético a partir dos resíduos agropecuários da região estudada e para auxiliar na elaboração de políticas públicas visando a diversificação da matriz energética e o desenvolvimento sustentável.

## 2.3. ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está estruturada da seguinte forma:

O capítulo 1 apresenta um resumo prolongado da tese em espanhol.

O capítulo 2 apresenta uma introdução geral da tese apresentando os principais temas abordados neste estudo.

O capítulo 3 apresenta o estado da arte da codigestão anaeróbia de dejetos de animais e resíduos agroindustriais, bem como das políticas públicas de incentivo à geração de energia a partir do biogás/biometano existentes na União Europeia e Brasil.

O capítulo 4 propõe uma ferramenta computacional utilizada para estimar o potencial de produção de biometano, energia elétrica, biofertilizante e calcular a viabilidade econômica dos empreendimentos.

O capítulo 5 apresenta o potencial de geração de energia elétrica com a codigestão dos dejetos da suinocultura e avicultura com os resíduos de cultivos vegetais e seus impactos na matriz elétrica da Zona da Mata de Minas Gerais.

O capítulo 6 apresenta a viabilidade da produção de biometano e energia elétrica em granjas de suínos e frango de corte de pequeno, médio e grande porte em diferentes municípios da região de estudo.

O capítulo 7 trata do dimensionamento de condomínios de agroenergia, de pequeno, médio e grande porte para a produção de biometano a partir da codigestão anaeróbia dos dejetos da suinocultura e da avicultura com resíduos de cultivos vegetais na região estudada.

O capítulo 8 apresenta uma conclusão geral apresenta as conclusões parciais de cada capítulo e uma avaliação geral do aproveitamento energético dos resíduos agropecuários na região da Zona da Mata de Minas Gerais.

## 2.4. ORIGINALIDADE DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho foi apresentar soluções energéticas para as cadeias produtivas de frango de corte e da suinocultura na Zona da Mata de Minas Gerais a partir da codigestão anaeróbia de resíduos agropecuários disponíveis na região. Foi desenvolvida uma ferramenta computacional denominada SAUDADE (Sistema de Avaliação do Uso da Digestão Anaeróbia para o Dimensionamento Energético) formada por planilhas de cálculo do Microsoft Excel. A ferramenta possui uma base de dados constituída em uma *geodatabase* com a finalidade de criar o vínculo com o Sistema de Informação Geográfica (SIG) desenvolvido em ArcGIS. Para a otimização da mistura de resíduos animais e vegetais visando maximizar a produção de biometano foi utilizado o complemento do Microsoft Excel chamado Solver que permite o cálculo e a otimização por meio de programação linear.

Atualmente a tecnologia de produção de biogás/biometano mais utilizada no Brasil é a digestão anaeróbia com um único substrato (dejetos de animais). A originalidade deste estudo reside em avaliar o potencial de produção de biometano a partir da mistura dos dejetos de suínos e frango de corte com resíduos vegetais dos principais cultivos da região (café, feijão, milho e cana-de-açúcar) agropecuários, bem como de seus impactos na matriz energética regional e a viabilidade econômica de tais empreendimentos. Os resíduos agropecuários possuem um grande valor agrônomo dado os nutrientes neles contidos. O aproveitamento desse potencial biofertilizante do digestato pode contribuir para o atendimento da grande demanda da agricultura brasileira e para o equilíbrio das finanças dos produtores agrícolas brasileiros. Além disso, o biofertilizante diminui o uso de combustíveis fósseis na fabricação dos insumos agrícolas contribuindo também para diminuir as emissões de gases de efeito estufa.

Outra contribuição do estudo, diz respeito ao dimensionamento de condomínios de agroenergia de diferentes tamanhos, bem como dos sistemas de gestão e transporte dos resíduos e/ou biometano.

O estudo apresenta a vantagem de sua metodologia poder ser aplicada em qualquer região do país e do mundo, desde que haja disponibilidade de dados estatísticos das atividades agropecuárias e informações geográficas para o dimensionamento dos condomínios de energia.

O trabalho contribui no debate da diversificação da matriz energética brasileira, a necessidade de políticas públicas claras e efetivas de incentivo e os benefícios ambientais, econômicos e sociais do aproveitamento energético do biometano produzido a partir de resíduos agropecuários. Os resultados apontam também para a possibilidade da independência e soberania energética e sustentabilidade ambiental das atividades da suinocultura e avicultura na região da Zona da Mata de Minas Gerais.

O trabalho foi motivado pelos seguintes fatores relacionados às cadeias produtivas de frango de corte e suínos na região da Zona da Mata de Minas Gerais:

- (i) Influência na economia regional;
- (ii) Impacto ambiental provocado pelos dejetos produzidos;
- (iii) Possibilidade da independência energética das granjas;
- (iv) Contribuição para a diversificação da matriz energética regional;
- (iv) Aumentar a competitividade das atividades na região diminuindo a possibilidade de transferência para outras regiões (como o centro-oeste do Brasil) em que a disponibilidade de insumos como o milho e a soja contribui para a maior viabilidade dessas atividades.

O estudo foi desenvolvido com um período de doutorado-sanduíche (setembro de 2013 a junho de 2015) na Universidad de Valldolid – Campus Palencia.

Pretende-se a partir deste trabalho realizar experimentos em laboratório para avaliar o potencial de geração de biometano com a codigestão dos resíduos agropecuários que foram simulados neste estudo. Además, o autor da tese pretende realizar o dimensionamento energético a partir de resíduos agropecuários para outras regiões.

## 2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBIERO, D. Utilização de energia na agricultura - Parte II. <http://www.diadecampo.com.br>. (Consultado em: 09/2012).

ANDA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. Principais indicadores do setor de fertilizantes. Disponível em: [http://www.anda.org.br/estatistica/Principais Indicadores 2014.pdf](http://www.anda.org.br/estatistica/Principais%20Indicadores%202014.pdf). (Consulta em: 04/2015).

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, Resumo Geral dos Novos Empreendimentos de Geração. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=37&idPerfil=2> (Consulta em: 03/2015).

BRASIL, Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Balanço Energético Nacional 2014 – Ano base 2013 [www.epe.gov.br/](http://www.epe.gov.br/) (Consulta em: 04/2015).

BRASIL, MME (Ministério de Minas e Energia). 2014. Plano Decenal de Expansão de Energia 2033. MME, Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Brasília, DF, Brasil. 434 pp.

CEPEA – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. PIB do agronegócio. 2012. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br/pib/>>. Acesso em: Abr 2015.

COIMBRA-ARAÚJO, C. H., MARIANE, L., BLEY JÚNIOR, C., FRIGO, E.P., FRIGO, M. S., ARAÚJO, I. R. C., ALVES, H. J. (2014). Brazilian case study for biogas energy: Production of electric power, heat and automotive energy in condominiums of agroenergy. *Renew. Sustainable Energy Rev.*, Vol 40, 826-839.

CONVERTI, A., DRAGO, F., GHIAZZA, G., DEL BORGHI, M., MACCHIAVELLO, A. (1997). Co digestion of municipal sewage sludge and pre-hydrolysed woody agricultural wastes, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, Vol 69, 231-239.

COOLS, D.; MERCKX, R.; VLASSAK, K.; VERHAEGEN, J. (2001). Survival of E. Coli and Enterococcus spp. Derived From Pig Slurry in Soils of Different Texture. *Applied Soil Ecology*. Vol 17, 53-62.

DIAS, V. P., FERNANDES, E. (2006). Fertilizantes: uma visão global sintética, BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 24, 97 – 138.

DIESEL, R.; MIRANDA, C. R.; PERDOMO, C. C. (2002). Coletânea de tecnologias sobre dejetos suínos. *Boletim Informativo – BIPERS*, Vol 10 (14). 4-28.

DRESSLER, D., LOEWEN, A., NELLES, M. (2012). Life cycle assessment of the supply and use of bioenergy: impact of regional factors on biogas production. *Int J Life Cycle Assess*, 17 (9): 1104–1115.

DUTCHMAN (2015). Disponível em: <http://lostdutchmancoffee.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/09/Map.jpg>, (Consulta em: 03/2015).

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO – FJP. (2011). Índice Mineiro de Responsabilidade Social. Versão 2011. Belo Horizonte: FJP.

HASHIMOTO, A.G. (1983). Conversion of straw-manure mixtures to methane at mesophilic and thermophilic temperatures. *Biotechnol. Bioeng.* 25: 185–200.

HILLS, D.J., ROBERTS, D.W. (1981). Anaerobic digestion of dairy manure and field cropresidues. *Agric. Wastes* 3: 179–189.

IBGE, 2014a. Pesquisa Agrícola Municipal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pam/default.asp?o=28&i=P>, (Consulta em: 09/2014).

IBGE, 2014b. Pesquisa Pecuária Municipal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/ppm/default.asp?o=27&i=P>, (Consulta em: 09/2014).

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Projeção da População do Brasil. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>. (Consulta em: 04/2015).

KIRB, F.F., BILJETINA, R. (1987). Reactor designs. In: Chynoweth, D. P., Isaacson, R. Anaerobic digestion of biomass. London: Elsevier, 141-171.

MATA-ALVAREZ, J., MACE, S. LLABRES, P. (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technol.*, 74, 3 – 16.

MEYER-AURICH, A., SCHATTAUER, A., HELLEBRAND, H.J., KLAUSS, H., PLÖCHL, M., BERGA, W. (2012). Impact of uncertainties on greenhouse gas mitigation potential of biogas production from agricultural resources. *Renew. Energy*, 37(1): 277–284.

MINAS GERAIS, 2014. Disponível em: [http://www.minas-gerais.net/diretorio/index.php?cat\\_id=763](http://www.minas-gerais.net/diretorio/index.php?cat_id=763), (Consulta em: 08/2014).

NETTO, M. M., DINIZ, A. M. A. (2005). A estagnação sócio-econômica da Zona da Mata de Minas Gerais: uma abordagem geohistórica. X Encontro de Geógrafos da América Latina, São Paulo.

ORRICO JUNIOR, M.A.P., ORRICO, A.C.A., LUCAS JUNIOR, J. (2010). Biodigestão anaeróbia dos resíduos da produção avícola: cama de frangos e carcaças. *Eng. Agríc.*, 30 (3), 546-554.

RIBEIRO, M. F. S., RAIHER, A. P., Potentialities of energy generation from waste and feedstock produced by the agricultural sector in Brazil: The case of the State of Paraná, *Energy Policy*, Vol 60, 208-216.

SILVA, N. F., ROSA, L. P., FREITAS, M. A. V., PEREIRA, M. G.(2013), Wind energy in Brazil: From the power sector's expansion crisis model to the favorable environment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 22, 686-697.

SOITO, J. L. S. ; FREITAS, M. A. V. (2011). Amazon and the expansion of hydropower in Brazil: Vulnerability, impacts and possibilities for adaptation to global climate change. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol 15, 3165-3177.

SUWANSRI, S., MORAN, J.C., AGGARANGSI, P., TIPPAYAWONG, N., BUNKHAM, A., RERKKRIANGKRAI, P., (2014). A biomethane solution for domestic cooking in Thailand. *Energy Sustain. Dev.* Vol 23, 68-77.

WANG, G. 2009. Biogas production from energy crops and agriculture residues. Thesis Dissertation, Technical University of Denmark.

## **CAPÍTULO 3**

# **ESTADO DA ARTE DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS E DAS POLÍTICAS PÚBLICAS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA COM BIOGÁS/BIOMETANO**

## **RESUMO:**

A energia está presente em todas as ações de nosso cotidiano o que torna fundamental conhecer e dominar as tecnologias de conversão energética visando suprir a demanda de energia para nossas atividades e garantir a preservação do meio ambiente e o desenvolvimento sustentável. Os impactos ambientais causados pelo uso dos combustíveis fósseis tornou necessária a pesquisa de novas fontes de energia. O biogás/biometano obtido da digestão anaeróbia de dejetos animais, resíduos agrícolas, industriais ou residenciais é uma alternativa energética para a humanidade. Neste trabalho avaliou-se o estado da arte da codigestão anaeróbia de dejetos de animais e resíduos agroindustriais visando melhorar a produção de biogás/biometano. Foi avaliado o estado da arte do biogás/biometano e as principais políticas públicas de incentivo à produção de energia a partir dessa fonte na União Europeia e no Brasil. Concluiu-se que a codigestão, dependendo da proporção dos co-substratos, aumenta a produção de biogás/biometano, havendo a necessidade de mais pesquisas sobre o tema. O estudo aponta a necessidade de políticas claras e eficazes para a maior participação do biogás/biometano na matriz energética mundial.

**Palavras-chave:** energia renovável, aproveitamento de resíduos, políticas públicas

### 3.1. INTRODUÇÃO

A questão energética é ponto central dentro do conceito de desenvolvimento sustentável, compreendido como o processo que busca atender as necessidades do presente sem comprometer o futuro (MARKOVSKA, *et al.*, 2014). A energia está presente em todas as ações de nosso cotidiano o que torna fundamental conhecer e dominar as tecnologias de conversão energéticas com vistas a suprir a demanda de energia para nossas atividades e garantir a preservação do meio ambiente e o desenvolvimento sustentável (VOLPI, *et. al*, 2006).

O fim das reservas de petróleo e os impactos ambientais causados pelo uso dos combustíveis fósseis tornaram a discussão sobre novas fontes de energia a pauta das reuniões entre os chefes de governo em todo mundo, objeto de pesquisa em universidades e centros de pesquisa e preocupação para os cidadãos.

Uma das fontes renováveis para a geração de energia é o biogás resultante da digestão anaeróbia de dejetos animais, resíduos agrícolas, industriais ou residenciais.

O Quadro 3.1 mostra a composição típica dos principais gases constituintes do biogás.

Quadro 3.1 – Composição da mistura gasosa do biogás.

Gases	Porcentagem
Metano (CH <sub>4</sub> )	55 – 70
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	30 – 45
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	1 – 3
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	0,5 – 2,5
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	0,1 – 1
Ácido Sulfídrico (H <sub>2</sub> S)	0,1 – 0,5
Amônia (NH <sub>3</sub> )	0,1 – 0,5
Monóxido de Carbono (CO)	0 – 0,1
Água (H <sub>2</sub> O)	Variável

Fonte: (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2011).

Objetivou-se com este trabalho: (i) avaliar o estado da arte da codigestão anaeróbia de dejetos de animais e resíduos agroindustriais; (ii) fazer o levantamento das principais políticas públicas de incentivo para a produção de energia a partir do biogás/biometano na União Europeia e no Brasil.

### **3.2. MATERIAL E MÉTODOS**

A metodologia empregada neste trabalho foi a pesquisa exploratória e descritiva por meio de artigos científicos, relatórios e documentos produzidos por centro de pesquisa e órgãos governamentais.

A avaliação do estado da arte da codigestão anaeróbia foi realizada por meio das informações de trabalhos científicos a partir de 2005 cujo tema envolvia o aproveitamento energético de dejetos animais e resíduos agroindustriais.

A avaliação do estado da arte do biogás/biometano nos países da União Europeia e no Brasil considerou informações contidas em artigos científicos e relatórios com dados sobre: (i) produção e utilização do biogás/biometano nestes países; (ii) legislação e mecanismos de incentivo existentes para a produção de biogás/biometano e sua conversão em energia.

### 3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.3.1. DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia se caracteriza pela degradação da matéria orgânica sem a presença de oxigênio. Existem três estágios com três diferentes grupos de microorganismos. Primeiramente as bactérias fermentativas (microorganismos anaeróbios e facultativos) hidrolizam e fermentam as matérias orgânicas mais complexas (carboidratos, proteínas e lipídios) transformando-os em ácidos graxos, álcool, dióxido de carbono, hidrogênio, amônia e sulfetos. A seguir as bactérias acetogênicas consomem os produtos primários produzindo hidrogênio, dióxido de carbono e ácido acético. Finalmente dois grupos distintos de bactérias metanogênicas reduzem o dióxido de carbono a metano e descarboxila, o ácido acético produzindo metano e dióxido de carbono, respectivamente (SALMINEM e RENTALA, 2002).

A Figura 3.1 mostra o processo da digestão anaeróbia e os microorganismos que atuam nas fases da hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

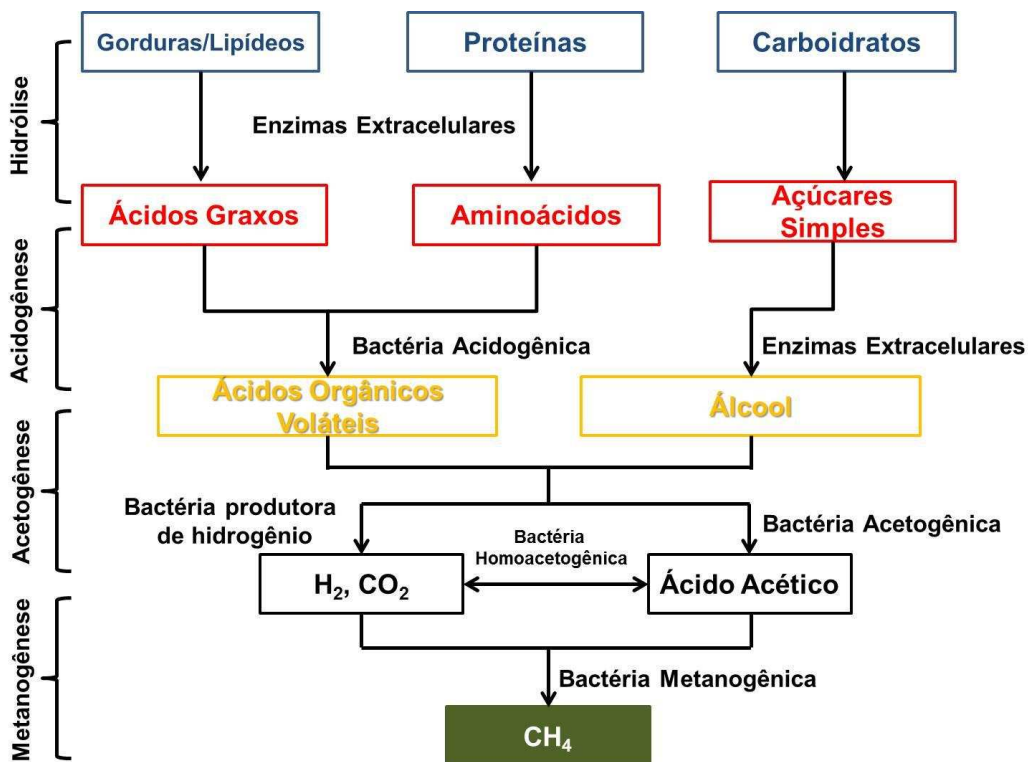


Figura 3.1 – Esquema da digestão anaeróbia.

Fonte: Adaptado de (MAO, *et al.*, 2015; AL SEADI, 2001)

A digestão anaeróbia ocorre em câmaras denominadas digestores. Os principais parâmetros para o dimensionamento dos digestores são a carga orgânica, o tempo de retenção hidráulica e a temperatura de operação (ROMANO e ZHANG, 2007). De acordo com a temperatura a digestão anaeróbia pode ser classificada em: (i) digestão mesofílica; e (ii) digestão termofílica. Na digestão mesofílica o digestor é aquecido até temperaturas entre 30° e 35° C sendo o tempo de retenção hidráulica (TRH) do substrato de 15 a 30 dias. Na digestão termofílica o digestor é aquecido até 55° C para TRH de 12 a 14 dias. O processo termofílico permite maior rendimento e produção de metano, melhor desinfecção de patógenos que o processo mesofílico. Entretanto é mais caro requerendo mais tecnologia, energia e grau de controle e monitoração (LI, *et al.*, 2015).

Várias pesquisas estão sendo realizadas visando melhorar o desempenho da digestão anaeróbia. Uma das tecnologias mais exitosas é a da codigestão (WU, 2007).

### **3.3.2. CODIGESTÃO ANAERÓBIA**

Um dos possíveis processos de conversão dos resíduos orgânicos em energia é a biodigestão anaeróbia que consiste na transformação da biomassa em biometano pela ação de microorganismos. Mas devido a baixa relação carbono/nitrogênio (C/N) dos dejetos animais, a codigestão com resíduos vegetais consiste em uma solução para melhorar o processo (WANG, *et al.*, 2012a). Nos últimos tempos a codigestão de dejetos animais e resíduos de cultivos vegetais tem ganhado impulso em vários países (KAPARAJU e RINTALA, 2005; WU *et al.*, 2010; RIAÑO *et al.*, 2011;)

A codigestão anaeróbia é definida como a digestão simultânea de dois ou mais substratos orgânicos com o objetivo de maximizar a produção de biometano. O termo codigestão é utilizado independentemente da razão de resíduos utilizados. Experimentos realizados utilizando-se a mistura de diferentes substratos demonstraram o aumento na produção de biometano em comparação com a digestão anaeróbia de apenas um substrato. (WANG *et al.*, 2012a).

Outras vantagens da codigestão são: (i) manutenção do pH ótimo para as bactérias metanogênicas; (ii) diminuição da amônia livre que é um inibidor da produção de biometano; (XIE *et al.*, 2011); (iii) diminuição da demanda bioquímica de oxigênio (DBO); (ORRICO JÚNIOR *et al.*, 2010); (iv) equilíbrio de nutrientes, devido a variedade de substratos, contribuindo para a estabilidade da digestão e resultando num digestato com maior potencial fertilizante (JINGURA e MATENGAIFA, 2009). (v) redução de custos e o uso eficiente de equipamentos uma vez que centraliza o processamento de vários resíduos em um mesmo local (MONDRAGÓN, *et al.*, 2006; ÁLVAREZ *et al.*, 2010; LANSING, *et al.*, 2010). (vi) manejo da mistura de resíduos, o uso de instalações comuns para o tratamento de diferentes resíduos e os efeitos da economia de escala (MARTÍNEZ-GARCÍA *et al.*, 2007).

A seleção dos substratos para a codigestão é definida pela disponibilidade e acesso ao mesmo, sendo os custos de colheita e transporte dos substratos determinantes para a viabilidade econômica dos projetos (LI *et al.*, 2011).

O processamento de resíduos agropecuários por meio da codigestão anaeróbica e a consequente produção de biometano têm importante contribuição para as questões de sustentabilidade ambiental, especialmente relacionada com o aquecimento global, acidificação e eutrofização (DRESSLER *et al.*, 2012; MEYER AURICH, *et al.*, 2012).

A codigestão ocorre geralmente por via úmida em reatores tanque-agitado. O substrato é diluído com teor de sólidos secos de 8 a 15% (BRAUN e WELLINGER, 2003).

A codigestão oferece vantagens econômicas, ambientais e tecnológicas, dentre as quais se destacam:

(i) Melhor balanço de nutrientes

Com a diversidade de substratos utilizados na codigestão existe uma maior proporção de nutrientes ricos em carbono. Isso contribui para a estabilidade da digestão e para a qualidade do biofertilizante (JINGURA e MATENGAIFA, 2009).

(ii) Melhoria da viscosidade da mistura de resíduos

A codigestão contribui para homogeneizar a mistura dos resíduos, facilitando a dinâmica desses fluidos. Isso permite que o processo de digestão seja mantido a uma taxa constante (MOESTEDT *et al.*, 2015; BRAUN e WELLINGER, 2003).

### (iii) Retorno financeiro

O aumento da produção de biometano e a possibilidade de aproveitamento do biofertilizante podem compensar os investimentos em infra-estrutura e equipamentos. Isso permite uma economia de escala o que contribui para a viabilidade do empreendimento (MARTÍNEZ-GARCÍA *et al.*, 2007).

## **PRÉ-TRATAMENTO DOS SUBSTRATOS**

As impurezas indesejadas tais como plásticos, pedras e metais devem ser retiradas dos substratos antes de ingressarem nos digestores visando evitar entupimentos na tubulação, formação de espuma ou danos no sistema de bombeamento e agitação. O pré-tratamento dos resíduos pode aumentar consideravelmente os custos operacionais do processo.

As duas principais técnicas de digestão anaeróbia aplicadas para substratos orgânicos sólidos são:

(i) Digestão anaeróbia por via seca: a concentração de sólidos totais (ST) é maior que 20% e requer menos pré-tratamento dos substratos.

(ii) Digestão anaeróbia por via úmida: os substratos são diluídos sendo o percentual de sólidos totais (ST) menor que 10%. São requeridos mais esforços para remover os contaminantes.

O pré-tratamento dos substratos se divide em três processos básicos: (a) redução de tamanho do substrato; (b) remoção dos componentes indigeríveis; e (c) higienização.

Um pré-tratamento para substratos submetidos à digestão anaeróbia por via úmida normalmente requerem cortar, peneirar, remover metais, vidro, areia e pedras e homogeneizar a mistura (BRAUN e WELLINGER, 2003).

## **HIGIENIZAÇÃO**

É um processo de pré-tratamento dos substratos que se faz necessário devido aos materiais com grande potencial infeccioso. Esse procedimento é geralmente regulamentado por lei. Existem três graus para o controle de patógenos:

(i) Esterilização: que consiste em submeter os substratos a uma pressão de 2 bares e uma temperatura de 121 °C durante 20 minutos.

(ii) Pausterização: que consiste em submeter os substratos a temperaturas entre 70° e 90 °C durante 15 a 60 minutos.

(iii) Saneamento: que consiste em submeter os substratos a temperaturas mais baixas durante um período de tempo prolongado.

A digestão anaeróbia com o modo de operação termofílica é considerada suficiente para o tratamento de higienização dos substratos (BRAUN e WELLINGER, 2003).

## **EQUIPAMENTOS TÉCNICOS ADICIONAIS PARA A CODIGESTÃO**

Para uma maior confiabilidade do processo de digestão anaeróbia são necessários equipamentos adicionais. Esses equipamentos são necessários para: (i) recepção dos resíduos na usina de geração; (ii) homogeneização e mistura dos substratos; (iii) prevenção da formação de espuma e camada dentro dos digestores; e (iv) remoção de sedimentos dentro do digestor (KARELLAS, *et al.*, 2010).

Geralmente os resíduos são entregues em contêiner ou em caminhões. Com vistas a se evitar a emissão de odores a descarga do material deve ser realizada em local fechado. Os caminhões devem ser limpos e higienizados para se evitar a transferência de agentes patogênicos. A próxima etapa é a homogeneização dos substratos, essa fase pode ser combinada com o processo de pausterização.

O pré-tratamento de alguns substratos se tornam inviáveis em unidades de geração de biometano de pequeno porte.

## **ANÁLISE, ACOMPANHAMENTO E DOCUMENTAÇÃO**

O controle de resíduos que entram na usina de geração de biometano é realizado registrando-se:

- (i) Tipo, composição e quantidade de resíduos;
- (ii) Materiais contaminantes;
- (iii) Origem dos resíduos;
- (iv) Resultados do controle da entrada de resíduos; e
- (v) Quantidade de digestato que sai da usina.

Estas informações sobre a operação da usina devem ser coletadas diariamente pelo operador.

## **CONTROLE DE PROCESSO**

Os principais parâmetros de controle para a usina de geração de biometano com a codigestão são o fluxo diário total de substrato ( $\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$ ,  $\text{t dia}^{-1}$ ) e a quantidade de biometano produzida diariamente ( $\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$ ). É importante determinar a concentração de  $\text{CH}_4$  do biometano produzido. Com vistas a determinar a eficiência do processo de digestão anaeróbia deve ser realizado o cálculo periódico do rendimento de biometano da usina. A análise das concentrações de ácidos graxos voláteis e de amônia também é recomendada. Deve-se estar atento a influências dos substratos no comportamento do digestor, especificamente a formação de sedimentos no fundo dos mesmos. Faz-se necessário registrar as condições (tempo e temperatura) em que ocorreram os pré-tratamentos realizados com os substratos (BRAUN e WELLINGER, 2003).

## UTILIZAÇÃO DO DIGESTATO

O digestato (efluente do reator anaeróbico) contém material que não foi digerido pelos microorganismos, partículas residuais, líquido composto por material orgânico e inorgânico. Esse digestato pode ser utilizado como biofertilizante em áreas de cultivo agrícola. O biofertilizante é um produto com grande valor econômico e agrônômico oriundo da codigestão anaeróbia. Entretanto só encontra valor de mercado se estiver livre de contaminantes.

A Figura 3.2 mostra o esquema de uma usina de codigestão para produção de biogás/biometano e as etapas de geração de calor e eletricidade.

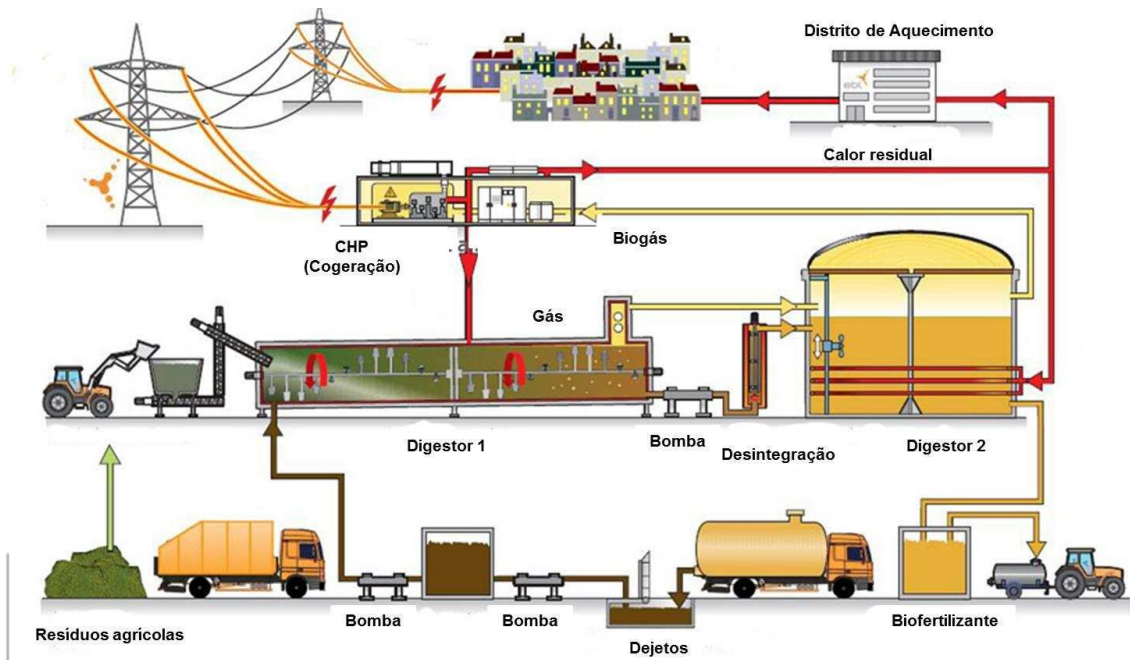


Figura 3.2 – Usina de codigestão.

Fonte: (FABbiogas, 2015)

## CODIGESTÃO ANAERÓBIA DEJETOS ANIMAIS E RESÍDUOS VEGETAIS - ESTUDOS DE CASO

Kaparaju e Rintala (2005) realizaram testes de laboratório da codigestão de dejetos suínos com tubérculos de batata e seus sub-produtos industriais (vinhaça e cascas de batata). Os procedimentos para codigestão foram realizados utilizando reator de tanque agitado contínuo a uma taxa de carga de  $2 \text{ kg de SV m}^{-3} \text{ dia}^{-1}$  a uma temperatura de  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . A operação do digestor foi bem sucedida para

percentuais entre 15 e 20% de resíduos de batata no substrato da codigestão. O desempenho do processo e a produção de metano são semelhantes utilizando-se os tubérculos e os resíduos da batata. Foi constatado que durante o armazenamento pós-digestão, o digestato podia produzir uma quantidade apreciável de metano. Segundo os autores a codigestão da batata e os resíduos de seu processamento industrial com os dejetos de suínos podem oferecer benefícios para os granjeiros e a agroindústria, não somente com a geração de energia renovável, mas também com o tratamento dos resíduos.

Lehtomâki *et al.* (2007) estudaram a codigestão de silagem de capim, folhas de beterraba e palha de aveia com dejetos de bovinos em reatores de tanque agitado contínuo, em escala laboratorial. De acordo com esse trabalho existe viabilidade na codigestão com até 40% de sólidos voláteis (SV) de resíduos vegetais no substrato. Para um percentual de 30% de SV na mistura da codigestão, obteve-se produções específicas de metano iguais a 268, 229 e 213 L CH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup> de SV adicionados na codigestão de dejetos bovinos com silagem de capim, folhas de beterraba e palha de aveia, respectivamente. Em comparação com os reatores alimentados apenas com dejetos de vacas com a mesma taxa de carregamento, a produção de metano nos reatores em que foi realizada a codigestão com 30% de SV de folhas de beterraba, silagem de capim e palha de aveia aumentou 65, 58 e 16%, respectivamente. Ao dobrar a carga orgânica nos digestores de 2 para 4 kg de SV m<sup>-3</sup> dia<sup>-1</sup>, os autores comprovaram uma redução na produção específica de metano por SV adicionado de até 26%.

Gelegenis *et al.* (2007) realizaram testes em laboratório com reatores de tanque agitado contínuo em condições de operação mesofílicas alimentados com misturas de dejetos de frango diluído e soro de leite. A codigestão com até 50% de soro de leite no substrato mostrou-se possível sem a necessidade de adição de quaisquer produtos químicos. Verificou-se que a produção específica de biogás (L kg SV<sup>-1</sup>) permaneceu praticamente inalterada com a adição de mais soro de leite nos reatores. De acordo com os autores isso deveu ao fato da demanda química de oxigênio (DQO) do soro de leite ser menor que dos dejetos de frango. Para frações de soro de leite acima de 50% ocorreu uma diminuição considerável do pH e da produção de biogás. Foi realizado um experimento piloto com um reator de tanque

agitado contínuo, previamente aclimatado, contendo apenas dejetos de frango cuja produção volumétrica de biogás foi de 1,5 litros por litros de resíduos dia. A seguir o soro de leite foi adicionado, substituindo uma quantidade equivalente de dejetos de frangos, até a porcentagem máxima de 40%. Observou-se que a produção volumétrica de biogás aumentou para 2,2 litros por litro de resíduos dia. De acordo com os autores o aumento na produção de biogás foi devido à maior biodegradabilidade dos hidratos de carbono do soro de leite) em comparação com os lipídeos dos dejetos de frangos e o aumento da relação C/N.

Alvarez e Liden (2008) avaliaram experimentalmente o potencial da codigestão anaeróbia dos resíduos da quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) e das plantas aquáticas totora (*Schoenoplectus tatora*) e o-macrófitas do Lago Titicaca (Altiplano Boliviano) com dejetos de lhama, bovinos e ovinos. Os experimentos foram realizados com alimentação semi-contínua em 10 digestores de 2 litros a uma temperatura de 25 °C, tempo de retenção hidráulica (TRH) de 30 dias e carga orgânica igual a 1,8 kg SV m<sup>-3</sup> dia<sup>-1</sup>. De acordo com os autores a totora foi o melhor substrato. Em mistura com proporção 1:1 (base em sólidos voláteis), o aumento da produção de biogás foi de 130% para os dejetos de lhama, de 60% para os dejetos de bovinos e 40% para os dejetos de ovinos. A máxima porcentagem de totora no substrato da codigestão foi de 58%. Para concentrações mais elevadas o substrato não pôde ser digerido devido a problemas como a acidificação provocada por materiais lignocelulósicos. A quinoa e as o-macrófitas quando utilizadas como co-substratos não causaram quaisquer problemas operacionais no processo de digestão anaeróbia. No entanto estes co-substratos apresentaram aumento da produtividades de biogás um pouco menores que a totora.

Wu *et al.*, (2010) investigaram o aumento da produtividade de biogás a partir da codigestão de dejetos de suínos com três resíduos de cultivos agrícolas a saber: (i) resíduos de milho; (ii) palha de aveia; e (iii) palha de trigo. Foram testadas a codigestão de dejetos de suínos e resíduos de cultivos vegetais para razões C/N iguais a: 16/1, 20/1 e 25/1. Foi realizado um controle em duplicado com 3 resíduos vegetais x 3 razões C/N para comparar o volume de biogás produzido, o teor de metano no biogás e o volume líquido de metano e realizar a análise estatística. Antes de serem adicionados aos digestores, os resíduos vegetais foram

primeiramente cortados em partes bem pequenas e a seguir moídos em partículas finas de tamanho menor que 40 mesh (0,422 mm). Os digestores utilizados no experimento foram operados simultaneamente a uma temperatura controlada de  $37 \pm 0,1$  °C em um tempo de retenção hidráulica de 25 dias. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que todos os resíduos dos cultivos vegetais aumentaram significativamente a produção de biogás e o volume líquido de metano para todas as razões C/N estudadas. Os resíduos de milho apresentaram um aumento da produção diária de biogás 11,4 vezes maior que a amostra de controle volume de biogás, seguido pela palha de aveia com 8,5 vezes e a palha de trigo com 6,12 vezes. Esses resultados foram obtidos para a razão C/N igual 20/1 que foi considerada a razão ótima para a codigestão. O teor de metano no biogás obtido com os resíduos de milho foi de 68%, cerca de 11% maior que a palha de aveia. O biogás produzido com palha de trigo e com a amostra controle teve teor de 47% de metano.

Kafle *et al.* (2012) investigaram a viabilidade da codigestão anaeróbia de resíduos de Kimchi (RK) com dejetos de suínos (DS). O Kimchi é considerado a base da alimentação dos coreanos sendo os seus principais ingredientes a acelga (couve chinesa) e o farelo de arroz. Os resíduos de Kimchi utilizados no experimento estavam formados por 70% de resíduos de acelga e 30% de resíduos de farelo de arroz em base seca. No Experimento 1 os autores mediram o potencial de biogás dos resíduos de Kimchi (acelga e farelo de arroz) e no Experimento 2, o teste foi realizado com diferentes proporções de sólidos volatéis (SV) para os resíduos de Kimchi e dejetos de suínos (RK:DS = 0:100; 33:67; 67:33; 100:0). Os rendimentos de biogás e de metano com os resíduos de Kimchi foram maiores que os rendimentos em relação aos resíduos de acelga em 27% e 59%, respectivamente. O rendimento específico de biogás aumentou 19%, 40% e 57% para as misturas de resíduos de Kimchi iguais a 33%, 67% e 100%, respectivamente, quando comparados com a digestão de apenas dejetos de suínos (DS = 100%). O mesmo ocorreu com a remoção de SV que aumentou 37%, 51% e 74% para as proporções de resíduos de Kimchi de 33%, 67% e 100%, respectivamente, em relação a digestão de 100% de dejetos de suínos. Os resultados encontrados pelos autores sugeriram o potencial dos resíduos de Kimchi como substrato da codigestão anaeróbia com dejetos de suínos visando aumentar a produção de biogás.

Bulkowska *et al.* (2012) avaliaram a codigestão de silagem de milho e miscanto (gramínea) com dejetos de suínos nas proporções de 0%, 7,5%, 12,5% e 25%. Os ensaios foram realizados em reatores de tanque agitado com tempo de retenção hidráulica de 45 dias e taxa de carga orgânica de  $2,1 \text{ g L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ . A estabilidade do processo foi estimada por meio da matriz de correlações entre a produção de biogás e metano e parâmetros da digestão anaeróbia. Os coeficientes de correlação indicaram que a codigestão foi mais estável para proporções de 7,5% e 12,5% de dejetos de suínos. Para proporção de dejetos de suínos igual a 25% observou-se instabilidade do processo. Os autores observaram que quando comparada a digestão apenas da silagem de milho e miscanto, os dejetos de suínos favoreceram a produção de biogás e metano sendo as maiores taxas de produção obtidas para a proporção de 12,5% de dejetos suínos.

Wang *et al.* (2012b) investigaram as possibilidades de melhorar a produção de metano a partir da digestão anaeróbia utilizando mistura de dejetos bovinos, dejetos de frangos e palha de trigo. O estudo foi realizado teve por base a otimização da carga orgânica de alimentação dos digestores e a razão C/N. O potencial de produção de metano com a codigestão dos dejetos de bovinos e frangos e da palha de trigo foi maior do que a digestão desses substratos individualmente. A codigestão dos três substratos apresentou uma maior sinergia do que as misturas de dejetos de bovinos com palha de trigo e dejetos de frangos com palha de trigo. Com o aumento da razão C/N ocorreu inicialmente um aumento no potencial de produção de metano e depois uma diminuição. As razões C/N de 25:1 e 30:1 tiveram melhor desempenho na digestão anaeróbia com pH estável e baixas concentrações de nitrogênio total e amônia livre. O maior potencial de produção de metano foi obtido para a proporção 40,3:59,7 para dejetos de bovinos e dejetos de frangos e uma razão C/N de 27,2:1. De acordo com os autores os resultados demonstraram que a codigestão em reatores anaeróbios pode ter melhor desempenho por meio da otimização da carga orgânica de alimentação e da razão C/N.

Molinuevo-Salces *et al.* (2012) investigaram a codigestão anaeróbia de resíduos de uma fábrica de processamento de vegetais com dejetos de suínos. Analisou-se os os efeitos da adição dos resíduos vegetais (ervilha, milho, cenoura e

alho-poró) na produção de metano. Os testes foram realizados em laboratório utilizando reatores de tanque agitado semi-contínuo a temperatura de operação e 37 °C. As cargas orgânicas administradas nos reatores foram de 0,4 e 0,6 g SV L<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> para tempo de retenção hidráulica (TRH) de 25 e 15 dias, respectivamente. A adição dos resíduos vegetais resultou no aumento do rendimento de metano em 3 e 1,4 vezes para TRHs de 25 e 15 dias, respectivamente. Os autores observaram por meio de microscopia eletrônica de varredura que a lignina e a celulose não foram completamente degradadas. Essa técnica permitiu ainda a obtenção de informações sobre mudanças espaciais na população de morfotipos bacterianos.

Kafle e Kim (2013) avaliaram o desempenho de digestores anaeróbios utilizando uma mistura de resíduos de maçã e dejetos de suínos. Foi realizado um teste (experimento 1) com digestor a batelada para avaliar o potencial e a taxa de produção de biogás dos resíduos de maçã e dejetos de suínos separadamente. Outro teste (experimento 2) também realizado com digestor a batelada foi realizado para avaliar a codigestão de resíduos de maçã com dejetos de suínos, em condições meso e termofílicas, na proporção 33% e 67% de sólidos voláteis (SV), respectivamente. O teste com o digestor com alimentação contínua foi realizado em único estágio em reator de tanque agitado com diferentes proporções de resíduos de maçã e dejetos de suínos em condições mesofílicas. Os autores encontraram para os ensaios com os digestores a batelada produções finais de biogás e metano em termos de demanda química de oxigênio (DQO) iguais a 510 e 252 ml/g DQO adicionado, respectivamente. A mistura dos resíduos de maçã com os dejetos de suínos melhorou o rendimento da produção de biogás em, aproximadamente, 16% para temperaturas mesofílicas e 48% para temperaturas termofílicas em comparação com a digestão de somente dejetos de suínos. Não sendo observada diferença significativa na produção de metano. Para o ensaio realizado com o reator de tanque agitado contínuo, o rendimento de metano aumentou de 146 para 190 ml/g DQO adicionado com o aumento do percentual de SV de resíduos de maçã de 25% para 33%, para taxa constante de carga orgânica de 1,6 g de SV L<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> e tempo de retenção hidráulica de 30 dias. Quando a porcentagem dos resíduos de maçã foi aumentada de 33% para 50% observou-se o aumento dos ácidos graxos voláteis e a diminuição do pH, do teor de metano e da produção de biogás.

Risberg *et al.* (2013) estudaram a codigestão de palha de trigo e dejetos de bovinos. Em seus testes os autores utilizaram a palha de trigo não tratada e a submetida à técnica denominada explosão à vapor que resulta num material pastoso que é mais facilmente digerido por microorganismos. A produção de biogás com a codigestão da palha de trigo foi comparada com a digestão anaeróbia dos dejetos de bovinos como único substrato. Em todos os testes realizados em laboratório foram utilizados reatores de tanque agitado de 5 litros operando com carga orgânica aproximada de 2,8 g SV/L/dia, independente da mistura de substrato. O tempo de retenção hidráulica foi de 25 dias com temperaturas de operação de 37, 44 ou 52 °C. A codigestão da palha de trigo submetida à técnica de fibra explodida a vapor com dejetos de bovinos foi avaliada para duas diferentes misturas e proporções. Os resultados obtidos mostraram um desempenho estável tanto para temperaturas mesofílicas e termofílicas. Os rendimentos da produção de metano foram baixos variando entre 0,13 a 0,21 NL CH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup> para os dejetos de bovinos e para a codigestão destes com palha de trigo. O tratamento da palha de trigo com a técnica de explosão a vapor não aumentou o rendimento de biogás, havendo apenas pequenas variações nas diferentes temperaturas de operação.

Sharma *et al.* (2013) utilizaram reatores de tanque agitado termofílico para testar o desempenho da codigestão de cama de frango com vinhaça fina do milho utilizado na produção de etanol. O experimento foi conduzido com o aumento das razões vinhaça fina/cama de frango. Observou-se, para razões de 20% e 40% de vinhaça fina no substrato de codigestão, aumentos na produção de biogás, no teor de metano e na remoção da demanda química de oxigênio (DQO) e diminuição de ácidos graxos voláteis. O melhor desempenho foi observado para a razão de 60% de vinhaça fina. Para a proporção de 80% de vinhaça fina se observou uma queda significativa do desempenho com queda da atividade metanogênica e remoção da DQO. Os autores concluíram que a digestão termofílica da cama de frango com vinhaça fina de milho utilizado para a produção de etanol melhorou a produção de metano. No entanto em altas concentrações a vinhaça fina teve efeito inibidor.

Os estudos realizados para vários tipos de dejetos de animais e resíduos vegetais mostraram que a codigestão anaeróbia melhora o desempenho metanogênico. A disponibilidade dos resíduos em uma dada região e a porcentagem

de mistura dos mesmos para maximizar a produção de biogás/biometano demandam a realização de novas pesquisas sobre o tema.

### **3.3.3. ESTADO DA ARTE DO BIOGÁS EM PAÍSES DA UNIÃO EUROPEIA**

De acordo com o Relatório do Observatório de Energias Renováveis, em 2013, a energia primária gerada a partir do biogás na Europa foi superior a 13,5 Mtep, sendo a Alemanha é responsável por mais de 50% da produção seguida por Reino Unido e Itália com 13,5% e 13,4%, respectivamente. As centrais industriais de geração de biogás responderam por 69,8% da produção, os aterros sanitários por 20,7% e as depuradoras de águas residuais (urbanas e industriais) por 9,5%. A origem do biogás varia de acordo com o país. Dessa forma, Alemanha lidera a produção de biogás a partir de resíduos agropecuários e de águas residuárias. Também optaram por desenvolver usinas para tratamento dos resíduos agroindustriais e cultivos energéticos países como Itália, Áustria e República Tcheca. No Reino Unido, Espanha, Portugal e Irlanda a produção de biogás é baseada em aterros sanitários. No caso de Suécia e Polônia a maior produção de biogás é procedente de depuradoras de águas residuárias (EurObserv'ER, 2014).

De acordo com a Associação Europeia de Biogás (EBA), a Europa contava no final de 2013 com mais de 14.500 usinas de biogás. Desse total 9.035 usinas estavam localizadas na Alemanha. A Figura 3.3 apresenta a distribuição das usinas de biogás por país.

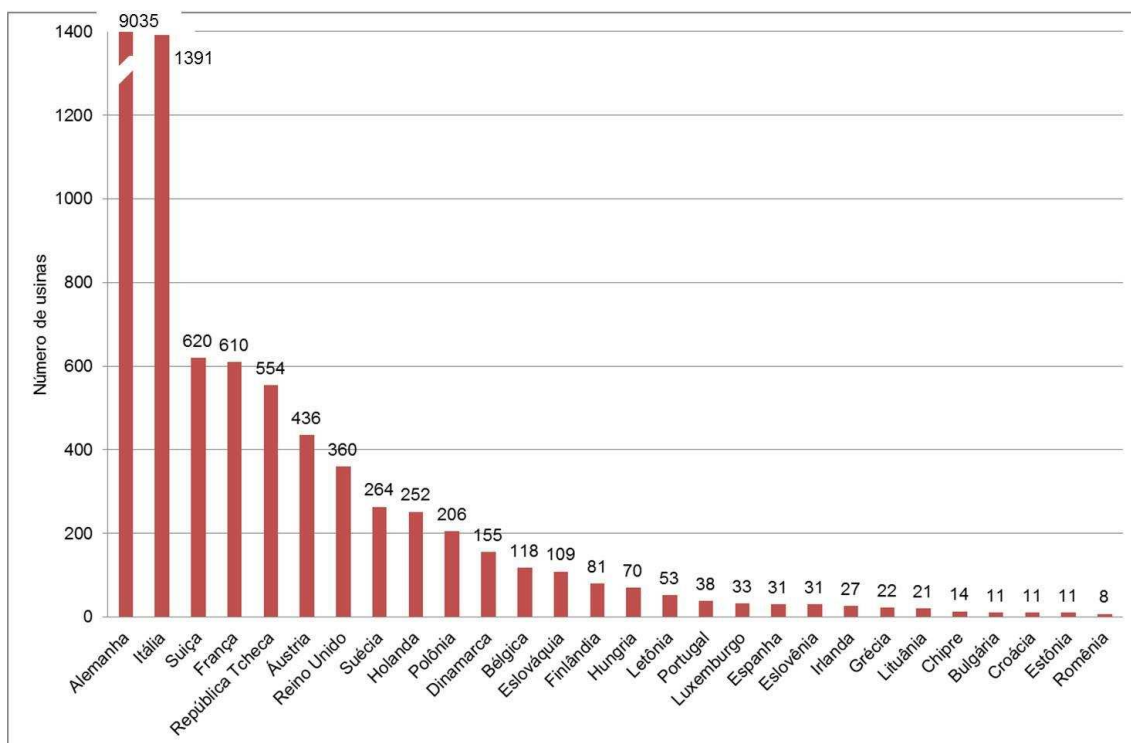


Figura 3.3 – Usinas de biogás instaladas em países da União Européia.

FONTE: Adaptado de (EBA, 2013)

O principal uso final da energia do biogás foi a geração de eletricidade. Foram produzidos 52.729,6 GWh no ano de 2013. As usinas de cogeração (eletricidade e calor) responderam por 61,0% do total de energia elétrica produzida. Os maiores produtores europeus de eletricidade a partir do biogás foram Alemanha, Itália, Reino Unido, República Tcheca e França. Foram produzidos 469,3 ktep de calor a partir do biogás.

### 3.3.4. Biometano

O biometano é o metano (CH<sub>4</sub>) produzido a partir da biomassa com propriedades próximas as do gás natural. Pode ser obtido por meio de dois processos: (i) a partir da conversão térmica (gaseificação ou metanação) resultando em um gás rico em metano conhecido como syngás ou bio-SNG; e (ii) a partir da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos cujo produto inicial é o biogás que deve ser purificado para atingir elevado teor de CH<sub>4</sub> para se tornar biometano. Para a injeção do syngás e do biometano em gasodutos é necessário o atendimento de especificações técnicas e a garantir a composição química idêntica à do gás natural.

O biometano pode ser utilizado para substituir combustíveis líquidos no setor de transportes, a produção de eletricidade e calor por meio de ciclos CHP e como matéria-prima para o setor químico (fabricação de tintas, plásticos, detergentes, etc.). O biometano e o gás natural são totalmente intercambiáveis, possuindo os mesmos usos finais. Portanto pode ocorrer a mistura desses dois combustíveis em diferentes proporções, aos moldes da mistura de etanol/gasolina e biodiesel/diesel. As unidades de medida do biometano são as mesmas do gás natural e são dadas em Nm<sup>3</sup> ou kWh (1 Nm<sup>3</sup> de biometano contém normalmente 10 kWh de energia primária o que equivale a 36 MJ). Para o transporte e armazenamento do biometano em instalações e infra-estruturas disponíveis para gás natural como os gasodutos é necessário um certo grau de pressurização (THRÄN *et al.*, 2014).

O uso final do biometano depende do país onde é produzido e das condições do mercado de energia. Por exemplo, se a produção direta de energia elétrica e calor a partir do biogás é viável, então ele não será convertido em biometano. Devido ao fato do biometano proporcionar mais possibilidades de uso final de sua energia e o desperdício do calor residual na geração de energia elétrica com biogás, muitos países tem adotado políticas de subsídio para o biometano e sua injeção nas redes de gás natural.

Outra aplicação do biometano é como combustível para veículos automotores. A primeira vez que se utilizou esse combustível em caminhões foi durante e depois da Segunda Guerra Mundial em algumas cidades da Europa. No início da década de 1990, o biometano voltou a ser utilizado na Suíça e Suécia, sendo que no final de 2013 já estava disponível como combustível automotivo em 13 países da União Europeia. A redução de impostos sobre veículos não poluentes e os sistemas de quotas de combustíveis renováveis são medidas importantes para aumentar o uso do biometano. Na Suécia devido ao fato da tarifa de energia verde ser significativamente menor que a tarifa convencional, o consumo desse combustível renovável tem crescido bastante chegando a ser maior que o de gás natural (THRÄN *et al.*, 2014).

### 3.3.5. POLÍTICAS PÚBLICAS DE INCENTIVO À PRODUÇÃO DO BIOGÁS/BIOMETANO EM PAÍSES DA UNIÃO EUROPEIA E NO BRASIL

#### UNIÃO EUROPEIA

A seguir são apresentados uma visão geral dos programas de incentivo à produção de biometano implementados em países da União Europeia.

##### (i) Isenção de Impostos

O biometano pode ser isento de impostos ou estar sujeito a uma taxa de imposto menor em comparação com os combustíveis fósseis, como o gás natural. Esta é a forma mais comum de incentivo praticada em países como a Áustria, Alemanha, Suécia, Suíça e Eslováquia.

##### (ii) *Feed-in tariff* para a eletricidade

Em países como a Alemanha, Itália, Dinamarca, Eslováquia e Reino Unido é concedido um bônus para a conversão do biogás em biometano e uma *feed-in tariff* para a geração de eletricidade e a cogeração.

##### (iii) *Feed-in tariff* para o biometano

Esse incentivo se refere à injeção do biometano na rede de gás natural ou à entrega direta em postos de combustível. É praticado na França, Dinamarca, Reino Unido e Holanda em que o subsídio da *feed-in* cobre a diferença entre os custos de produção e a receita obtida com a comercialização do biometano (BIOGASPARTNER, 2014).

##### (iv) *Feed-in tariff* para calor

A tarifa paga pelo calor gerado a partir do biometano é maior que a do gás natural. É praticado no Reino Unido e na Dinamarca.

##### (v) Incentivo ao investimento

Os empréstimos fornecidos para os empreendimentos de geração de biogás ou biometano possuem taxa de juros reduzida ou quota fixa do custo de investimento. Essa política é aplicada na Áustria, Suécia, Dinamarca, Hungria, Eslováquia e Polônia.

(vi) Custos evitados em transporte de gás natural

O biometano injetado diretamente na rede de gás implica em custos mais baixos do que o consumo de gás natural, que normalmente tem que ser transportado por gasodutos de grande extensão até o usuário final implicando em gastos como por exemplo em sistemas de pressão. Esta economia de custo gera um incentivo direto para o biometano que é praticado na Alemanha com € 0,70/kWh para os primeiros 10 anos de operação do empreendimento.

(vii) Quota de biocombustíveis

Os países podem estabelecer metas fixas ou quotas de biocombustíveis utilizados em veículos automotivos. Essas metas podem incentivar a produção de biometano tornando possível a mistura com gás natural. Os países que aplicam esse incentivo são Alemanha, Holanda e Reino Unido.

(viii) Quota de energias renováveis (Comércio de Certificados de Origem)

Pode ser fixada uma quota obrigatória de eletricidade produzida a partir de fontes renováveis a ser adquirida pelas concessionárias de energia. Tais quotas poderão ser atendidas pelas próprias usinas de energia renovável ou pela compra de certificados. Esse sistema foi implementado na Polônia, Suécia, Noruega e Reino Unido.

Visando incentivar a implantação do mercado de biometano, e por consequência a substituição do gás natural por uma fonte sustentável, foram criadas metas voluntárias de inserção desse combustível em alguns países. A seguir são descritas alguns desses compromissos e metas voluntárias:

França: O biometano é visto como uma fonte nova e atrativa de energia renovável, sendo incentivado por meio de *feed-in tariff*. Já existem no Plano Nacional de Ação

em Energia Renovável (NREAP) metas para a produção de biogás. Existe um grupo de trabalho para estudar e definir as metas para o biometano (GGG, 2013).

Alemanha: Definiu as seguintes metas de produção e injeção de biometano na rede de gás: (i) 6 bilhões de m<sup>3</sup> para o ano de 2020; (ii) 10 bilhões de m<sup>3</sup> para o ano de 2030 em 6 bilhões de m<sup>3</sup> (GasNZV 2012).

Hungria: Possui metas estabelecidas para a produção de biometano para os anos de 2016 a 2020. No entanto, em comparação a outras medidas estas metas são bastante baixas(GGG, 2013).

Luxemburgo: Aprovou no final de 2011 uma legislação garantindo remuneração para a produção de 10 milhões de m<sup>3</sup> de biometano por ano. Isso permite o suporte a 3 ou 4 usinas de geração com capacidade de 350 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>(LUXEMBOURG, 2011; KOOP AND MORRIS, 2012).

Holanda: Atualmente a injeção de biometano na rede de gás natural do país é de 1 TWh ano<sup>-1</sup>. Existe a previsão de que com os incentivos da feed-in essa injeção aumente para 6,7 TWh no ano de 2020 (KOPPEJAN *et al.* 2009).

Dinamarca: Um dos objetivos do acordo energético dinamarquês de 2012 foi a implantação da produção de biogás em outras áreas além da cogeração para facilitar a conversão em biometano e sua posterior injeção e distribuição na rede de gás natural do país. O acordo define ainda subvenção para a conversão de biogás em biometano, uso final em sistemas de cogeração, transporte e fins industriais. A produção atual de biogás na Dinamarca é 10% do potencial estimado. Não existem metas definidas sobre produção de biometano e a quantidade a ser injetada na rede. Se não houver crescimento no mercado, uma tendência que vem sendo discutida no país é estabelecer a obrigatoriedade de compra de energia do biometano por parte das concessionárias de energia elétrica (ENERGINET.DK, 2014).

Eslováquia: Existem metas para o biometano, mas os incentivos financeiros não são suficientes para que se efetive a curto prazo a implantação de empreendimentos (GGG, 2013).

Reino Unido: A previsão da demanda total de gás natural para o ano de 2030 é de 600 TWh ano<sup>-1</sup>. As metas de produção de biometano são as seguintes: (i) 1,5 TWh em 2015; (ii) 7 TWh em 2020; e (iii) 15 TWh em 2030. No ano de 2015, o uso de biometano para aquecimento receberá incentivos no Reino Unido (GGG, 2013).

A discussão de metas voluntárias para o aproveitamento energético do biogás/biometano está sendo realizada em outros países da União Europeia. Áustria: Estão sendo discutidas, no bojo da chamada Estratégia Energética, duas opções para o uso do biogás: (i) adição de 20% de biometano ao gás natural para alcançar 200 mil carros até 2020; e (ii) aumentar a produção de biogás para o atendimento de 10% da demanda de gás natural do país (8 TWh ano<sup>-1</sup>).

Bélgica: O potencial teórico de biometano foi calculado em cerca de 330 milhões de m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>, o que equivale a aproximadamente 2% do consumo não industrial de gás natural do país. Em 2013, entrou em vigor o sistema prevendo a redução de impostos para adição de etanol e biodiesel na gasolina e diesel, respectivamente. No entanto, o biometano ainda não está incluído na política de biocombustíveis para o setor de transportes.

Suécia: O objetivo do governo sueco é que 100% do setor de transporte seja abastecido por biocombustíveis até 2030. O potencial de produção de biometano por meio da conversão térmica e da digestão anaeróbia até 2030 é estimado entre 10 a 20 TWh ano<sup>-1</sup> de biometano (DAHLGREN *et al.* 2013).

As políticas de incentivo à produção de biometano diferem nos países da União Europeia. No entanto é possível identificar um crescimento significativo dos mercados para período 2010-2030.

Observa-se que sem as políticas públicas de incentivo a geração de energia a partir do biogás/biometano não teria se desenvolvido na União Europeia. Além do marco regulatório é necessário que se estabeleça metas claras e objetivas de produção, incentivos fiscais e a formação de profissionais para operação e manutenção dos empreendimentos do setor.

## BRASIL

O Brasil possui uma matriz energética com grande participação de fontes renováveis devido à grande parcela da hidreletricidade na sua matriz energética (POTTMAIER, *et al.*, 2013). A hidreletricidade no Brasil corresponde a cerca de 13,8% de toda a oferta de energia primária. O potencial hidrelétrico brasileiro representa cerca de duas vezes a potência instalada no país, sendo atualmente explorado 35% deste potencial hidrelétrico. (BRASIL, 2014). A geração de eletricidade por meio de grandes usinas hidrelétricas (UHE), devido aos impactos ambientais advindos de sua implantação e ao fato de 63% do potencial hidrelétrico estar localizado no norte do país principalmente na bacia amazônica, vem sendo duramente criticada, o que pode reduzir a exploração deste potencial. Surge então a necessidade de exploração de novas formas de geração de energia elétrica de fontes renováveis (SOITO e FREITAS, 2011; BRASIL, 2014).

O uso de outras fontes renováveis no país ficou restrito por algum tempo a pesquisa, desenvolvimento e demonstração de projetos piloto para eletrificação de regiões rurais e comunidades isoladas onde a expansão da rede elétrica se tornava inviável (COSTA, *et al.*, 2008). Atualmente existe o aproveitamento da biomassa residual nos setores sucro-alcooleiro e de papel e celulose que respondem por parcela significativa da matriz energética brasileira. Entretanto algumas tecnologias renováveis, como o aproveitamento energético do biogás/biometano, e sua produção ainda não são atraentes do ponto de vista estritamente econômico. No entanto se na forma tradicional de avaliação dos custos de energia forem considerados os custos ambientais das fontes convencionais e as vantagens de fontes renováveis para o meio ambiente, certamente essa situação seria modificada (CAVALIERO e SILVA, 2005).

No Brasil, a Política Nacional de Mudanças Climáticas, estabelecida em 2009, fixou a meta de reduzir as emissões de gases de efeito estufa entre 36,1% e 38,9% até 2020. Foram desenvolvidos Planos de Ação Setoriais nas seguintes categorias: (i) mudança de uso do solo; (ii) agricultura; (iii) energia. Em relação a mitigação das emissões na agricultura foi criado pelo governo o Plano Agricultura de Baixo Carbono (ABC) que prevê apoio financeiro para a implantação, manutenção e

melhoramento de sistemas de tratamento de dejetos e resíduos oriundos de produção animal para geração de energia (IEA BIOENERGY, 2014).

O potencial brasileiro de produção de biogás é grande, no entanto a participação dessa fonte na matriz energética nacional é extremamente pequena. De acordo com o Balanço Energético Nacional do ano de 2013 a capacidade instalada de geração de energia elétrica a partir da biomassa foi de 11.337 MW. As usinas de biogás corresponderam a aproximadamente 80 MW deste total.

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) existem no Brasil 22 usinas de biogás, instaladas em propriedades rurais, agroindústrias e aterros sanitários, que fornecem eletricidade para a rede elétrica. O biogás produzido no país é utilizado para a geração de eletricidade e calor.

## **REGULAMENTAÇÃO DO BIOMETANO NO BRASIL**

Em 30 de janeiro de 2015 foi instituída pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) a Resolução Nº 8, que regulamenta o uso do biometano no Brasil. Dentre as disposições gerais desta resolução se destacam: (i) as regras de uso e de controle de qualidade do biometano; (ii) atendimento de especificações para a comercialização (compressão, distribuição e revenda iguais às válidas para o gás natural); e (iii) possibilidade da mistura do biometano com gás natural, desde que atendidas as especificações.

O biometano produzido a partir de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular e às instalações residenciais e comerciais, de origem nacional, pode ser entregue à rede de distribuição em todo o território nacional.

Muitos municípios localizados no interior do Brasil não são atendidos pela rede de gás natural. Existe a expectativa de que a Resolução Nº 8 da ANP contribua para a interiorização do uso desse combustível na sua versão renovável.

Em testes realizados com o biometano em um ônibus modelo Scania Citywide Euro 6 fabricado na Suécia, comprovou-se nas primeiras demonstrações ocorridas no Brasil, em parceria com a Itaipu Binacional, que o custo por quilômetro rodado com biometano é 56% menor que um veículo similar abastecido com diesel. Os testes que foram a seguir realizados no Rio Grande do Sul e coordenado por pesquisadores da UNIVATES comprovou-se que os níveis de poluição com o uso do biometano no transporte coletivo ficaram bem abaixo dos determinados pelos órgãos públicos ambientais (70% abaixo da emissão ônibus a diesel) e as emissões de ruído também foram menores que os padrões determinados em lei. A média de consumo foi de 2,13 km/metro cúbico, com autonomia de 400 quilômetros (UNIVATES, 2015).

## **PROJETOS DE LEI**

Dentre as propostas de incentivo à geração de energia a partir do biogás/biometano que se encontram em discussão no parlamento brasileiro se destaca o Projeto de Lei 6559/2013 que regulamenta as atividades relativas a geração, transporte, filtragem, estocagem e geração de energia elétrica, térmica e automotiva com biogás originado do tratamento sanitário de resíduos e efluentes orgânicos, em especial os gerados em atividades de produção agropecuária e agroindustrial (BRASIL, 2015).

O projeto de lei prevê a valorização do biogás por meio da isenção tributária das energias geradas a partir do mesmo, visando tornar os empreendimentos viáveis economicamente. Estabelece que as atividades de geração de biogás podem ser exercidas por produtores rurais, cooperativas agroindustriais, indústrias, empresa ou consórcio de empresas constituídos sob as leis brasileiras, com sede e administração no País e serão reguladas e fiscalizadas pelo governo federal.

Para fins de regulamentação da proposta são definidos vários conceitos relativos à atividade de geração de biogás como: (i) os gases que compõem o biogás; (ii) biomassa residual; (iii) digestão anaeróbia; (iv) conversão energética do biogás; (v) aplicações energéticas do biogás; (vi) geração unitária e coletiva; (vii)

geração distribuída de energia elétrica; (vii) gasoduto para transporte de biogás; (viii) centrais termelétricas a biogás.

A proposta determina ainda que as concessionárias de distribuição deverão comprar 10% do total da energia elétrica comercializada anualmente das atividades geradoras de biogás, sempre que este tipo de energia esteja disponível. A regulamentação do preço, das condições técnicas de conexão, do prazo do contrato e demais condições comerciais ficará a cargo da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Ademais é prevista na proposta a utilização do biometano em motores automotivos utilizados na mobilidade da atividade geradora de biogás, sendo a Agência Nacional do Petróleo (ANP) responsável por essa outorga (BRASIL, 2015).

Atualmente o projeto de lei 6559/2013 aguarda parecer das comissões internas da Câmara dos Deputados.

Quando comparadas às políticas públicas em vigor na União Europeia observa-se que no Brasil ainda há um longo caminho a se percorrer. Os impactos ambientais do tratamento inadequado dos resíduos agropecuários aliado à crise da geração hidrelétrica podem contribuir para fazer avançar esse tema.

### **3.4. CONCLUSÃO**

Os estudos realizados sobre a codigestão anaeróbia de dejetos de animais e resíduos agropecuários e agroindustriais indicam que dependendo da proporção da mistura dos co-substratos ocorre o aumento na produção de biogás/biometano. Muitos especialistas apontam para a necessidade de se realizar mais pesquisas sobre o tema.

A maior participação do biogás/biometano na matriz energética mundial depende de políticas públicas claras e objetivas de incentivo para o seu aproveitamento. Essas são fundamentais para que a viabilidade econômica dos empreendimentos seja alcançada. Deixar que o mercado defina o futuro é abrir mão da perspectiva da sustentabilidade ambiental e energética.

### 3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL SEADI, T. (2001). Good practice in quality management of AD residues from biogas production. Report made for the International Energy Agency, Task 24- Energy from Biological Conversion of Organic Waste. Published by IEA Bioenergy and AEA Technology Environment, Oxfordshire, United Kingdom.

ÁLVAREZ, J.A., OTERO, L., LEMA, J.M. (2010). A methodology for optimising feed composition for anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes. *Bioresour. Technol.* Vol 101, 1153–1158.

ALVAREZ, R., LIDEN, G. (2008). Anaerobic co-digestion of aquatic flora and quinoa with manures from Bolivian Altiplano. *Waste Manage.* Vol 28, 1933–1940.

BIOGASPARTNER. (2014). Market Development - The Netherlands.

BRASIL, Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Balanço Energético Nacional 2014 – Ano Base 2013. [www.epe.gov.br/](http://www.epe.gov.br/). (Consulta em: 06/2014).

BRASIL. Câmara dos Deputados. Projetos de Lei e Outras Proposições. PL 6559/2013. Disponível em: <<http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/fichaDetramitacao?idProposicao=596099>>. (Consulta em: 06/2015).

BRAUN, R., WELLINGER, A. (2003). Potential of Co-digestion. IEA Task 37. <http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publi-task37/Potential%20of%20Codigestion%20short%20Brosch221203.pdf>, (Consulta em: 06/2015).

BULKOWSKA, K., POKÓJ, T., KLIMIUK, E., GUSIATIN, Z.M. (2012). Optimization of anaerobic digestion of a mixture of Zea mays and Miscanthus sacchariflorus silages with various pig manure dosages, *Bioresource Technology*, Vol 125: 208-216.

CAVALIERO, C. K. N., SILVA, E. P. (2005). Electricity generation: regulatory mechanisms to incentive renewable alternative energy sources in Brazil, *Vol 33 (13)*, 1745-1752.

COSTA, C. V., ROVEREA, E., ASSMANN, D. (2008). Technological innovation policies to promote renewable energies: Lessons from the European experience for the Brazilian case. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 12 (1), 65-90.

DAHLGREN, S., LILJEBLAD, A., CERRUTO, J. (2013). Realiserbar biogaspotential i Sverige 2030 genom rötning och förgasning. *Avfall Sverige utveckling*, Malmö.

DEUBLEIN, D., STEINHAUSER, A. (2011). *Biogas from waste and renewable resources: an introduction*. Second, revised and expanded edition. Weinheim: Wiley-VCH.

DRESSLER, D., LOEWEN, A., NELLES, M. (2012). Life cycle assessment of the supply and use of bioenergy: impact of regional factors on biogas production. *Int J Life Cycle Assess*, 17 (9): 1104–1115.

EBA (2013) *Biogas Report 2013*. European Biogas Association

ENERGINET.DK (2014), PSO biogas support schemes in Denmark according to Danish law. <http://www.energinet.dk/EN/GAS/biogas/Stoette-til-biogas/Sider/Stoetteordningerfor-biogas.aspx>

EurObserv'ER. Disponible en: [http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat\\_baro/observ/baro224\\_Biogas\\_en.pdf](http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/observ/baro224_Biogas_en.pdf) . (Consulta em: 10/2014).

FABbiogas, [http://www.fabbiogas.eu/fileadmin/user\\_upload/Home/AD-process-diagram2.jpg](http://www.fabbiogas.eu/fileadmin/user_upload/Home/AD-process-diagram2.jpg). (Consulta em: 06/2015).

GasNZV (2012) *Gasnetzzugangsverordnung (Gas Network Access Ordinance) – Verordnung über den Zugang zu Gasversorgungsnetzen*.

GELEGENIS, J.; D. GEORGAKAKIS; I. ANGELIDAKI; AND V. MAVRIS. (2007). Optimization of biogas production by co-digesting whey with diluted poultry manure. *Renewable Energy* 32:2147-2160

GGG (2013) *Biomethane Market Matrix*. Green Gas Grids

IEA BIOENERGY (2014) Task 37 Biogas Country Overview, Disponível em: <http://www.iea-biogas.net/country-reports.html?file=files/daten-redaktion/download/publications/country-reports/Summary/Countryreport2013.pdf>. (Consulta em: 06/2015).

JINGURA, R. M., MATENGAIFA, R. (2009). Optimization of biogas production by anaerobic digestion for sustainable energy development in Zimbabwe, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 13 (5): 1116-1120.

KAFLE, G. K., KIM, S. H., SUNG, K. I. (2012). Batch anaerobic co-digestion of Kimchi factory waste silage and swine manure under mesophilic conditions, *Bioresource Technology*, Vol 124: 489-494.

KAFLE, G. K., KIM, S. H. (2013). Anaerobic treatment of apple waste with swine manure for biogas production: Batch and continuous operation, *Applied Energy*, Vol 103: 61-72.

KAPARAJU, P., RINTALA, J. (2005). Anaerobic co-digestion of potato tuber and its industrial by-products with pig manure. *Resour. Conserv. Recycl.* 43 (2), 175–188.

KARELLAS, S., BOUKIS, I., KONTOPOULOS, G. (2010). Development of an investment decision tool for biogas production from agricultural waste, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 14 (4): 1273-1282.

KOOP, D., MORRIS, C. (2012) Biogas in Luxembourg's natgas network. *Renew. Int.*

KOPPEJAN, J., ELBERSEN, W., MEEUSEN, M., PREM, B. (2009) beschikbaarheid van nederlandse biomassa voor elektriciteit en.

LANSING, S., MARTIN, F., BOTERO, R.B., NOGUEIRA DA SILVA, T., DIAS DA SILVA, E. (2010). Methane production in low-cost, unheated, plug-flow digesters treating swine manure and used cooking grease. *Bioresour. Technol.* Vol 101, 4362–4370.

LEHTOMAKI, A.; HUTTUNEN, S., RINTALA, J. A. (2007). Laboratory investigations on co-digestion of energy crops and crop residues with cow manure for methane

production: Effect of crop to manure ratio. *Resources, Conservation and Recycling*. 51: 591–609.

LI, Y.B., PARK, S.Y., ZHU, J.Y. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renew. Sust. Energy Rev.* Vol 15, 821–826.

LI, Q., QIAO, W., WANG, X., TAKAYANAGI, K., SHOFIE, M., LI, Y-Y. (2015). Kinetic characterization of thermophilic and mesophilic anaerobic digestion for coffee grounds and waste activated sludge, *Waste Management*, Vol 36: 77-85.

LUXEMBOURG. (2011). Production, la rémunération et la commercialisation de biogaz.

MAO, C., FENG, Y., WANG, X., REN, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 45, 540-555.

MARTÍNEZ-GARCÍA, G., JOHNSON, A.C., BACHMANN, R.T., WILLIAMS, C.J., BURGOYNE, A., EDYVEAN, R.G.J. (2007). Two-stage biological treatment of olive mill wastewater with whey as co-substrate. *International Biodeterioration Biodegradation*, Vol 59, 273–282.

MEYER-AURICH, A., SCHATTAUER, A., HELLEBRAND, H.J., KLAUSS, H., PLÖCHL, M., BERGA, W. (2012). Impact of uncertainties on greenhouse gas mitigation potential of biogas production from agricultural resources. *Renew. Energy*, 37(1): 277–284.

MOESTEDT, J., NORDELL, E., YEKTA, S. S., LUNDGREN, J., MARTÍ, M., SUNDBERG, C., EJLERTSSON, J., SVENSSON, B.H., BJÖRN, A. (2015). Effects of trace element addition on process stability during anaerobic co-digestion of OFMSW and slaughterhouse waste, *Waste Management*.

MOLINUEVO-SALCES, B., GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, C., GÓMEZ, X., GARCÍA-GONZÁLEZ, M. C., MORÁN, A. (2012). Vegetable processing wastes addition to improve swine manure anaerobic digestion: Evaluation in terms of methane yield and SEM characterization, *Applied Energy*, Vol 91 (1), 36-42.

MONDRAGÓN, F. A., P. SAMAR, H. H. J. COX, B. K. AHRING, AND R. IRANPOUR (2006) Anaerobic codigestion of municipal, farm, and industrial organic wastes: A survey of recent literature. *Water Environ. Res.* Vol 78: 607-636.

MARKOVSKA, N., KLEMEŠ, J. J., DUIĆ, N., GUZOVIĆ, Z., MATHIESEN, B. V., LUND, H., YAN, J. (2014). Sustainable development of energy, water and environment systems, *Applied Energy*, Vol 135 pp. 597-599.

ORRICO JUNIOR, M.A.P., ORRICO, A.C.A., LUCAS JUNIOR, J. (2010). Biodigestão anaeróbia dos resíduos da produção avícola: cama de frangos e carcaças. *Eng. Agríc.*, 30 (3), 546-554.

POTTMAIER, D. ; MELO, C.R. ; SARTOR, M.N. ; KUESTER, S. ; AMADIO, T.M. ; FERNANDES, C.A.H. ; MARINHA, D. ; ALARCON, O.E. (2013). The Brazilian energy matrix: From a materials science and engineering perspective. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 19, p. 678-691.

RIAÑO, B., MOLINUEVO, B., GARCÍA-GONZÁLEZ, M.C. (2011). Potential for methane production from anaerobic co-digestion of swine manure with winery wastewater. *Bioresour. Technol.* Vol 102, 4131–4136.

RISBERG, K., SUN, L., LEVÉN, L., HORN, S. J., SCHNÜRER, A. (2013). Biogas production from wheat straw and manure – Impact of pretreatment and process operating parameters, *Bioresource Technology*, Vol 149: 232-237.

ROMANO, R. T., ZHANG, R.. (2008). Co-digestion of onion juice and wastewater sludge using an anaerobic mixed biofilm reactor, *Bioresource Technology*, Vol 99 (3): 631-637.

SALMINEN, E., RINTALA, J. (2002). Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste – a review, *Bioresource Technology*, Vol 83 (1): 13-26.

SHARMA, D., ESPINOSA-SOLARES, T., HUBER, D. H. (2013). Thermophilic anaerobic co-digestion of poultry litter and thin stillage, *Bioresource Technology*, Vol 136, 251-256.

SOITO, J. L. S. ; FREITAS, M. A. V. (2011). Amazon and the expansion of hydropower in Brazil: Vulnerability, impacts and possibilities for adaptation to global climate change. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol 15: 3165-3177.

THRÄN, D., PERSSON, T., SVENSSON, M., DANIEL-GROMKE, J., PONITKA, J., SEIFFERT, M., BALDWIN, J., KRANZL, L., SCHIPFER, F., MATZENBERGER, J., DEVRIENDT, N., DUMONT, M., DAHL, J., BOCHMANN, G. (2014). Biomethane – status and factors affecting market development and trade. IEA Task 40 and Task 37 Joint Study.

UNIVATES, Unidade Integrada Vale do Taquari de Ensino Superior. Disponível em: <https://www.univates.br/noticias/15092-univates-integra-evento-sobre-desempenho-de-onibus-abastecido-com-gnverde>. (Consulta em: 06/2015).

VOLPI, G., JANUZZI, G. M., GOMES, R. D. M. (2006). A sustainable electricity blueprint for Brazil. *Energy for Sustainable Development Journal*. Vol 4: 14-24.

WANG, X., YANG, G., FENG, Y., REN, G., HAN, X. (2012a). Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw, *Bioresource Technology*, Vol 120: 78-83.

WANG, X.J., YANG, G.H., FENG, Y.Z., REN, G.X. (2012b). Potential for biogas production from anaerobic co-digestion of dairy and chicken manure with corn stalks. *Adv. Mat. Res.* Vol 347, 2484–2492.

WU, W. (2007). Anaerobic co-digestion of biomass for methane production: recent research achievements. Iowa State University.

WU, X., YAO, W., ZHU, J., MILLER, C. (2010). Biogas and CH<sub>4</sub> productivity by co-digesting swine manure with three crop residues as an external carbon source, *Bioresource Technology*, Vol 101 (11) 4042-4047.

XIE, S., LAWLOR, P.G., FROST, J.P., HU, Z., ZHAN, X. (2011). Effect of pig manure to grass silage ratio on methane production in batch anaerobic co-digestion of pig manure and grass silage. *Bioresour. Technol.* Vol 102, 5728–5733.

## **CAPÍTULO 4**

# **FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ESTIMAR A PRODUÇÃO DE BIOMETANO E ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS**

## **RESUMO:**

A maior parte dos projetos energéticos no meio rural despreza a geração *in loco*, também chamada de geração distribuída ou geração dispersa de energia elétrica, sendo caracterizados somente pela expansão da rede elétrica até as propriedades. O uso de ferramentas computacionais é importante para o dimensionamento e planejamento integrado de recursos energéticos, no entanto os *softwares* disponíveis atualmente não contemplam a micro e minigeração distribuída e não condizem com a realidade de países em desenvolvimento como o Brasil. O objetivo deste trabalho foi elaborar uma ferramenta computacional capaz de avaliar o potencial de geração de energia a partir da codigestão anaeróbia de resíduos agropecuários (animal e vegetal) a nível municipal e regional. A ferramenta foi desenvolvida com base de dados constituída em uma *geodatabase* criando um vínculo com o Sistema de Informação Geográfica (SIG). Foram utilizados dados fornecidos pelos órgãos públicos de georeferenciamento e estatística e o programa ArcGIS da ESRI. A ferramenta foi capaz de estimar o potencial de geração de energia com o biometano a nível de propriedade (granja) e em condomínios de energia (associação de granjas).

**Palavras-Chave:** planejamento e dimensionamento energético, fontes renováveis

#### 4.1. INTRODUÇÃO

A maior parte dos projetos de aproveitamento energético no meio rural despreza a geração *in loco*, sendo caracterizados somente pela expansão da rede elétrica até as propriedades. A geração distribuída de energia elétrica se caracteriza por sua localização próxima aos centros de carga, sendo conectada ao sistema de distribuição ou na própria unidade consumidora, de pequeno porte e não despachada pelo Operador Nacional do Sistema (ANEEL, 2011). Em países da Europa, nos Estados Unidos e na Austrália, a geração distribuída de pequeno porte tem tido forte incentivo (FERREIRA *et al.*, 2012; BUDZIANOWSKI, 2012).

No Brasil a geração distribuída está associada principalmente a autoprodução e produção independente de energia em alguns setores industriais, como o setor de papel e celulose, siderurgia e sucroalcooleiro, por meio de unidades de cogeração (LORA e HADDAD, 2006). A geração distribuída apresenta algumas vantagens a saber: (i) aumento da confiabilidade de fornecimento para consumidores; (ii) aumento da qualidade de energia; (iii) possibilidade de gerenciamento da ponta; (iv) possibilidade de redução de custos de expansão; (v) redução dos custos de transmissão e distribuição; (vi) adiamento e descentralização de investimentos; (vii) viabilidade econômica para atendimento de regiões remotas; (viii) diversificação da matriz energética; e (ix) possibilidade do consumidor alcançar a auto-suficiência energética (EL-KHATTAM e SALAMA, 2004; PEPERMANS *et al.*, 2005).

O Brasil possui um grande potencial para o aproveitamento energético de resíduos agropecuários por meio da codigestão anaeróbia. A produção de energia a partir do biogás/biometano além de contribuir para o aumento da oferta de energia no país, também ajuda a mitigar os impactos ambientais causados pela atividade pecuária ajudando a reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

O uso de ferramentas computacionais para auxiliar no dimensionamento e planejamento integrado de recursos é uma opção para avaliar o potencial local e regional de geração de energia a partir de resíduos agropecuários. Atualmente existem no mercado vários *softwares* de dimensionamento energético, por exemplo INSEL, PV-DESIGN PRO, GREENIUS, HOMER e RETScreen, sendo que a maioria deles possuem altos custo de licenciamento. Esses *softwares* desenvolvidos em

países do hemisfério norte possuem em comum: (i) serem desenvolvidos em língua inglesa; (ii) serem aplicados a sistemas conectados à rede elétrica convencional, diferente da geração distribuída; (iii) estão direcionados à grandes instalações (centenas de kW ou mesmo MW), não contemplando a micro e minigeração distribuída; (iv) não existe aproveitamento da biomassa para a geração de energia elétrica, sendo somente para fins de aquecimento e de conforto térmico; (v) as análises de viabilidade econômica não condizem com a realidade de países em desenvolvimento como o Brasil (BORGES NETO e CARVALHO, 2009).

O objetivo deste trabalho foi elaborar uma ferramenta computacional capaz de: (i) determinar os resíduos agropecuários (animal e vegetal) produzidos a nível municipal e regional; (ii) determinar o potencial de geração de biometano a partir da codigestão de resíduos agropecuários; (iii) determinar o potencial de geração de energia elétrica produzida a partir do biometano; (iv) determinar o potencial de produção de biofertilizante a partir do digestato resultante do processo de codigestão; (iv) calcular o potencial de Certificado de Emissões Reduzidas (CER) de dióxido de carbono equivalente ( $tCO_2$  eq.); (v) dimensionar o aproveitamento energético do biometano a nível de granja; (vi) dimensionar condomínios de agroenergia para granjas de um determinado município e/ou região; (viii) apresentar os indicadores de viabilidade econômica dos empreendimentos dimensionados.

Como estudo de caso foi realizado o dimensionamento do condomínio de agroenergia para o município de Uruçânia que possui o maior número de granjas de suínos e rebanho efetivo da região da Zona da Mata do Estado de Minas Gerais.

## 4.2. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.2.1. FERRAMENTA COMPUTACIONAL SAUDADE

A ferramenta computacional SAUDADE (Sistema de Avaliação do Uso da Digestão Anaeróbia para o Dimensionamento Energético) é formada por planilhas de cálculo do Microsoft Excel. Possui uma base de dados constituída em uma *geodatabase* com a finalidade de criar o vínculo com o Sistema de Informação Geográfica (SIG) desenvolvido em ArcGIS. Para a otimizar a mistura de resíduos animais e vegetais visando maximizar a produção de biometano foi utilizado o complemento do Microsoft Excel chamado Solver que permite o cálculo por de otimização por programação linear.

A ferramenta computacional SAUDADE pode ser aplicada para dimensionar o aproveitamento de resíduos agropecuários a nível de propriedade individual (uma granja) ou por meio de condomínios (associação de várias granjas).

A Figura 4.1 mostra um fluxograma da ferramenta computacional desenvolvida.

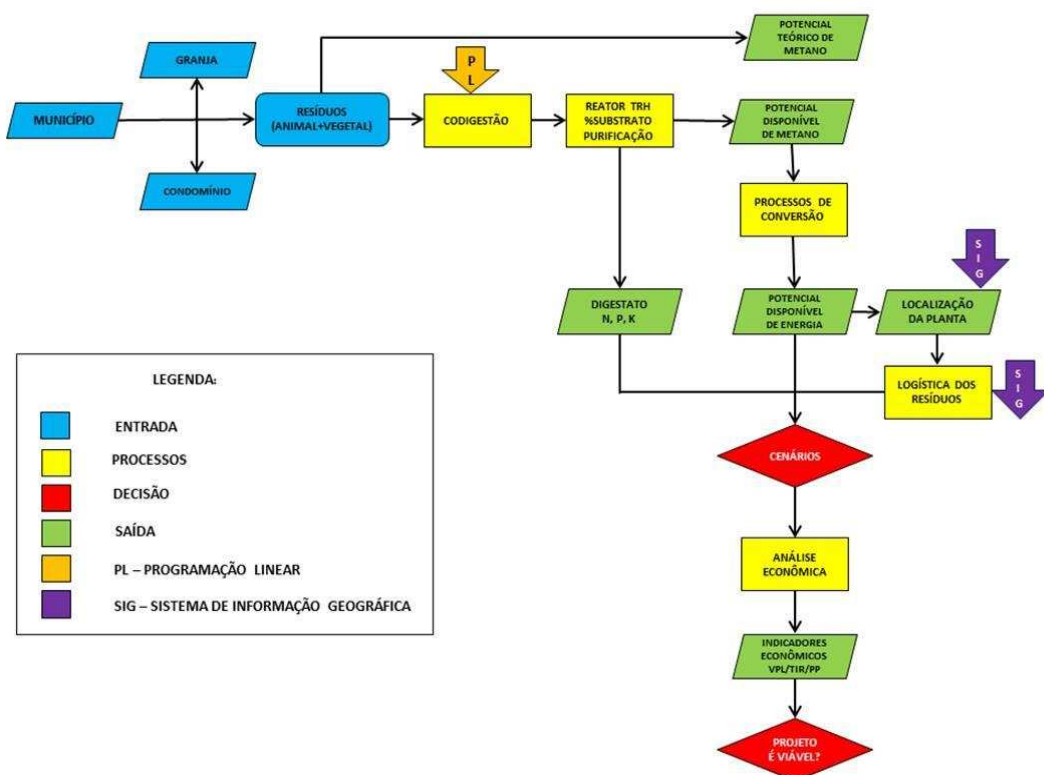


Figura 4.1 – Fluxograma da Ferramenta Computacional SAUDADE.

#### 4.2.2. FONTE DE DADOS:

Primeiramente seleciona-se a região para a qual será realizado o planejamento energético do uso dos resíduos agropecuários. Nesta etapa deve-se obter os *geodatabase* da região de estudo utilizando-se Sistemas de Informações Geográficas. Neste trabalho foram utilizados os dados fornecidos pelos órgãos públicos de georeferenciamento e o programa utilizado foi o ArcGIS da ESRI.

Os dados da produção de resíduos agropecuários foram obtidos a partir da Pesquisa Pecuária Municipal e da Pesquisa Agrícola Municipal realizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) anualmente que fornece informações à nível municipal conforme mostra o Quadro 4.1:

Quadro 4.1 – Informações obtidas a partir das Pesquisas Pecuária Municipal e Agrícola Municipal do IBGE

	Dados	
Pesquisa Pecuária Municipal	(i)	Tipo de rebanho
	(ii)	Número de cabeças
Pesquisa Agrícola Municipal	(i)	Tipo de cultivo
	(ii)	Área plantada (ha)
	(iii)	Produção anual (t)

O objetivo principal da ferramenta é dimensionar o aproveitamento dos resíduos pecuários com vistas a mitigar os impactos dos mesmos no meio ambiente. A opção de aproveitamento dos resíduos é por meio da codigestão anaeróbia com a produção de biometano a ser utilizado na geração de energia.

#### 4.2.3. FUNCIONAMENTO DA FERRAMENTA

A ferramenta permite que sejam realizados os cálculos do potencial de geração de energia a partir do biometano dos resíduos agropecuários: a nível regional, a nível de granja e a nível de condomínio de agroenergia (município).

A ferramenta permite inicialmente selecionar o município para o qual o dimensionamento será realizado. Em seguida deve ser definida a quantidade de

animais que será utilizada no dimensionamento. Essa quantidade de animais deve ser menor ou igual ao rebanho efetivo do município disponibilizado pela Pesquisa Pecuária Municipal. O próximo passo é definir a razão resíduos vegetais por dejetos animais ( $R_{VA}$ ) dada pela equação 4.1.

$$RVA = \frac{m_{res\ veg}}{m_{res\ an}} \quad (4.1)$$

em que:

$RVA$  - razão resíduos vegetais por dejetos animais na mistura, adimensional;

$m_{res\ veg}$  - massa de resíduos vegetais, kg;

$m_{res\ an}$  - massa de resíduos animais, kg.

Os valores da  $RVA$  dependem da disponibilidade de resíduos vegetais. O valor máximo considerado foi igual a 2,00 ou 200%, o que corresponde a proporção 2 para 1 de resíduos vegetais e dejetos animais.

A ferramenta apresenta a massa de resíduos disponível no município, em kg/ano, para o rebanho e os diferentes cultivos.

O cálculo dos resíduos é dado pelas equações a seguir:

## PRODUÇÃO DE RESÍDUOS DE ANIMAIS

Os dejetos animais produzidos foram calculados pela equação 4.2.

$$D_{ej} = N_{animais} \times d_{ej} \times \Delta t \quad (4.2)$$

em que:

$D_{ej}$  - Produção anual de dejetos animais,  $kg\ ano^{-1}$  ou  $m^3\ ano^{-1}$ ;

$N_{animais}$  - Rebanho efetivo por ano, animais  $ano^{-1}$ ;

$d_{ej}$  - Produção de dejetos por animal,  $kg$  ou  $m^3\ animal\ dia^{-1}$ ; e

$\Delta t$  - ciclo de criação, dias.

## PRODUÇÃO DE RESÍDUOS DE CULTIVOS VEGETAIS

O cálculo da quantidade de resíduos vegetais disponível foi realizada considerando a produção anual ou a área plantada de acordo com a fonte de dados.

A equação 4.3 fornece os resíduos gerados considerando-se a produção anual do cultivo.

$$R_{cultivo} = P_{rod} \times F_{res} \times 10^3 \quad (4.3)$$

em que:

- $R_{cultivo}$  - Produção de resíduos do cultivo,  $\text{kg ano}^{-1}$ ;  
 $P_{rod}$  - Produção do cultivo,  $\text{t ano}^{-1}$ ; e  
 $F_{res}$  - Fração de resíduo, adimensional.

A equação 4.4 fornece os resíduos gerados considerando-se a área plantada anual do cultivo.

$$R_{cultivo} = T_{retirada} \times A_{cultivo} \times R_{ha} \times 10^3 \quad (4.4)$$

em que:

- $R_{cultivo}$  - Produção de resíduos do cultivo,  $\text{kg ano}^{-1}$ ;  
 $T_{retirada}$  - Taxa de retirada dos resíduos do solo, adimensional;  
 $A_{cultivo}$  - Área plantada do cultivo,  $\text{ha ano}^{-1}$ ; e  
 $R_{ha}$  - Resíduo do cultivo por área plantada,  $\text{t ha}^{-1}$ .

A ferramenta apresenta a porcentagem dos resíduos vegetais disponíveis utilizados na codigestão e na mistura total.

O Quadro 4.2 apresenta o potencial de geração de metano para cada um dos resíduos dados em  $\text{m}^3$  de  $\text{CH}_4$  por kg de Sólidos Voláteis. Esses valores foram retirados da literatura.

Quadro 4.2 – Potencial de metano de resíduos agropecuários

Resíduo	Produção de Metano (m <sup>3</sup> de CH <sub>4</sub> /kg SV)	Produção de Metano (m <sup>3</sup> de CH <sub>4</sub> /kg resíduo)	Referência
Suínos	0,42716	0,022371697	(ORRICO JUNIOR, et al., 2011)
Frango	0,3387	0,2152	(ORRICO JUNIOR, et al., 2011)
Café	0,244	0,045384	(FISCHER, et al., 2010)
Feijão	0,44	0,3728208	(PETERSSON, et al., 2007)
Milho	0,472	0,122602944	(KTBL, 2014)
Bagaço de Cana	0,436	0,403026192	(DE PAOLI, et al., 2011)
Palha de Cana	0,518	0,36226848	(DE PAOLI, et al., 2011)

A produção de biometano pelos diferentes tipos de resíduos foi calculada considerando-se as seguintes equações:

### PRODUÇÃO DE BIOMETANO DE DEJETOS ANIMAIS

A equação 4.5 fornece a produção de biometano produzido a partir dos dejetos animais.

$$P_{\text{Banimais}} = D_{ej} \times ST \times SV \times B_{\text{animais}} \quad (4.5)$$

em que:

- $P_{\text{Banimais}}$  - Produção de biometano com dejetos animais, m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>;
- $D_{ej}$  - Produção anual de dejetos animais, kg ano<sup>-1</sup>;
- $ST$  - Sólidos Totais por massa de dejetos, kg de ST kg<sup>-1</sup>;
- $SV$  - Sólidos Voláteis por massa de ST, kg de SV kg de ST<sup>-1</sup>; e
- $B_{\text{animais}}$  - volume de biometano por sólidos voláteis m<sup>3</sup> (kg de SV)<sup>-1</sup>.

### PRODUÇÃO DE BIOMETANO DE RESÍDUOS DE CULTIVOS VEGETAIS

A equação 4.6 fornece a produção de biometano produzido a partir dos resíduos de cultivos vegetais.

$$P_{B_{cultivo}} = R_{cultivo} \times ST \times SV \times B_{cultivo} \quad (4.6)$$

em que:

$P_{B_{cultivo}}$	- Produção de biometano com resíduos do cultivo,	$m^3 \text{ ano}^{-1}$ ;
$R_{cultivo}$	- Produção de resíduos do cultivo,	$kg \text{ ano}^{-1}$ ;
ST	- Sólidos Totais por massa de resíduos,	$kg \text{ de ST } kg^{-1}$ ;
SV	- Sólidos Voláteis por massa de ST,	$kg \text{ de SV } kg \text{ de ST}^{-1}$ ; e
$B_{cultivo}$	- Volume de biometano por sólidos voláteis,	$m^3 \text{ (kg de SV)}^{-1}$ .

O objetivo da ferramenta é maximizar a produção total de biometano dada pela soma da produção por cada um dos diferentes tipos de resíduos.

## POTENCIAL DE ENERGIA A PARTIR DO BIOMETANO

O potencial de energia disponível a partir do biometano foi calculado a partir da equação 4.7.

$$E = P_B \times PCI_B \times 10^{-9} \quad (4.7)$$

em que:

E	- Potencial de energia,	$TJ \text{ ano}^{-1}$ ;
$P_B$	- Produção de biometano,	$m^3 \text{ ano}^{-1}$ ; e
$PCI_B$	- Poder Calorífico Inferior do biometano,	$kJ \text{ m}^{-3}$ .

Considerou-se o Poder Calorífico Inferior (PCI) do biometano igual a  $36.000 \text{ kJ m}^{-3}$  (PANTALEO, *et al.*, 2013).

## POTÊNCIA ELÉTRICA A PARTIR DO METANO

A potência elétrica disponível a partir do metano produzido foi calculada com a equação 4.8.

$$Pot_{elétrica} = PCI_B \times \dot{v} \times \eta_{motor-gerador} \quad (4.8)$$

em que:

$Pot_{elétrica}$	- Potência elétrica,	$kW$ ;
$PCI_B$	- Poder Calorífico Inferior do biometano,	$kJ \text{ m}^{-3}$ ;
$\dot{v}$	- vazão de biometano,	$m^3 \text{ s}^{-1}$ ; e

$\eta_{\text{motor-gerador}}$  - rendimento do conjunto motor-gerador, adimensional.

O Quadro 4.3 apresenta a eficiência do conjunto motor gerador de acordo com a produção de biogás.

Quadro 4.3 – Eficiência do conjunto motor-gerador de acordo com a produção de metano

Produção de CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /ano)	Eficiência ( $\eta$ )
< 165.000	0,266
165.000 < Prod < 412.000	0,299
412.000 < Prod < 824.000	0,338
824.000 < Prod < 1.645.000	0,355
Prod >1.645.000	0,371

Fonte: (PANTALEO, *et al.*, 2013)

A porcentagem máxima de resíduos vegetais na mistura (%MRVM) é dada pela razão da massa total dos resíduos dos cultivos vegetais disponíveis no município e a massa de dejetos de suínos disponíveis na granja e é dada pela equação 4.9.

$$\% M_{RVM} = \frac{m_{\text{resíduos vegetais}}}{m_{\text{resíduos animais}}} \quad (4.9)$$

em que:

- $\%M_{RVM}$  - Porcentagem máxima de resíduos vegetais adimensional;
- $m_{\text{resíduos vegetais}}$  - massa total de resíduos vegetais disponíveis kg; e
- $m_{\text{resíduos animais}}$  - massa de resíduos animais disponíveis kg.

A ferramenta fornece o aumento percentual na produção de metano com a codigestão definido pela equação 4.10.

$$\uparrow P_B = \frac{P_{B\text{codigestão}}}{P_{B\text{sem codigestão}}} \quad (4.10)$$

em que:

- $\uparrow P_B$  - Aumento na produção de metano, adimensional;
- $P_{B\text{codigestão}}$  - Produção de CH<sub>4</sub> com codigestão, m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>; e
- $P_{B\text{sem codigestão}}$  - Produção de CH<sub>4</sub> sem codigestão, m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>.

## Restrições:

As restrições utilizadas na Ferramenta programadas por meio da função SOLVER do Excel são mostradas a seguir:

### 1) Utilização de 100% dos resíduos animais na codigestão

Essa restrição determina que 100% dos dejetos de animais disponíveis serão utilizados na codigestão. Isso se deve ao fato de que a destinação ambientalmente correta dos dejetos exigida pelos órgãos de fiscalização é um dos maiores problemas enfrentados pelos produtores.

### 2) Massa total de resíduos vegetais utilizada na mistura

Essa restrição considera que a massa total de resíduos vegetais utilizada na codigestão ( $m_{\text{cultivo1}} + m_{\text{cultivo2}} + m_{\text{cultivo3}} + m_{\text{cultivo4}} + \dots$ ) deve ser menor ou igual ao produto entre a razão resíduos vegetais por dejetos animais (RVA) e a massa dos resíduos vegetais disponíveis no município.

### 3) Massa máxima de resíduos vegetais no substrato da codigestão

Essa restrição considera que a massa total de resíduos vegetais utilizada na codigestão ( $m_{\text{cultivo1}} + m_{\text{cultivo2}} + m_{\text{cultivo3}} + m_{\text{cultivo4}} + \dots$ ) deve ser menor ou igual a massa de resíduos vegetais disponíveis no município.

### 4) Porcentagem máxima de resíduos vegetais na mistura da codigestão

Considera que a razão resíduos vegetais por dejetos animais (RVA) deverá ser menor ou igual a porcentagem máxima de resíduos vegetais na mistura (%MRVM).

### 5) Massa de resíduo de cultivo na codigestão

Essa restrição, aplicada à todos os cultivos utilizados na codigestão, determina que a massa de resíduos de um dado cultivo utilizada na codigestão deve ser menor ou igual a massa de resíduos desse cultivo disponível no município.

#### 6) Número máximo de animais na propriedade

Essa restrição considera que o número de animais utilizados no dimensionamento deve ser menor ou igual ao número de animais disponíveis no município ou região com base nos dados fornecidos pela Pesquisa Pecuária Municipal do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e pelo IMA.

#### 7) Não negatividade dos resíduos da codigestão

Considera que a massa dos resíduos utilizados na codigestão deve ser maior ou igual a zero.

#### 8) Não negatividade da produção de metano

Considera que a produção de biometano dos resíduos empregados na codigestão deve ser maior ou igual a zero.

### **DIMENSIONAMENTO DOS BIODIGESTORES**

O dimensionamento do biodigestor para resíduos animais e dos cultivos vegetais foi realizado considerando-se os resíduos utilizados na codigestão.

A massa e a vazão diárias dos resíduos produzidos foram calculados de acordo com as equações 4.11 e 4.12.

$$R_{diário} = \frac{R_{ano}}{365} \quad (4.11)$$

em que:

- $R_{diário}$  - Massa de resíduos diário,  $\text{kg dia}^{-1}$ ;  
 $R_{ano}$  - Massa anual de resíduos,  $\text{kg ano}^{-1}$ ; e  
365 - Número de dias no ano, dias.

$$Q_{diária} = \frac{R_{diário}}{\rho_{res}} \quad (4.12)$$

em que:

- $Q_{diária}$  - Vazão diária de resíduos,  $m^3 \text{ dia}^{-1}$ ;  
 $R_{diário}$  - Massa diária de resíduos,  $kg \text{ dia}^{-1}$ ; e  
 $\rho_{res}$  - Massa específica do resíduo,  $kg \text{ m}^{-3}$ .

A vazão diária de resíduos ( $Q_{diário}$ ) deverá ser somado o volume de água a ser utilizado para se realizar a codigestão úmida, considerando a proporção água:resíduo. Logo a vazão diária total de resíduos é dada pela equação 4.13.

$$Q_{total \text{ diária}} = Q_{diário} + V_{água} \quad (4.13)$$

em que:

- $Q_{total \text{ diária}}$  - Vazão diária total de resíduo,  $m^3 \text{ dia}^{-1}$ ;  
 $Q_{diária}$  - Vazão diária de resíduo,  $m^3 \text{ dia}^{-1}$ ; e  
 $V_{água}$  - Volume de água adicionada,  $m^3 \text{ dia}^{-1}$ .

O volume do biodigestor foi calculado de acordo com a equação 4.14.

$$V = TRH \times Q_{total \text{ diária}} \quad (4.14)$$

em que:

- $V$  - Volume do biodigestor,  $m^3$ ;  
 $TRH$  - Tempo de Retenção Hidráulica, dias;  
 $Q_{total \text{ diária}}$  - Vazão total diária de resíduos,  $m^3 \text{ dia}^{-1}$ .

Adotou-se o tempo de retenção hidráulica (TRH) igual a 28 dias para a codigestão, considerando-se os valores apresentados por OLIVEIRA, 2005.

O custo total do biodigestor é dado multiplicando-se o volume do biodigestor pelo custo do biodigestor dado em R\$/ $m^3$  e com base nos cálculos realizados por MARTINS e OLIVEIRA, 2011.

Para calcular o volume do biodigestor para os dejetos de aves e resíduos vegetais na codigestão considera-se o volume de resíduos por ciclo.

Primeiramente deve ser realizado o cálculo da massa de resíduo por ciclo dado pela equação 4.15.

$$R_{ciclo} = \frac{R_{total}}{N_{ciclos}} \quad (4.15)$$

em que:

- $R_{ciclo}$  - Resíduos por ciclo,  $\text{kg ciclo}^{-1}$ ;  
 $R_{total}$  - Resíduos totais,  $\text{kg ano}^{-1}$ ;  
 $N_{ciclos}$  - Número de ciclos por ano,  $\text{ciclos ano}^{-1}$ .

O cálculo do volume de dejetos por ciclo em  $\text{m}^3$  é dado pela equação 4.16.

$$V_{ciclo} = \frac{R_{ciclo}}{\rho_{res}} \quad (4.16)$$

em que:

- $V_{ciclo}$  - Volume de resíduos por ciclo,  $\text{m}^3 \text{ ciclo}^{-1}$ ;  
 $R_{ciclo}$  - Resíduos por ciclo,  $\text{kg ciclo}^{-1}$ ; e  
 $\rho_{res}$  - Massa específica do resíduo,  $\text{kg m}^{-3}$ .

O volume de água adicionado aos resíduos foi calculado multiplicando o volume de resíduo por ciclo pela proporção de água a ser adicionada para cada tipo de resíduo de forma a assegurar a codigestão úmida e o bombeamento dos resíduos.

O volume do biodigestor é igual ao volume de resíduos que ingressa no biodigestor a cada ciclo.

O custo total do biodigestor é dado multiplicando-se o volume do biodigestor pelo custo do biodigestor dado em  $\text{R\$/m}^3$  e com base nos cálculos realizados por MARTINS e OLIVEIRA, 2011.

## **CUSTO DE CAPITAL**

O custo de capital foi definido por unidade de potência das usinas ( $\text{R\$/kW}$ ), conforme o Quadro 4.4.

#### Quadro 4.4 – Custo de capital dos empreendimentos

Ítem	R\$/kW*
Custo Unidade de Cogeração	1.260,95
Custo de Instalação	1.512,68
Custo do Recuperador de Calor	179,53
Sistema de Limpeza do biogás	225,54
Infraestrutura e Obras Civis	441,33
Recepção e Pré-tratamento (Resíduos Agrícolas)	111,20
Decantador	100,08
SCADA e quadros	245,53
Outros subsistemas	102,86

\*Valores baseados em (KARELLAS, *et al.*, 2010);

O Custo de Capital é formado ainda pelo custo com o biodigestor e auxiliares. O Custo Total (Final) é formado pelos custos com o projeto de desenvolvimento (7,5% do Custo Total), com os recursos de contingência (5% do Custo Total).

#### CUSTO OPERACIONAL

Os Custos Operacionais foram calculados como percentuais dos custos de capital conforme mostrado no Quadro 4.5 abaixo:

#### Quadro 4.5 – Custos operacionais

Ítem	% sobre o Custo de Capital*
Despesas com pessoal	10
Custos Variáveis	5
Materiais de Consumo	2,5
Equipamentos da usina em operação	15
Custo para tratar o digestato	2,5
Contingência	2,5

\* Valores baseados em (KARELLAS, *et al.*, 2010);

Os Custos Operacionais são ainda formados pelo Custo de Operação e Manutenção Fixo (O&M Fixo) e pelo Custo de Operação e Manutenção Variável (O&M Variável).

O Custo de O&M Fixo é igual a R\$ 22,41/kW da usina e o Custo de O&M Variável é igual a R\$ 0,019/kWh gerado pela usina (Resource Dynamics Corporation, 2001).

## CUSTO COM RESÍDUOS

Foram calculados os custos logísticos com a colheita, armazenagem, carga e descarga e transporte dos resíduos utilizados na codigestão. Os custos unitários são mostrados no Quadro 4.6 abaixo:

Quadro 4.6 – Custos Logísticos Típicos

FASE	Custo Unitário*
Colheita (R\$/t)	71,99
Armazenagem (R\$/t)	28,30
Carga e Descarga (R\$/t)	17,28
Transporte (R\$/t.km)	0,49

\*Valores baseados nas Referências: (Kandam *et al.*, 2000); (Kumar *et al.*, 2003); (Thorsell *et al.*, 2004); (Sokhansanj *et al.*, 2006); (Mapemba *et al.*, 2008); (Delivand *et al.*, 2011); (Silva *et al.*, 2006); (Dambrósio *et al.*, 2009); (Ravula *et al.*, 2008); (Sultana *et al.*, 2010); (OLIVEIRA, 2011). Valores atualizados de acordo com a cotação do dólar.

De acordo com DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2011 para distâncias maiores que 20 km o transporte de resíduos para co-digestão se torna inviável. Portanto neste trabalho foram consideradas as distâncias de 2, 5, 10, 15 e 20 km para o cálculo dos custos com os resíduos.

## CUSTOS DA DEPRECIÇÃO DOS BENS

Os custos da depreciação dos bens foram calculados de acordo com a equação 4.17.

$$C_{depreciação} = \frac{\$inicial}{VU} \quad (4.17)$$

em que:

- $C_{depreciação}$  - Custo de depreciação, R\$ ano<sup>-1</sup>;
- $\$inicial$  - Valor inicial, R\$; e
- VU - Vida útil, anos.

Considerou-se uma vida útil de 20 anos para os equipamentos.

## ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA

O cálculo da energia elétrica produzida a partir do metano obtido dos resíduos foi dado pela equação 4.18.

$$EE = Pot_{elétrica} \times \Delta t \times 10^{-3} \quad (4.18)$$

em que:

- EE - Energia elétrica gerada com biometano, MWhano<sup>-1</sup>;  
Pot<sub>elétrica</sub> - Potência elétrica da usina, kW; e  
Δt - Tempo de operação da usina, h/ano<sup>-1</sup>.

## RECEITA COM A VENDA DE ENERGIA ELÉTRICA

O cálculo da receita obtida com a comercialização da energia elétrica é dada pela equação 4.19.

$$R_{CEE} = EE \times V\$_{EE} \quad (4.19)$$

em que:

- R<sub>CEE</sub> - Receita obtida com a comercialização da energia elétrica R\$ ano<sup>-1</sup>;  
EE - Energia elétrica produzida com biometano, MWh ano<sup>-1</sup>; e  
V\$<sub>EE</sub> - Valor pago pela eletricidade gerada com biometano, R\$ MWh<sup>-1</sup>.

## CUSTO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O cálculo do custo de produção de energia elétrica foi realizado de acordo com a equação 4.20.

$$\$C_{EE} = \frac{\$C_{cap.} + \$C_{oper.} + \$C_{Res.}}{EE_{produzida}} \quad (4.20)$$

em que:

$\$C_{EE}$	- Custo de produção de energia elétrica,	R\$ kWh <sup>-1</sup> ;
$\$C_{cap.}$	- Custo de capital anualizado,	R\$;
$\$C_{oper.}$	- Custo Operacional,	R\$;
$\$C_{Res.}$	- Custo com resíduos vegetais,	R\$; e
EE	- Energia elétrica gerada,	kWh.

Para o cálculo do nitrogênio (N), fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e potássio (K<sub>2</sub>O) contidos no biofertilizante foi considerado o valor desses nutrientes (massa de nutriente por massa de resíduo) para cada tipo de resíduos utilizados na codigestão.

O Quadro 4.7 fornece as quantidades dos nutrientes (N, P, K) para os resíduos agropecuários considerados neste trabalho.

Quadro 4.7 – Potencial de nutrientes nos resíduos

Resíduo	N (kg/kg de resíduo)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/kg de resíduos)	K <sub>2</sub> O (kg/kg de resíduo)	Referência
Suínos	0,00374	0,00329	0,00186	(SCHERER, et al., 1996)
Frangos	0,0295	0,0387	0,0110	(SEVERINO, et al., 2006)
Café	0,0170	0,00100	0,03200	(COSTA, et al., 2013)
Feijão	0,01000	0,00130	0,01630	(FIGUEIRO e GRACIOLLI, 2011)
Milho	0,00700	0,00110	0,00700	(FIGUEIRO e GRACIOLLI, 2011)
Bagaço de Cana	0,00024	0,00020	0,00011	(SEVERINO, et al., 2006)
Palha de Cana	0,00024	0,00020	0,00011	(SEVERINO, et al., 2006)

## RECEITA OBTIDA COM BIOFERTILIZANTE

Para o cálculo da produção de nitrogênio (N), fósforo ( $P_2O_5$ ) e potássio ( $K_2O$ ) foi considerado o valor desses nutrientes (massa de nutriente por massa de resíduo) para cada tipo de resíduos utilizados na codigestão.

A massa de nutrientes produzidas por ano com os resíduos da codigestão foi calculada de acordo com as equações 4.21, 4.22 e 4.23.

### NITROGÊNIO CONTIDO NO SUBSTRATO DA CODIGESTÃO

$$m_N = \sum m_{Res} \times N_{Res} \quad (4.21)$$

em que:

- $m_N$  - Massa total de nitrogênio nos resíduos,  $kg \text{ ano}^{-1}$ ;
- $m_{Res}$  - Massa de resíduo utilizada na codigestão,  $kg \text{ ano}^{-1}$ ; e
- $N_{Res}$  - concentração de nitrogênio nos resíduos,  $kg \text{ de N/kg de resíduo}$ .

### FÓSFORO CONTIDO NO SUBSTRATO DA CODIGESTÃO

$$m_P = \sum m_{Res} \times P_{Res} \quad (4.22)$$

em que:

- $m_P$  - massa total de fósforo nos resíduos,  $kg \text{ ano}^{-1}$ ;
- $m_{Res}$  - massa de resíduo utilizada na codigestão,  $kg \text{ ano}^{-1}$ ; e
- $P_{Res}$  - concentração de fósforo nos resíduos,  $kg \text{ de P/kg de resíduo}$ .

### POTÁSSIO CONTIDO NO SUBSTRATO DA CODIGESTÃO

$$m_K = \sum m_{Res} \times K_{Res} \quad (4.23)$$

em que:

- $m_K$  - massa total de potássio nos resíduos,  $\text{kg ano}^{-1}$ ;  
 $m_{\text{Res}}$  - massa de resíduo utilizada na codigestão,  $\text{kg ano}^{-1}$ ; e  
 $P_{\text{Res}}$  - concentração de potássio nos resíduos,  $\text{kg de P/kg de resíduo}$ .

A receita obtida com a comercialização do biofertilizante é dada pela equação 4.24.

$$R_{\text{Cbiof.}} = (m_N \times \$N) + (m_P \times \$P) + (m_K \times \$K) \quad (4.24)$$

em que:

- $R_{\text{Cbiof.}}$  - Receita da comercialização do biofertilizante,  $\text{R\$ ano}^{-1}$ ;  
 $m_N$  - Massa de nitrogênio nos resíduos,  $\text{kg ano}^{-1}$ ;  
 $\$N$  - Preço do nitrogênio,  $\text{R\$ kg}^{-1}$ ;  
 $m_P$  - Massa de fósforo nos resíduos,  $\text{kg ano}^{-1}$ ;  
 $\$P$  - Preço do fósforo,  $\text{R\$ kg}^{-1}$ ;  
 $m_K$  - Massa de potássio no resíduo,  $\text{kg ano}^{-1}$ ; e  
 $\$K$  - Preço do potássio,  $\text{R\$ kg}^{-1}$ ;

Os preços dos nutrientes considerados são mostrados no Quadro 4.8.

Quadro 4.8 – Preços nutrientes (N P K)

Nutriente	Preço (R\$/kg)
Nitrogênio (N)	1,84
Fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )	1,29
Potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ )	1,38

Fonte:(PANTALEO, *et al.*, 2013)

## EMISSÕES DE $\text{CO}_2$

O cálculo das emissões de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) evitadas ou Certificado de Emissões Reduzidas (CER) foi realizado considerando-se a produção de energia elétrica a partir do metano, o fator de emissão de  $\text{CO}_2$  (FEC) adotado nos cálculos foi de 0,414 t $\text{CO}_2$ eq./MWh (POESCHL *et al.*, 2010). A equação que fornece os

Certificados de Emissões Reduzidas (CER's) equivalentes com a geração de eletricidade é dada pela equação 4.25.

$$C_{ER} = EE \times F_{EC} \quad (4.25)$$

em que:

- $C_{ER}$  - Certificados de Emissões Reduzidas,  $tCO_2eq \text{ ano}^{-1}$ ;  
 $EE$  - Energia elétrica gerada,  $MWh \text{ ano}^{-1}$ ; e  
 $F_{EC}$  - Fator de Emissão de  $CO_2$ ,  $(0,414 tCO_2eq MWh^{-1})$ .

Devido o custo de transação de projetos de geração de créditos de carbono ser extremamente elevado a geração de receitas a partir dos Certificados de Emissões Reduzidas (CER) não foi considerada na análise econômica dos empreendimentos.

## DIMENSIONAMENTO DE CONDOMÍNIOS DE AGROENERGIA

A aplicação da ferramenta computacional SAUDADE para o dimensionamento de condomínios de agroenergia considerou dados referentes a localização das propriedades, o tipo de atividade pecuária desenvolvida e o número de animais existentes. Esses dados foram obtidos por meio dos órgãos oficiais e associações de produtores agropecuários. É proposta a construção de uma usina centralizada de geração de energia a partir do metano. A usina se localiza na propriedade que possui o maior número de animais.

As informações utilizadas para o dimensionamento dos condomínios de agroenergia são apresentadas no Quadro 4.9.

Quadro 4.9 – Informações para dimensionamento dos condomínios de agroenergia

Município	Nome da Propriedade	Coordenadas Geográficas		Número de animais
		Longitude	Latitude	

O que diferencia o funcionamento da ferramenta computacional para o dimensionamento de condomínios de agroenergia para o dimensionamento

individual é a questão do transporte dos resíduos. Em relação a esse ponto a ferramenta considera duas opções de transporte: dutos e estradas.

A seguir é apresentada a metodologia utilizada para o dimensionamento desses dois modais de transporte de resíduos.

## **DUTOS**

Os dutos podem ser utilizados para o transporte de resíduos ou de biometano, sendo denominados residuodutos ou gasodutos, respectivamente. Em ambos os casos a metodologia para o cálculo do comprimento da rede de dutos é a mesma sendo utilizado o programa ArcGIS da ESRI.

A tomada de decisão em um empreendimento como a construção de um duto para transporte de biometano ou resíduos agropecuários é um processo que envolve atores com vários interesses conflitantes. Dentre esses atores estão as equipes de engenharia, de gestão econômica, de gestão ambiental, órgãos de fiscalização ambiental, organizações não governamentais, proprietários de terras, etc. Para a execução do projeto a superfície de custo total deve valorar a questão geológica, ambiental, de engenharia, social e política.

Os *softwares* de sistemas de informações geográficas são adequados para a realização de análises espaciais auxiliando na tomada de decisões para determinação de traçados para dutos. O objetivo foi dimensionar um traçado preliminar dos dutos considerando-se a localização das propriedades pecuárias e a disponibilidade de resíduos. Para a determinação desse traçado utilizou-se o modelo digital de elevação da região e seu mapa de declividade com o objetivo de determinar o comprimento do duto e conseqüentemente seu custo de construção para a análise de viabilidade dos condomínios de agroenergia. Um dos principais fatores de risco para qualquer obra linear, como é o caso de um duto, é a declividade. Terrenos com grande inclinação aumentam em demasia os custos de construção. O mapa de declividade, elaborado em formato raster ou matricial serve de base para excluir áreas muito íngremes, nas quais os custos para implantação dos dutos são maiores. É importante destacar que o caminho de menor custo é o caminho de menor resistência e não o caminho mais curto. O uso do Sistema de

Informações Geográficas possibilitou definir o caminho de menor custo, considerando-se apenas o critério de declividade, entre uma origem e um destino (duas propriedades agropecuárias). O caminho de menor custo (melhor rota) foi obtido utilizando a ferramenta de análise do arcGIS *Least Cost Path*.

Para a definição do caminho de menor custo entre um ponto de origem e um ponto de destino em um mapa digital de elevação são necessários dois passos: (i) criação de uma superfície de custo; (ii) traçar o caminho de menor custo baseada no mapa de inclinação utilizando a superfície de custo (YU *et al.*, 2003).

A Figura 4.2 apresenta o fluxograma da geração do caminho de menor custo utilizando a ferramenta *Least Cost Path* do arcGIS.

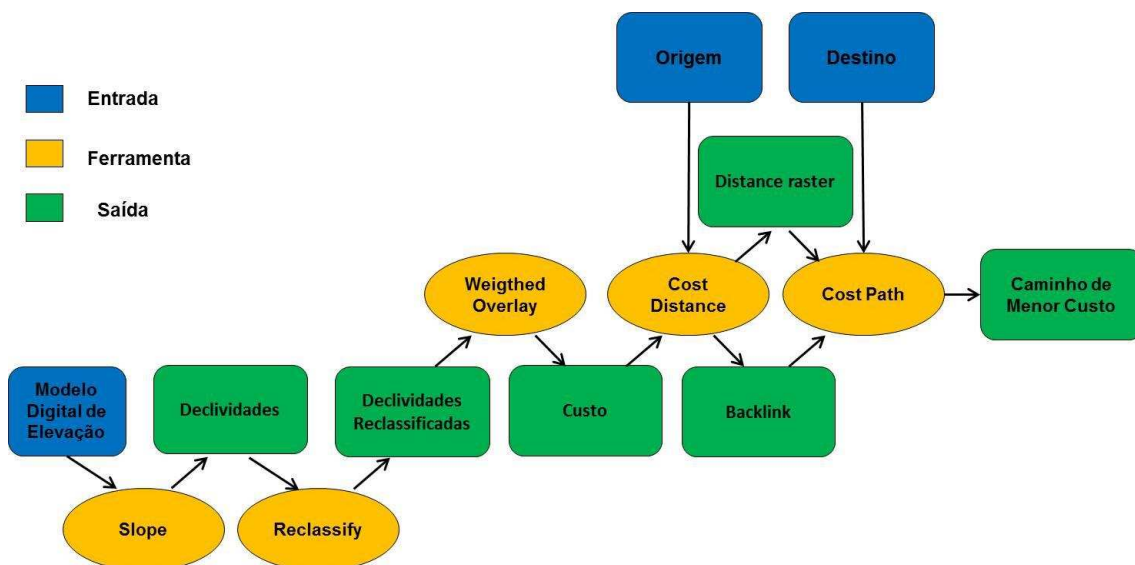


Figura 4.2 – Fluxograma representando a geração do caminho de menor custo para o duto.

A seguir foi realizada a conversão do caminho de menor custo do formato ráster para o formato shp por meio da ferramenta *Conversion Tools*, com isso a rota se converteu em pontos. Utilizando a ferramenta *Zonal Statistics as Table* foram obtidas informações da altitude dos pontos do traçado de menor custo, esses dados foram exportados para uma tabela. Com a ferramenta *Add XY Coordinates* foram definidas as coordenadas geográficas dos pontos do caminho de menor custo em UTM (metros) sendo essa informação salva na tabela de atributos. Ambas as tabelas foram salvas inicialmente no formato .txt e depois exportadas para o Excel.

A Figura 4.3 apresenta o fluxograma da utilização das ferramentas *Conversion Tools*, *Zonal Statistics as Table* e *Add XY Coordinates* do arcGIS.

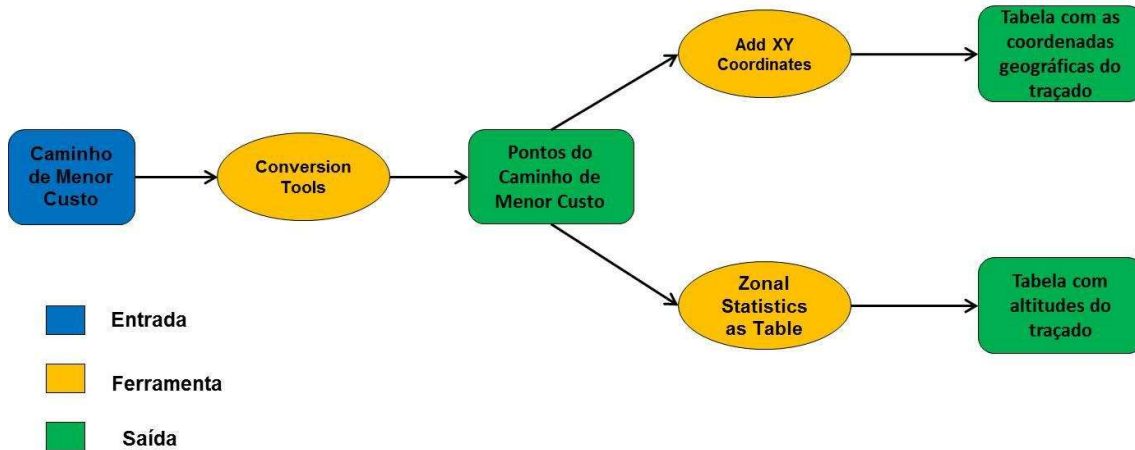


Figura 4.3 – Fluxograma representando a geração das tabelas de altitude e coordenadas geográficas do caminho de menor custo.

O cálculo do comprimento do duto para o transporte do biometano ou ou resíduo entre duas propriedades foi realizado considerando o somatório das distâncias entre dois pontos consecutivos desse traçado. Dessa forma a distância entre dois pontos consecutivos de um duto foi definida pela equação 4.26.

$$d_n = \sqrt{(XY)^2 + Z^2} \quad (4.26)$$

em que:

- $d_n$  - Distância entre dois pontos consecutivos, m;
- $XY$  - Distância horizontal entre dois pontos consecutivos, m; e
- $Z$  - Altitude entre dois pontos consecutivos, m.

A distância horizontal entre dois pontos consecutivos do caminho de menor custo foi calculada pela equação 4.27.

$$XY = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (4.27)$$

em que:

- $XY$  - Distância horizontal entre dois pontos consecutivos, m;
- $x_1$  - Longitude da propriedade 1, m;

- $x_2$  - Longitude da propriedade 2, m;
- $y_1$  - Latitude da propriedade 1, m; e
- $y_2$  - Latitude da propriedade 2, m;

O comprimento total do duto entre duas propriedades foi definido pela equação 4.28.

$$l = \sum_1^n d_1 + d_2 + \dots + d_n \quad (4.28)$$

em que:

- $l$  - Comprimento do duto entre duas propriedades, m; e
- $d_n$  - Comprimento do duto entre pontos consecutivos, m;

O comprimento total da rede de dutos do condomínio de energia foi definido pela equação 4.29.

$$L = \sum_1^m l_1 + l_2 + \dots + l_m \quad (4.29)$$

em que:

- $L$  - Comprimento total da rede de dutos do condomínio de energia, m;
- $l_m$  - Comprimento do duto entre duas propriedades, m.

A declividade entre os dois pontos foi dada pela equação 4.30.

$$D = \frac{Z}{XY} \quad (4.30)$$

em que:

- $D$  - Declividade, adimensional;
- $Z$  - Altitude entre dois pontos consecutivos, m; e
- $XY$  - Distância horizontal entre dois pontos consecutivos, m.

A declividade em graus foi dada pela equação 4.31.

$$D_{\text{graus}} = \text{arc tg } D \quad (4.31)$$

em que:

- $D_{\text{graus}}$  - Declividade em graus, graus;
- $D$  - Declividade, adimensional.

A declividade percentual foi calculada pela equação 4.32.

$$D_{\%} = 100 \times D \quad (4.32)$$

em que:

- D% - Declividade percentual, %; e  
D - Declividade adimensional.

O custo de construção do duto para o transporte de resíduos é considerado para fins de cálculo do investimento total no condomínio sendo dado pela equação 4.33.

$$C_{\$duto} = L \times \$_{unit} \quad (4.33)$$

em que:

- $C_{\$duto}$  - Custo total de construção do duto, R\$;  
L - Comprimento total do duto, m;  
 $\$_{unit}$  - Custo unitário do duto, R\$ m<sup>-1</sup>.

## CUSTO DOS DUTOS

O custo de construção dos dutos foram calculados considerando-se a cotação realizada com o *software* para Arquiterura, Ingeniería y Construcción produzido pela empresa CYPE Ingenieros.

## GASODUTO

O gasoduto foi dimensionado com tubo de politileno de alta densidade, de 40 mm de diâmetro externo, pressão nominal de 4 bar. No cálculo dos custos de construção por unidade de comprimento foram considerados os materiais de construção, com máquinas e mão-de-obra.

A Figura 4.4 apresenta uma imagem conceitual do gasoduto.

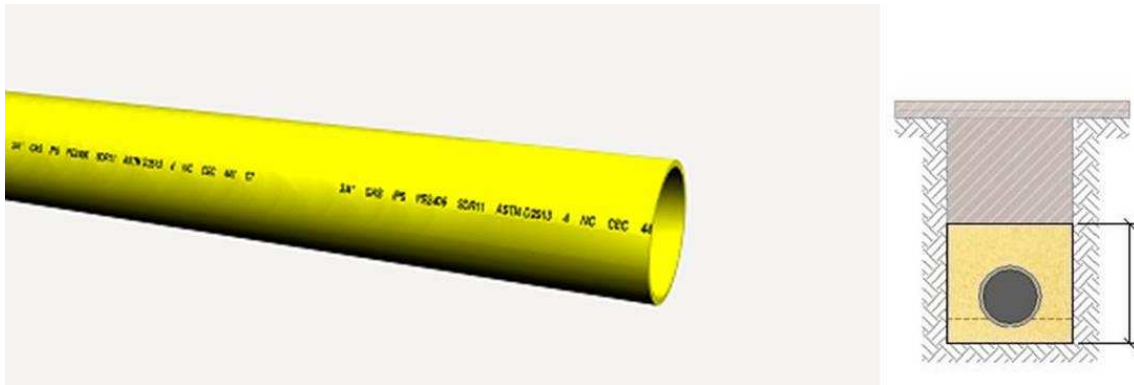


Figura 4.4 – Conceito do gasoduto.

Fonte: Software CYPE Ingenieros

## RESIDUODUTO

O residuoduto foi dimensionado com tubo de polipropileno (PP) para saneamento, com rigidez circunferencial nominal  $10 \text{ kN/m}^2$ , de parede tricamada, de 110 mm de diâmetro externo e 3,9 mm de espessura. No cálculo dos custos de construção por unidade de comprimento foram considerados os materiais de construção, com máquinas e mão-de-obra.

A Figura 4.5 apresenta uma imagem conceitual do residuoduto.



Figura 4.5 – Conceito do residuoduto.

Fonte: Software CYPE Ingenieros

O Quadro 4.10 apresenta o custo de construção para gasoduto e residuoduto em unidades de comprimento.

Quadro 4.10 – Custo de produção do gasoduto/residuoduto

Tipo de duto	Custo de Construção (R\$/m)
Gasoduto	47,26
Residuoduto	71,06

## ESTRADAS

A outra opção considerada para o transporte dos resíduos foi o uso de caminhões. Para a determinação da distância percorrida entre as propriedades foi utilizado o *software* Google Earth.

## DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO DA ROTA DE TRANSPORTE DOS RESÍDUOS

No dimensionamento do condomínio de agroenergia a usina de geração de energia se localiza na propriedade com o maior número de animais. Para determinar o comprimento do percurso realizado pelo caminhão foram introduzidas primeiramente as coordenadas geográficas (latitude e longitude) da propriedade com o maior número de animais no campo *Search* do Google Earth e clicado o botão pesquisar. Esse é o ponto para onde serão transportados todos os resíduos animais para a geração de metano por meio da digestão anaeróbia. Utilizando a função *Adicionar marcador* esse ponto deve ser identificado com o nome ou número da propriedade. A seguir foram introduzidas as coordenadas geográficas da segunda propriedade no campo *Search* e clica-se o botão pesquisar. Identifica-se o ponto com o nome ou número da propriedade utilizando-se a função *Adicionar marcador*. Clica-se o botão direito do “mouse” sobre o ponto referente à segunda propriedade e a seguir clica-se na função *Rota a partir daqui*. Em seguida clica-se o botão direito do “mouse” sobre o ponto referente à propriedade onde será instalada a usina de energia e a seguir clica-se na função *Rota para cá*. O *Google Earth* apresenta o

trajeto e o comprimento total do mesmo por estradas. Esses dados são exportados para uma planilha Microsoft Excel correspondente a esse trajeto onde constarão também a identificação das propriedades, a quantidade de animais, quantidade de resíduos transportados e o custo anual do transporte. Esse procedimento é repetido para todas as propriedades que constarão no condomínio de agroenergia.

O custo anual do transporte dos resíduos por meio de caminhões foi calculado de acordo com a equação 4.34.

$$C\$_{caminhões} = Q_{Res} \times c\$_{unit} \quad (4.34)$$

em que:

- $C\$_{caminhões}$  - Custo anual transporte por caminhões, R\$ ano<sup>-1</sup>;  
 $Q_{Res}$  - Quantidade de resíduos, m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> ou t ano<sup>-1</sup>; e  
 $c\$_{unit}$  - Custo unitário de transporte, R\$ (t km)<sup>-1</sup> ou R\$ (m<sup>3</sup> km)<sup>-1</sup>.

## ANÁLISE ECONÔMICA

### EMPRESTÍMO

Para fins de financiamento do empreendimento foram consideradas as seguintes linhas de financiamento:

(i) Programa Agricultura de Baixo Carbono (ABC)/BNDES: Esse programa visa promover a produção agrícola sustentável, por meio de processos tecnológicos e incentivos que garantam mais renda ao produtor e a proteção do meio ambiente. Uma das linhas de financiamento apoia o tratamento de resíduos animais que objetiva a redução dos gases de efeito estufa: gás carbônico (CO<sub>2</sub>), gás metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso. A taxa de financiamento é de 4,5% a.a, com carência de 5 anos e prazo de 10 anos.

(ii) Programa Fundo Clima/BNDES: Esse programa tem por objetivo apoiar investimentos em geração e distribuição local de energia renovável, no desenvolvimento tecnológico e na cadeia produtiva do setor de energias renováveis. É realizado financiamento de até 90% com taxa de 5,4% a.a. com carência de 8 anos e prazo de 16 anos.

Na avaliação do projeto calcularam-se as prestações por meio do Sistema de Acumulação Constante (SAC) que é dado pelo reembolso em quotas de amortização iguais. Dessa maneira, no sistema SAC as prestações são decrescentes, já que os juros diminuem a cada prestação. A amortização é calculada dividindo-se o valor do principal pelo número de períodos de pagamento (SAMANEZ, 2002).

## **FLUXO DE CAIXA**

Resume as entradas e saídas efetivas de dinheiro ao longo do horizonte de planejamento do projeto, permitindo desta maneira, conhecer a sua rentabilidade e viabilidade econômica.

Neste sentido os fluxos de caixa representam a renda econômica gerada pelo projeto ao longo de sua vida útil, ou seja, os ganhos que sejam superiores aos obtidos em qualquer outro investimento alternativo de igual risco. Fluxos de caixa não são sinônimos de lucro contábeis, pois não podem ocorrer mudanças no lucro sem que haja qualquer mudança correspondente nos fluxos de caixa (SAMANEZ, 2002).

## **VPL – VALOR PRESENTE LÍQUIDO**

Neste método se avalia as alternativas através de um valor representativo de fluxos de caixa (soma algébrica de valores de receitas e despesas) descontados e reduzidos no instante inicial (zero), segundo uma taxa de juros  $k$ , obtendo o valor atualizado dos custos e receitas de uma alternativa. O  $VPL > 0$  indica a viabilidade e as ações são ordenadas pela magnitude do VPL. O ordenamento resultante dependerá basicamente da taxa de desconto ( $k$ ) e da magnitude das necessidades de investimento que determinam o nível de VPL. Tem como finalidade valorar, em termos de valor presente, o impacto dos eventos futuros associados a um projeto ou alternativa de investimento, ou seja, mede o valor presente dos fluxos de caixa gerados pelo projeto ao longo da sua vida útil. Não existindo restrição de capital

argumenta-se que esse critério leva à escolha ótima, pois maximiza o valor da empresa (SAMANEZ, 2002).

A expressão geral do VPL do projeto de investimento é dada pela equação 4.35.

$$VPL = \sum FC_n \times \frac{1}{(1+i)^n} - I_0 \quad (4.35)$$

em que:

- VPL - Valor Presente Líquido, R\$;
- $FC_n$  - Fluxo de Caixa no período n, R\$;
- N - Período de análise do projeto, ano;
- i - Taxa de juros, adimensional; e
- $I_0$  - Investimento Inicial, R\$.

#### **TIR – TAXA INTERNA DE RETORNO**

A TIR exige descrição de cada alternativa de investimento em termos de custo e receita a ela associada, sendo a taxa que torna equivalente o investimento inicial ao fluxo de caixa subsequente, ou seja, torna nulo o VPL do projeto dentro de um período de tempo estipulado.

A expressão geral da TIR do projeto de investimento é dada pela equação 4.36.

$$0 = \sum FC_n \times \frac{1}{(1+TIR)^n} - I_0 \quad (4.36)$$

em que:

- $FC_n$  - Fluxo de Caixa no período n, R\$;
- n - Período de análise do projeto, ano;
- TIR - Taxa Interna de Retorno, adimensional;
- $I_0$  - Investimento Inicial, R\$.

## **PP – PERÍODO DE PAYBACK**

O Payback é o método mais utilizado na avaliação de projetos de orçamento de capital. Consiste em calcular o período necessário para que o valor investido seja recuperado.

### **CENÁRIOS:**

Os cenários devem ser definidos de acordo com as especificidades do projeto.

#### **4.2.4. APLICAÇÃO DA FERRAMENTA SAUDADE NO DIMENSIONAMENTO DO CONDOMÍNIO DE AGROENERGIA DE URUCÂNIA**

O município de Urucânia se localiza no norte da região da Zona da Mata de Minas Gerais. Possui uma população de 10.291 habitantes distribuídos em uma área de 139,182 km<sup>2</sup>. A Figura 4.6 mostra a localização do município de Urucânia na região da Zona da Mata.

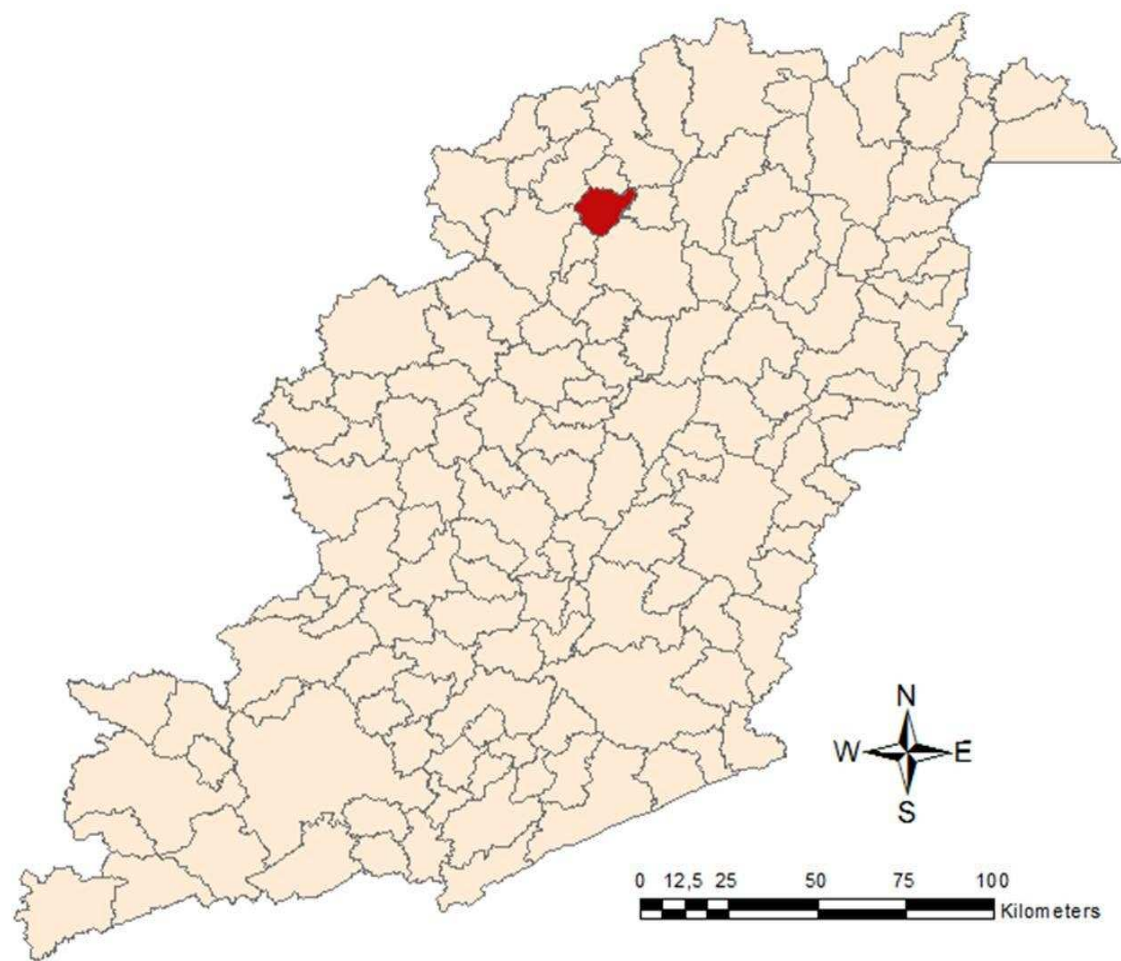


Figura 4.6 – Localização de Urucânia na Zona da Mata de Minas Gerais.

O Quadro 4.11 apresenta informações referentes a quantidade de granjas e rebanho efetivo de suínos do município de Urucânia.

Quadro 4.11 – Quantidade de granjas e rebanho efetivo do município

Município	Quantidade de granjas	Rebanho de suínos
Urucânia	26	155.966

Fonte: (IMA, 2013)

O Quadro 4.12 apresenta os dados da área plantada e produção dos cultivos de café, feijão, milho e cana-de-açúcar no município de Urucânia referentes ao ano de 2012.

Quadro 4.12 – Área plantada e produção de café, feijão, milho e cana-de-açúcar

Município	Cultivo							
	Café		Feijão		Milho		Cana	
	Área Plantada (ha)	Produção (t)	Área Plantada (ha)	Produção (t)	Área Plantada (ha)	Produção (t)	Área Plantada (ha)	Produção (t)
Urucânia	75	41	70	49	150	525	9.970	618.140

Fonte: (IBGE, 2014).

Os cenários simulados na ferramenta computacional SAUDADE para dimensionar o aproveitamento de resíduos agropecuários no condomínio de agroenergia de Urucânia consideraram: (i) o processo de conversão dos resíduos em biometano (sem codigestão e com codigestão); (ii) as fontes de financiamento (recursos próprios ou empréstimo); e (iii) a forma de comercialização (preço da energia elétrica nos leilões ou preço da energia elétrica praticados pelas concessionárias da região). O Quadro 4.13 mostra os cenários que foram simulados:

Quadro 4.13 – Cenários simulados

<b>SEM CODIGESTÃO</b>		
CENÁRIO	FINANCIAMENTO	COMERCIALIZAÇÃO
1	Recursos Próprios	Energia Elétrica Leilões
2	Empréstimo	Energia Elétrica Leilões
3	Recursos Próprios	Energia Elétrica Concessionária
4	Empréstimo	Energia Elétrica Concessionária
5	Recursos Próprios	Energia Elétrica Leilões+Biofertilizante
6	Empréstimo	Energia Elétrica Leilões+Biofertilizante
7	Recursos Próprios	Energia Elétrica Concessionária+Biofertilizante
8	Empréstimo	Energia Elétrica Concessionária+Biofertilizante
<b>COM CODIGESTÃO</b>		
CENÁRIO	FINANCIAMENTO	COMERCIALIZAÇÃO
9	Recursos Próprios	Energia Elétrica Leilões
10	Empréstimo	Energia Elétrica Leilões

11	Recursos Próprios	Energia Elétrica Concessionária
12	Empréstimo	Energia Elétrica Concessionária
13	Recursos Próprios	Energia Elétrica Leilões+Biofertilizante
14	Empréstimo	Energia Elétrica Leilões+Biofertilizante
15	Recursos Próprios	Energia Elétrica Concessionária+Biofertilizante
16	Empréstimo	Energia Elétrica Concessionária+Biofertilizante

---

### 4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.3.1. GRANJAS DO CONDOMÍNIO DE AGROENERGIA DE URUCÂNIA

A seguir são apresentados os resultados e realizada a discussão sobre o condomínio de agroenergia de Urucânia.

O Quadro 4.14 apresenta as granjas do município de Urucânia e suas respectivas quantidades de suínos e produção de dejetos.

Quadro 4.14 – Granjas e suas respectivas quantidades de suínos e produção de dejetos no município de Urucânia

Granja	Quantidade de suínos	Dejetos (t ano <sup>-1</sup> )
UR-1	26.632	69.575,77
UR-2	24.215	63.261,38
UR-3	22.000	57.474,73
UR-4	20.030	52.328,12
UR-5	9.023	23.572,47
UR-6	8.800	22.989,89
UR-7	7.106	18.564,34
UR-8	6.375	16.654,61
UR-9	5.756	15.037,48
UR-10	5.500	14.368,68
UR-11	3.754	9.807,28
UR-12	3.470	9.065,33
UR-13	2.002	5.230,20
UR-14	2.000	5.224,98
UR-15	1.903	4.971,56
UR-16	1.900	4.963,73
UR-17	1.699	4.438,62
UR-18	972	2.539,34
UR-19	559	1.460,38
UR-20	521	1.361,11
UR-21	441	1.152,11
UR-22	406	1.060,67
UR-23	300	783,75
UR-24	236	616,55
UR-25	201	525,11
UR-26	165	431,06
Total	155.966	407.459,25

A carga poluidora dos dejetos de suínos no município de Urucânia equivale a produzida por uma cidade de aproximadamente 500 mil habitantes (FLEMING e FORD, 2001).

A Figura 4.7 apresenta a localização das granjas no município de Urucânia.

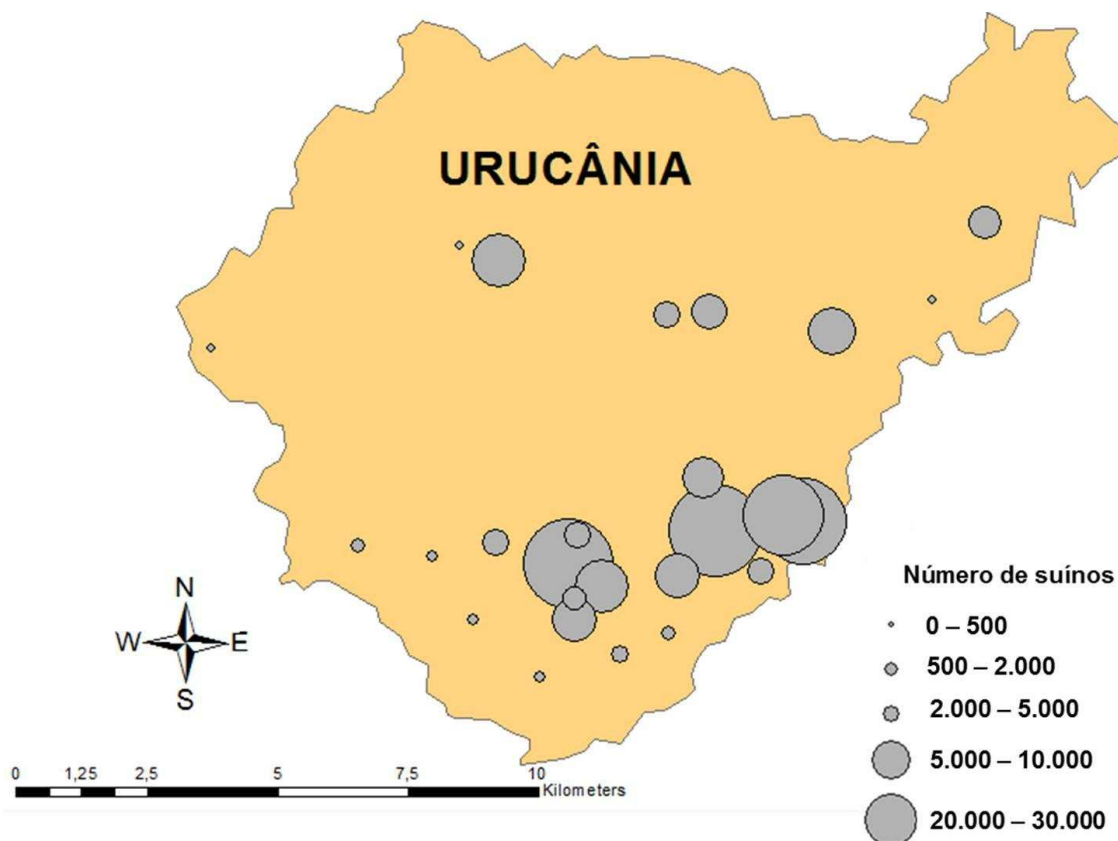


Figura 4.7 – Localização das granjas de suínos no município de Urucânia.

Na região sul do município de Urucânia se concentra 83,56% do seu rebanho efetivo de suínos.

#### **4.3.2. RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS DISPONÍVEIS NO MUNICÍPIO DE URUCÂNIA**

O Quadro 4.15 apresenta a massa de resíduos vegetais disponível no município de Urucânia.

Quadro 4.15 – Resíduos de cultivos vegetais disponíveis no município de Urucânia

Município	café (t ano <sup>-1</sup> )	feijão (t ano <sup>-1</sup> )	milho (t ano <sup>-1</sup> )	bagaço de cana (t ano <sup>-1</sup> )	palha de cana (t ano <sup>-1</sup> )
Urucânia	30,6	77,1	63,9	35.892,0	52.342,5

No município está instalada a Usina Jatiboca, que possui uma capacidade de produção de 1 milhão de sacas de açúcar e 32 milhões de litros de álcool por ano. O que justifica a grande quantidade de resíduos do cultivo da cana-de-açúcar.

#### 4.3.3. PRODUÇÃO DE BIOMETANO E ENERGIA NO CONDOMÍNIO DE URUCÂNIA

A Figura 4.8 apresenta a produção de biometano por substrato, considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos suínos para o Condomínio de Agroenergia de Urucânia.

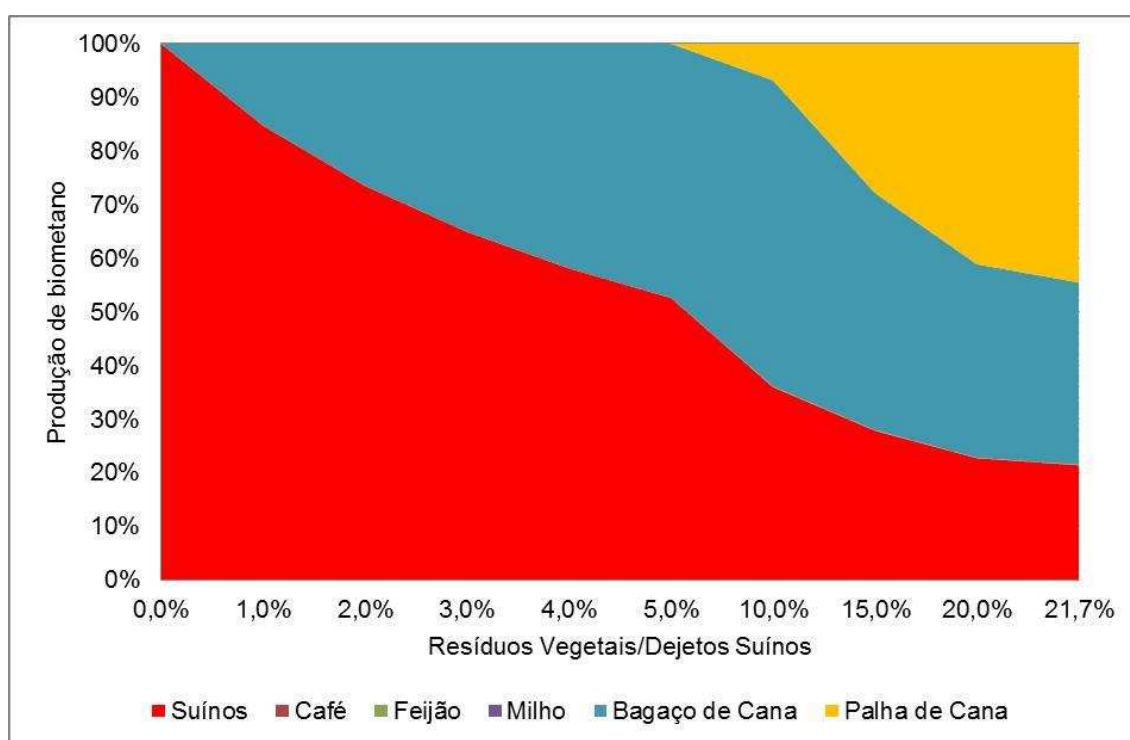


Figura 4.8 – Produção de biometano por substrato.

Os resíduos da cana-de-açúcar (bagaço e palha) respondem por 78,5% da produção de biometano para a porcentagem máxima de mistura resíduos vegetais e dejetos suínos.

A Figura 4.9 apresenta a produção de biometano e a respectiva potência elétrica gerada.

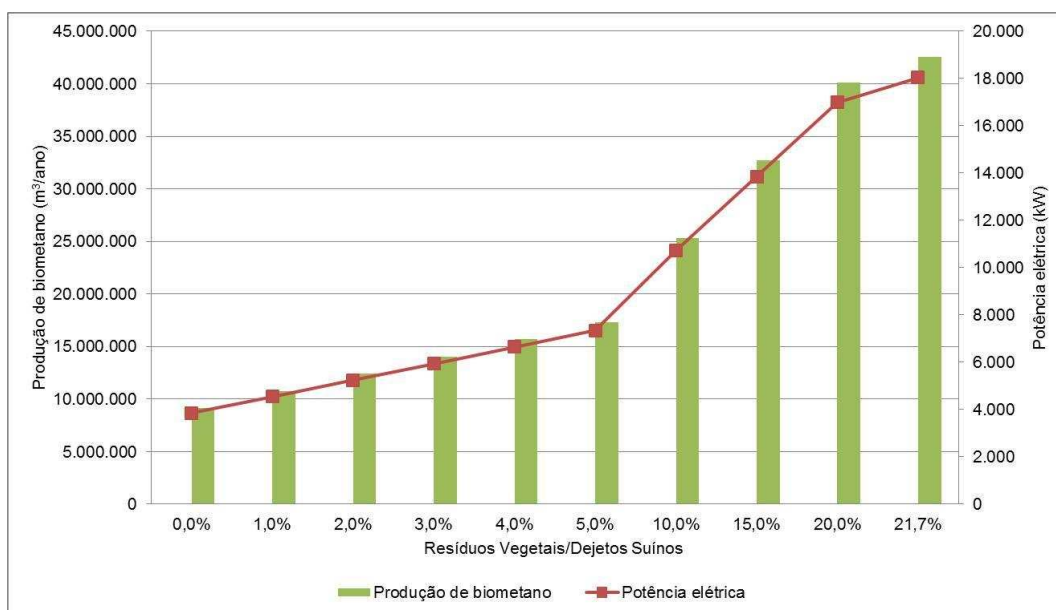


Figura 4.9 – Produção de biometano e potência elétrica.

A produção de biometano a partir dos resíduos agropecuários disponíveis chega a 42.579.576 m<sup>3</sup>/ano e a potência elétrica disponível é de 18,03 MW.

A Figura 4.10 apresenta a energia elétrica produzida considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos suínos para o Condomínio de Agroenergia de Urucânia.

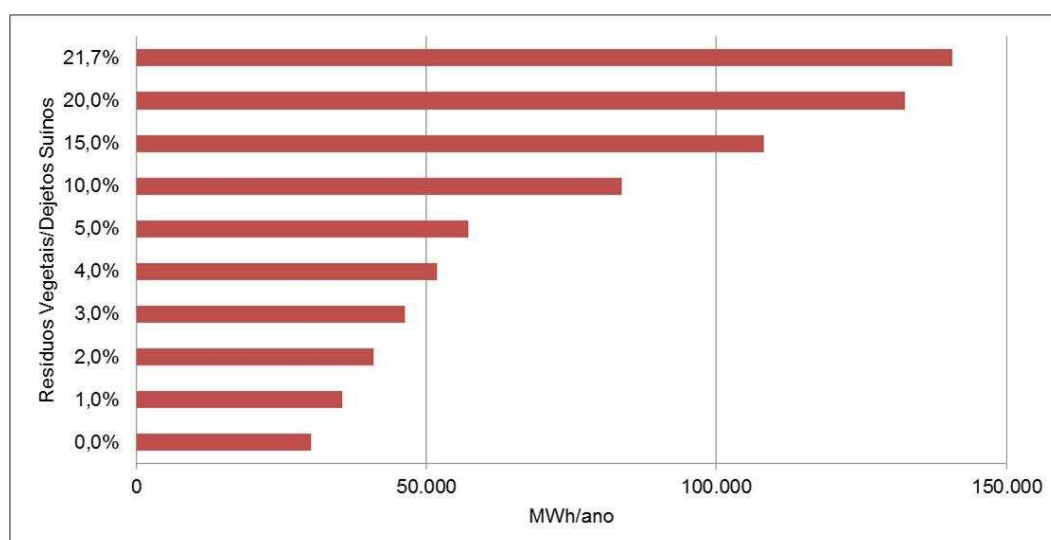


Figura 4.10 – Energia elétrica produzida.

Considerando-se o consumo de energia per capita em países da OCDE e no Brasil, a energia elétrica produzida a partir dos resíduos agropecuários do município de Urucânia é capaz de atender a 17.091 e 53.681 pessoas, respectivamente (IEA, 2014; EPE, 2014).

#### 4.3.4. PRODUÇÃO DE BIOFERTILIZANTE NO CONDOMÍNIO DE AGROENERGIA DE URUCÂNIA

A Figura 4.11 apresenta a massa de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) contida no digestato dos resíduos agropecuários no Condomínio de Agroenergia de Urucânia.

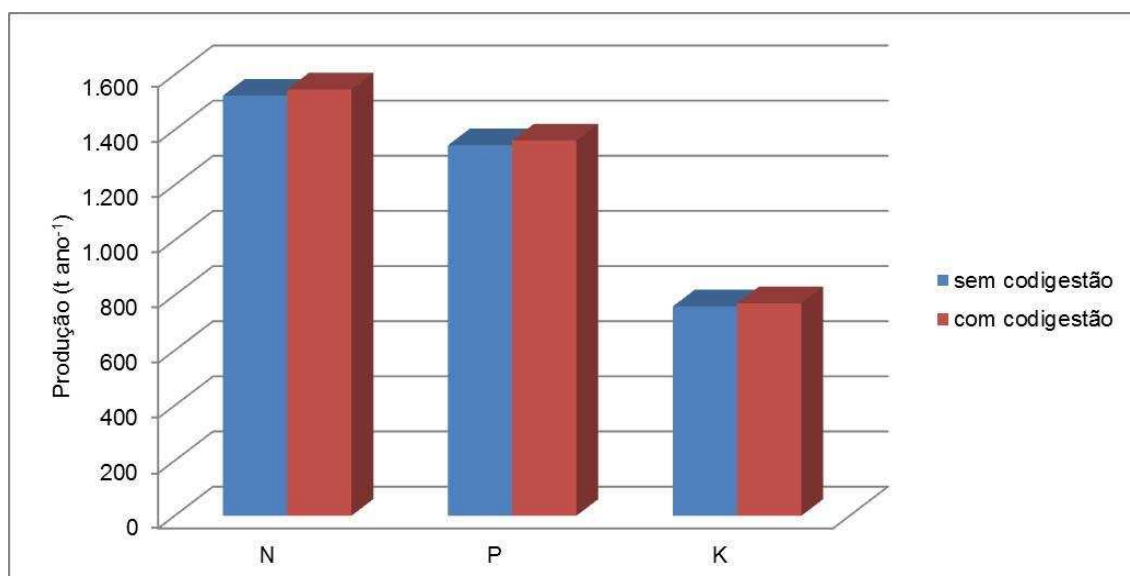


Figura 4.11 – Produção de biofertilizante no Condomínio de Agroenergia de Urucânia.

A codigestão não contribui significativamente para aumentar a produção de biofertilizante. O aumento na produção de Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) é de 1,47%, 1,33% e 1,50%, respectivamente.

O aproveitamento do biofertilizante produzido a partir dos resíduos agropecuários implica na redução do uso de combustíveis fósseis como o gás natural e o carvão mineral para a produção de fertilizantes. A produção de um

quilograma de uréia (fertilizante nitrogenado) implica no consumo de 26.973 quilocalorias (MENDES JÚNIOR, 2011).

#### 4.3.5. MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> NO CONDOMÍNIO DE AGROENERGIA DE URUCÂNIA

A Figura 4.12 apresenta o potencial de toneladas de dióxido de carbono que podem ser mitigadas com a geração de energia elétrica a partir da codigestão dos resíduos agropecuários no Condomínio de Agroenergia de Urucânia.

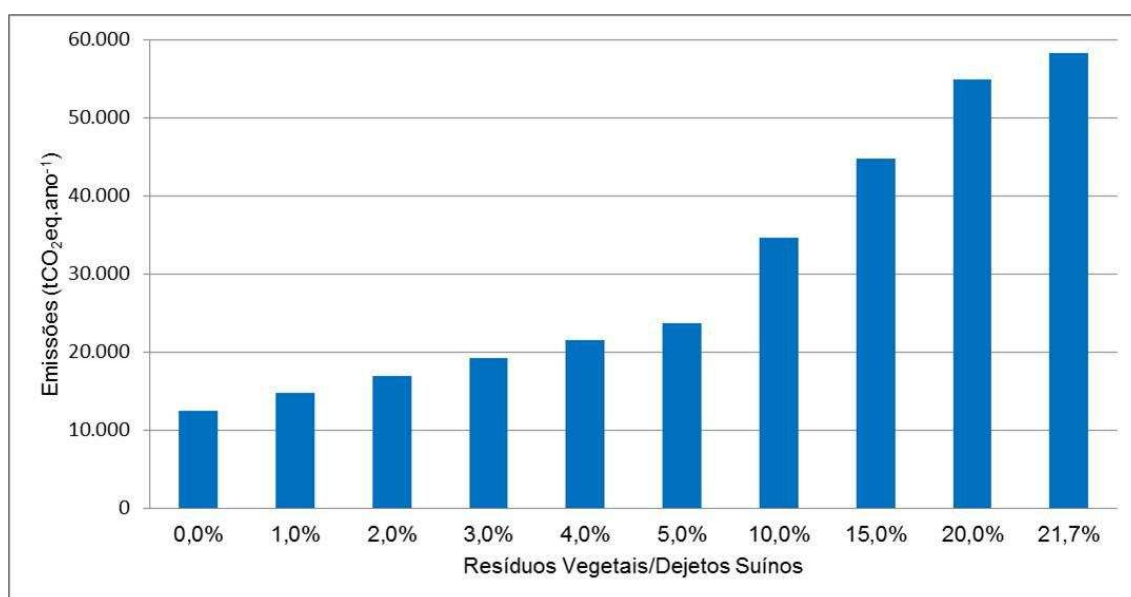


Figura 4.12 – Potencial de mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>.

O total de toneladas de CO<sub>2</sub> mitigadas com o aproveitamento energético dos resíduos agropecuários no condomínio de agroenergia de Urucânia chega a 58.233 tCO<sub>2</sub>eq./ano. Para fins de comparação um automóvel a gasolina em uma viagem de ida e volta de Viçosa a Belo Horizonte emite 0,128 tCO<sub>2</sub>eq (CARVALHO, 2011).

#### 4.3.6. TRANSPORTE DE BIOMETANO E DE RESÍDUOS POR DUTOS E POR ESTRADAS

## **GASODUTO/RESIDUODUTO**

O comprimento total do duto para conectar as 26 granjas de suínos do Condomínio Urucânia é de 44.044 metros. O Quadro 4.13 apresenta o comprimento de cada um dos dutos dimensionados para o condomínio.

Quadro 4.16 – Comprimento dos dutos dimensionados para o Condomínio de Agroenergia de Urucânia

Duto	Comprimento (m)
1	2.141
2	2.123
3	2.780
4	1.040
5	3.636
6	874
7	4.238
8	1.975
9	521
10	1.419
11	1.207
12	1.345
13	1.501
14	6.614
15	1.480
16	2.037
17	1.348
18	1.521
19	641
20	1.441
21	372
22	1.738
23	1.151
24	903
Total	44.044

A Figura 4.13 apresenta a rotas traçada pelos dutos no território do município de Urucânia.



Figura 4.13 – Traçado dos dutos no município de Urucânia.

## **ESTRADAS**

O comprimento das rotas de transporte dos resíduos suínos por estradas (desde as granjas até a central de geração de energia) no município de Urucânia é mostrado no Quadro 4.17.

Quadro 4.17 – Comprimento das rotas de transporte dos resíduos de suínos por estradas

Rota	Distância (km)
1	2,9
2	2,2
3	1,1
4	3,7
5	12,3
6	12,4
7	3,9
8	1,2
9	1,5
10	10,2
11	16,1
12	7,1
13	2,4
14	3,2
15	2,7
16	11,5
17	3,2
18	8,9
19	5,5
20	8,9
21	14,1
22	19,1
23	13,5
Total	167,6

#### 4.3.7. ANÁLISE ECONÔMICA

A Figura 4.14 apresenta os custos de produção de energia elétrica considerando: (i) transporte do biometano por gasoduto; (ii) o transporte dos resíduos por residuoduto; e (iii) o transporte dos resíduos por estradas comparados com o valor pago nos leilões de eletricidade da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e os preços de comercialização da energia praticados pelas concessionárias da região.

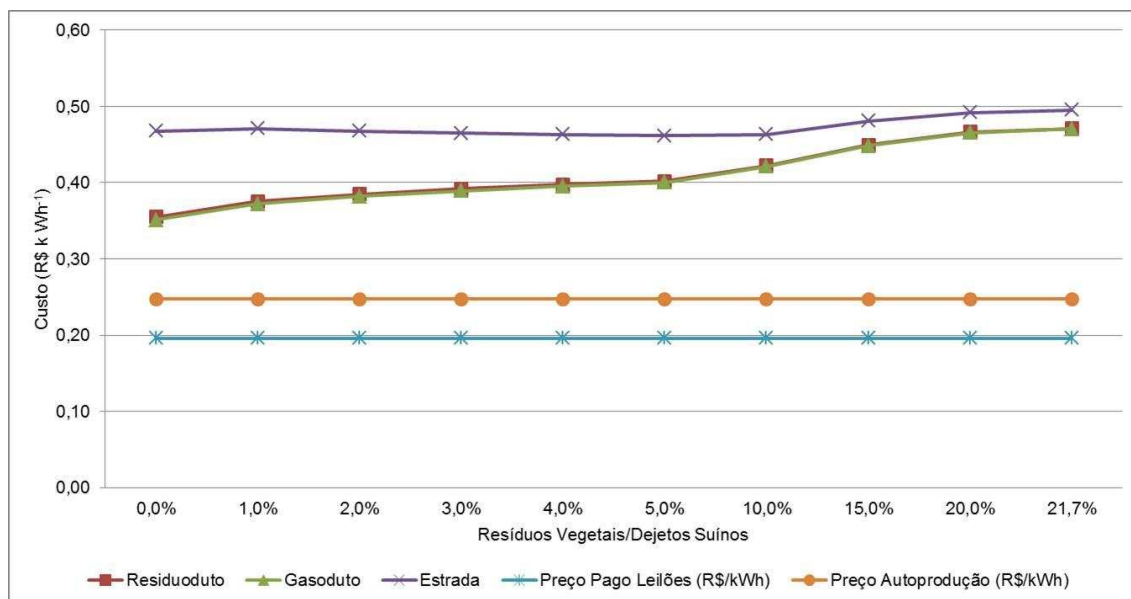


Figura 4.14 – Custo de produção de energia elétrica para diferentes modais de transporte no Condomínio de Agroenergia de Urucânia.

O custo da produção de energia elétrica com a codigestão aumenta de acordo com a adição de resíduos vegetais no substrato. O preço pago pela energia gerada a partir do biometano de resíduos agropecuários nos leilões e os praticados pelas concessionárias na região são menores que os custos de produção dos três modais de transporte (residuoduto, gasoduto e estrada). O custo de produção no modal gasoduto é menor que o dos modais residuoduto e estrada.

Na Alemanha, país em que a capacidade instalada a partir do biogás é de 4 GW, o valor pago pelo MWh gerado é de R\$ 467,41 (EEG, 2014).

### VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)

A Figura 4.15 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 1 a 8 em que ocorre o aproveitamento apenas de dejetos de suínos (sem codigestão).

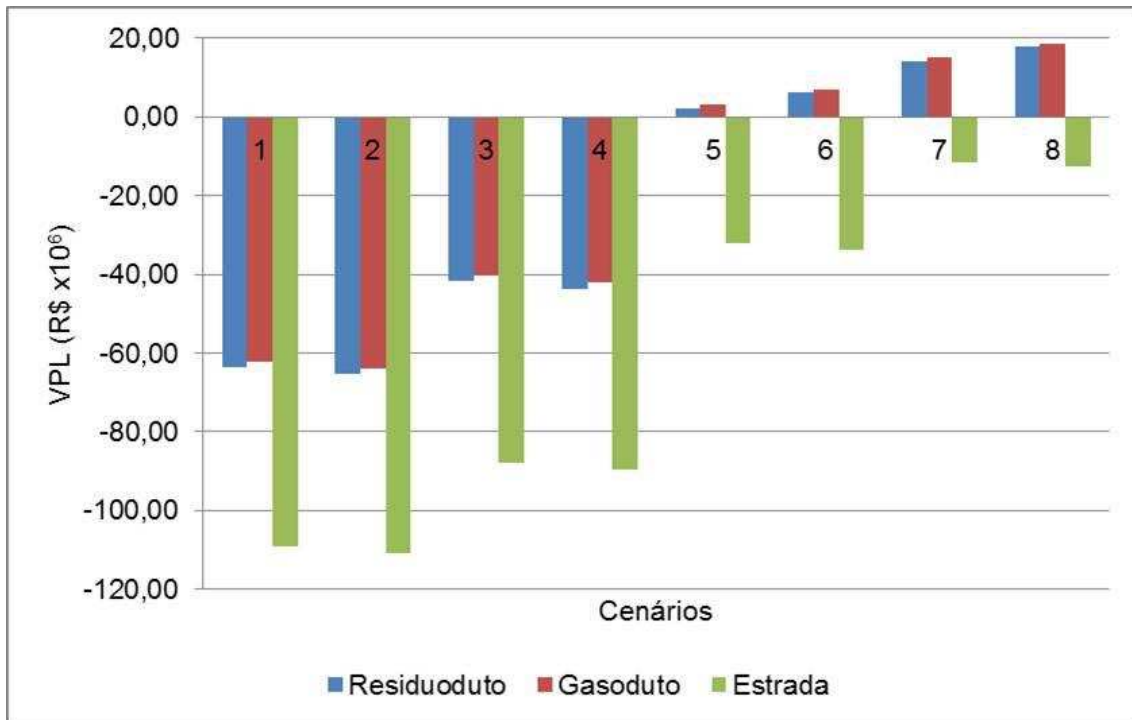


Figura 4.15 – VPL para os cenários sem codigestão.

No caso do aproveitamento apenas dos resíduos da suinocultura (sem codigestão), são viáveis apenas os cenários 5, 6, 7 e 8 para os modais de transporte por residuoduto e gasoduto. Isso reflete o fato de que a valoração da energia gerada a partir do biometano estar bem abaixo dos custos de produção.

A Figura 4.16 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 1%.

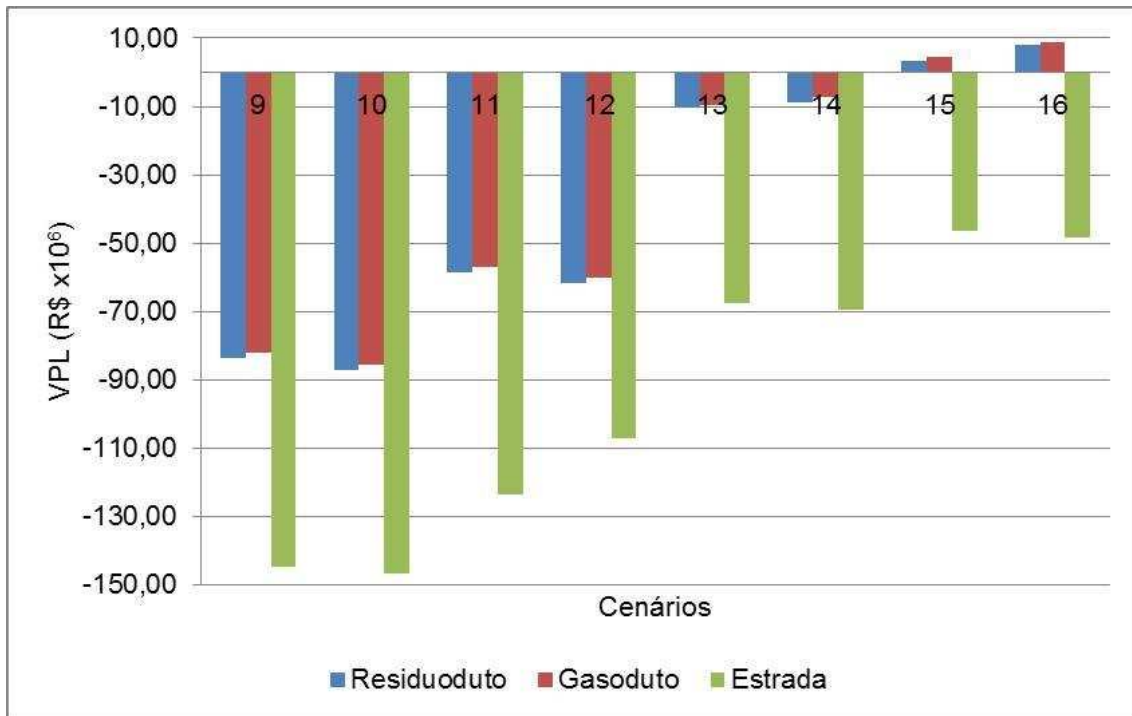


Figura 4.16 – VPL para os cenários de codigestão com 1% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.

A codigestão com 1% de resíduos vegetais implica na adição de uma massa de 4.075 t ano<sup>-1</sup> no substrato. O aumento da produção de biometano é de 18%, mas esse aumento não compensa os gastos com o transporte dos resíduos vegetais. Apenas os cenários 15 e 16 para os modais residuoduto e gasoduto são viáveis.

A Figura 4.17 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 2,0%.

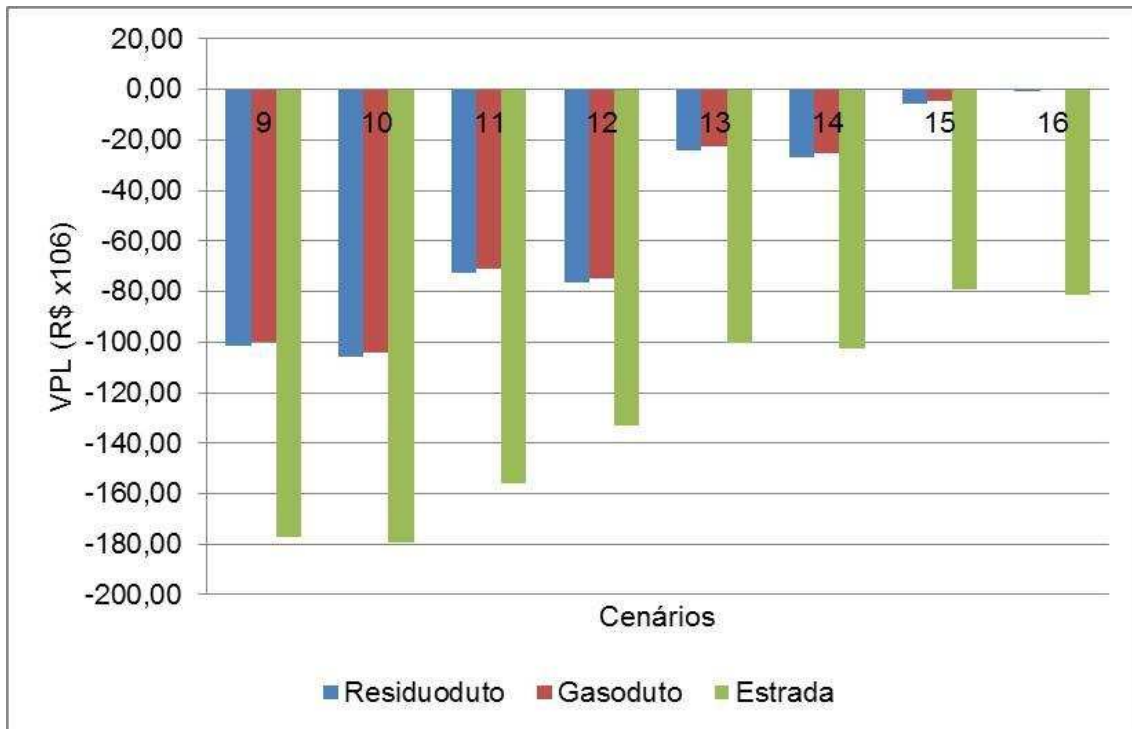


Figura 4.17 – VPL para os cenários de codigestão com 2,0% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.

A codigestão com 2% de resíduos vegetais implica na adição de uma massa de 8.149 t ano<sup>-1</sup> no substrato. O aumento da produção de biometano é de 36%. Apenas o cenário 16 para o modal gasoduto é viável.

A Figura 4.18 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 3,0%.

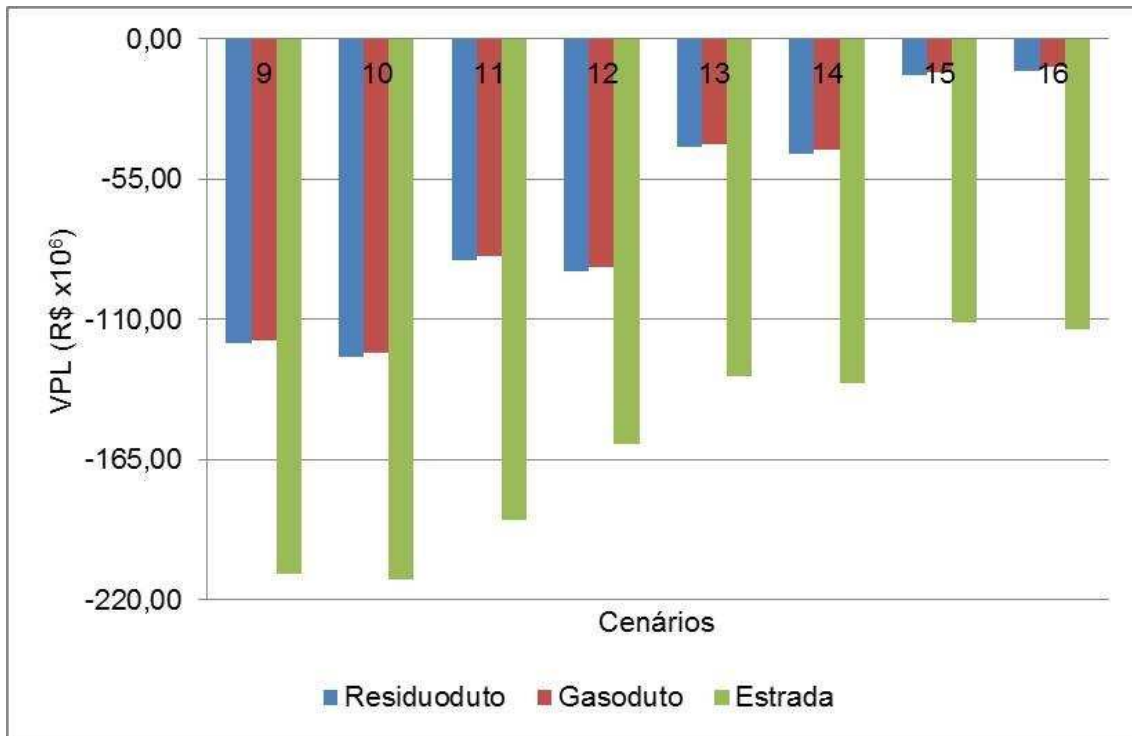


Figura 4.18 – VPL para os cenários de codigestão com 3,0% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.

Não há viabilidade econômica em nenhum dos cenários simulados com codigestão para razão resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 3%.

A Figura 4.19 apresenta o aumento na produção de biometano com a codigestão considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos suínos para o Condomínio de Agroenergia de Urucânia.

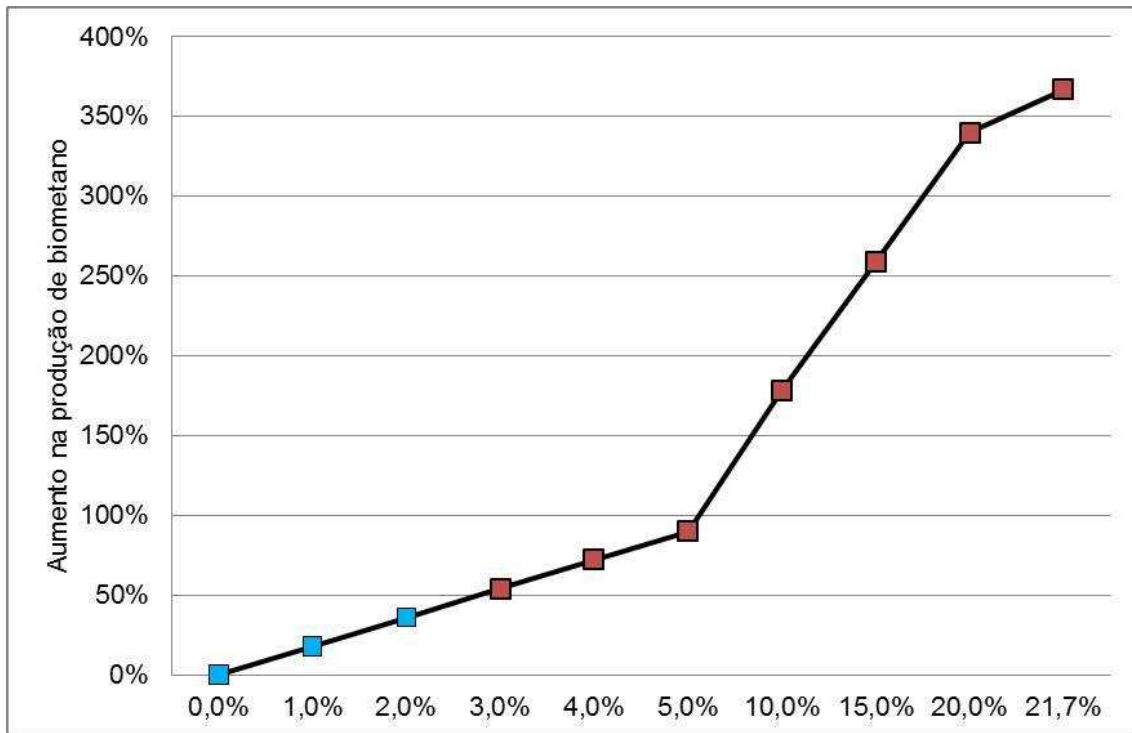


Figura 4.19 – Aumento na produção de biometano com a codigestão.

O aumento percentual da produção de biometano com a codigestão chega a 367%. No entanto a codigestão só é viável para as razões resíduos vegetais/dejetos suínos de 1% e 2%. Para as demais razões resíduos vegetais/dejetos suínos todos os cenários são inviáveis economicamente.

#### 4.4. CONCLUSÃO

A ferramenta SAUDADE se apresenta como uma alternativa para avaliar o potencial de geração de biometano por meio da codigestão anaeróbia de quaisquer resíduos agropecuários. A ferramenta relaciona banco de dados da produção agropecuária, geração de resíduos com sistema de informações geográficas (SIG), podendo ser aplicada para uma determinada região e utilizada no auxílio à tomada de decisões de investimento. A ferramenta pode ser utilizada para: (i) calcular os resíduos agropecuários (animal e vegetal) produzidos a nível municipal e regional; (ii) calcular o potencial de geração de biometano a partir da codigestão de resíduos agropecuários; (iii) calcular o potencial de geração de energia elétrica produzida a partir do biometano; (iv) calcular o potencial de produção de biofertilizante a partir do digestato resultante do processo de codigestão; (v) calcular o potencial de Certificado de Emissões Reduzidas (CER) de dióxido de carbono (tCO<sub>2</sub> eq.); (vi) dimensionar o aproveitamento energético do biometano a nível de granja; (vii) dimensionar condomínios de agroenergia para granjas de um determinado município e/ou região; (viii) apresentar os indicadores de viabilidade econômica dos empreendimentos dimensionados.

No estudo de caso foi realizado o dimensionamento de condomínio de agroenergia no município de Urucânia na Zona da Mata de Minas Gerais. Estimou-se uma potência elétrica gerada a partir do biometano obtido com os dejetos de suínos e resíduos vegetais da ordem de 18 MW, no entanto para a maioria dos cenários simulados o empreendimento se mostrou inviável economicamente. Os resultados obtidos apontam para a necessidade imperiosa de políticas públicas de incentivo à geração de energia a partir da conversão de resíduos agropecuários em biometano.

#### 4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa nº 482/2012. 21 p. 2011.

BORGES NETO, M. R., CARVALHO, P. C. M. (2009). Planejamento energético rural assistido por computador. Eng. Agríc. Vol.29 (2): 172-184.

BUDZIANOWSKI, W. M. (2012). Sustainable biogas energy in Poland: Prospects and challenges, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 16 (1): 342-349.

CARVALHO, C. H. R. Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros. IPEA: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília, abril de 2011.

COSTA, R. S. C., TOWNSEND, C. R., LEÔNIDAS, F. C. Diversas utilidades da casca de café. Informe Tecnológico No. 43 Embrapa Rondônia, 2002. (Consulta em: 11/2013).

DE PAOLI, F., BAUER, A., LEONHARTSBERGER, C., AMON, B., AMON, T. (2011). Utilization of by-products from ethanol production as substrate for biogas production, Bioresource Technology, Vol 102 (11): 6621-6624.

DELIVAND, M. K., BARZ, M., GHEEWALA, S. H. (2011). Logistic cost analysis of rice straw for biomass power generation in Thailand. Energy, Vol.36: 1435-1441.

DEUBLEIN, D., STEINHAUSER, A. (2011). Biogas From Waste and Renewable Resources: an Introduction. Second, revised and expanded edition. Weinheim: Wiley-VCH.

EEG, 2014 – Lei Alemã de Energias Renováveis. Disponível em: [https://www.clearingstelle-eeeg.de/files/EEG\\_2014\\_141222.pdf](https://www.clearingstelle-eeeg.de/files/EEG_2014_141222.pdf). (Consulta em: 04/2015).

EL-KHATTAM, W.; SALAMA, M.M.A. (2004). Distributed generation technologies, definitions and benefits. Electric Power Systems Research, Vol 71: 119-128.

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). Balanço Energético Nacional 2012 - Resultados [www.epe.gov.br/](http://www.epe.gov.br/) (Consulta em: 06/2014).

FERREIRA, M., MARQUES, I. P., MALICO, I. (2012). Biogas in Portugal: Status and public policies in a European context, Energy Policy, Vol 43: 267-274.

FIGUEIRO, G. G., GRACIOLLI, L. A. (2011). Influência da composição química do substrato no cultivo de *Pleurotus florida*. Ciência e Agrotecnologia. Vol.35 (5): 924-930.

FISCHER, E., SCHMIDT, T., HORA, S., GIERSDORF, J., STINNER, W., SCHOLWIN, F. (2010). Agro-industrial biogas in Kenya, Potentials, Estimates for Tariffs, Policy and Business Recommendations. Federal Ministry of Economics and Technology, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).

IBGE, 2014. Pesquisa Agrícola Municipal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pam/default.asp?o=28&i=P>, (consultado em: SET 2014).

IMA - Instituto Mineiro de Agropecuária (IMA), Cadastro de Suinocultores 2013.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY (IEA), Key World Energy Statistics, Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2013.pdf>, (Consulta em: 08/2014).

KARELLAS, S., BOUKIS, I., KONTOPOULOS, G. (2010). Development of an investment decision tool for biogas production from agricultural waste, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 14 (4): 1273-1282.

KTBL, 2014. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. <http://daten.ktbl.de/euagrobiogasbasis/startSeite.do;jsessionid=B9227F8151EE276102038F7038DC3710?selectedAction=start> . (Consulta em: 09/2014).

KUMAR, A., CAMERON, J. B., FLYNN, P. C. (2003). Biomass power cost and optimum plant size in western Canada. Biomass & Bioenergy, Vol. 24: 445-464.

LORA, E. E. S.; Haddad, J. (2006). Geração Distribuída. Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais. Rio de Janeiro, RJ. Editora Interciência.

MAPEMBA, L. D., EPPLIN, F. M., HUHNE, R. L., TALIAFERRO, C. M. (2008). Herbaceous plant biomass harvest and delivery cost with harvest segmented by month and number of harvest machines endogenously determined. Biomass and Bioenergy, Vol. 32: 1016-1027.

MARTINS, F.M.; OLIVEIRA, P.A.V. (2011). Análise econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás na suinocultura. Revista Engenharia Agrícola. Jaboticabal, Vol.31 (3): 477-486.

MENDES JÚNIOR, A.P. Participação da energia fóssil na produção dos fertilizantes industriais nitrogenados com ênfase na uréia. Botucatu/SP: UNESP, 2011. (Dissertação – Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura).

OLIVEIRA, P.A.V. Projeto de Biodigestor e Estimativa da Produção de Biogás e, Sistemas de Produção, EMBRAPA Comunicado Técnico 417. Dez 2005.

OLIVEIRA, L. G. S. Aproveitamento energético de resíduos agrícolas – O caso da agroeletricidade distribuída. 2011. 282p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro.

ORRICO JUNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A., LUCAS JUNIOR, J. (2011) Produção animal e o meio ambiente: uma comparação entre potencial de emissão de metano dos dejetos e a quantidade de alimento produzido. Eng. Agríc. Vol.31 (2): 399-410.

PANTALEO, A., DE GENNARO, B., SHAH, N. (2013). Assessment of optimal size of anaerobic co-digestion plants: An application to cattle farms in the province of Bari (Italy), Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 20: 57-70.

PEPERMANS, G.; DRIESEN, J.; HAESLONCKX, D.; BLEMMAS, R.; D'HAESELEER, W. (2005). Distributed Generation: definition, benefits and issues. Energy Policy, Vol 33: 787-798.

PETERSSON, A., THOMSEN, M. H., HAUGGAARD-NIELSEN, H., THOMSEN, A. B. (2007). Potential bioethanol and biogas production using lignocellulosic biomass from winter rye, oilseed rape and faba bean, *Biomass and Bioenergy*, Vo 31 (11-12): 812-819.

POESCHL, M., WARD, S., OWENDE, P. Prospects for expanded utilization of biogas in Germany, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 14, Issue 7, September 2010, Pages 1782-1797.

RAVULA, P. P., GRISSO, R. D., CUNDIFF, J. S. (2008). Comparison between two policy strategies for scheduling trucks in a biomass logistic system. *Bioresource Technology*, Vol. 99: 5710-5721.

RESOURCE DYNAMICS CORPORATION, Assessment of Distributed Generation Technology Applications, Vienna, VA, USA, February 2001, Disponível em: [www.distributed-generation.com](http://www.distributed-generation.com), (Consulta em: 04/2015).

SAMANEZ, C.P. (2002) *Matemática Financeira – Aplicações à Análise de Investimentos*. 3ª Edição. Editora Pearson/Prentice Hall.

SCHERER, E.E.; AITA, C.; BALDISSERA, I.T. Avaliação da qualidade do esterco líquido de suínos da região Oeste Catarinense para fins de utilização como fertilizante. Florianópolis: EPAGRI, 1996, 46 p. (EPAGRI. Boletim Técnico, 79).

SEVERINO, L.S.; LIMA, R.L.S.; BELTRÃO, N.E.M. *Composição Química de Onze Materiais Orgânicos Utilizados em Substratos para Produção de Mudas*. MAPA. Campina Grande, 2006.

SILVA, L. C.; QUEIROZ, D. M.; FLORES, R. A. (2006). Estimativa de custos operacionais em unidades armazenadoras de grãos por meio de simulação. *Revista Brasileira de Armazenamento*, Viçosa, MG, Vol. 31: 1-7.

SOKHANSANJ, S.; KUMAR, A.; TURHOLLOW, A. F. (2006). Development and implementation of integrated biomass supply analysis and logistic model (IBSAL). *Biomass and Bioenergy*, Vol. 30: 838-847.

SULTANA, A., KUMAR, A., HARFIELD, D. (2010). Development of agri-pellet production cost and optimum size. *Bioresource Technology*, Vol. 101: 5609-5621.

[www.cype.com](http://www.cype.com)

YU, C., LEE, J., MUNRO-STASIUK, M. J. (2003) – Extensions to least-cost path algorithms for roadway planning – *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 17 (4): 361 – 376.

## **CAPÍTULO 5**

**INSERÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA GERADA COM  
O BIOMETANO PRODUZIDO A PARTIR DE  
RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS NA ZONA DA MATA  
DE MINAS GERAIS**

## **RESUMO:**

A Zona da Mata de Minas Gerais possui uma quantidade expressiva de empreendimentos de geração hidrelétrica na modalidade Pequena Central Hidrelétrica (PCH) que alteram significativamente os aspectos físicos, econômicos e sócio-espaciais da região, sem necessariamente auferir benefícios para a população local. As cadeias produtivas de frango de corte e suínos possuem forte presença na região e os dejetos oriundos destas atividades geram um grande impacto no meio ambiente. A produção de biometano a partir dos resíduos agropecuários se apresenta como uma alternativa para a geração de energia elétrica. O objetivo deste trabalho foi estimar o potencial de produção de energia a partir dos resíduos agropecuários e seus impactos na matriz energética da região. A estimativa da potência elétrica gerada com a codigestão de resíduos da suinocultura e da avicultura com resíduos vegetais correspondem a 32,67% e 26,68% da capacidade hidrelétrica instalada na região, respectivamente.

**Palavras-Chave:** suinocultura, avicultura, desenvolvimento rural sustentável.

## 5.1. INTRODUÇÃO

### 5.1.1. GERAÇÃO DE HIDRELETRICIDADE NA ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS

A Zona da Mata de Minas Gerais possui uma quantidade expressiva de empreendimentos de geração hidrelétrica na modalidade Pequena Central Hidrelétrica (PCH). Segundo a Resolução nº 394/1998 da ANEEL, PCH é toda usina hidrelétrica de pequeno porte cuja capacidade instalada seja superior a 1 MW e inferior a 30 MW e que possui reservatório com área inferior a 3 km<sup>2</sup>. Os principais argumentos utilizados para justificar a construção de PCHs são de que as mesmas provocam menor impacto ambiental do que as grandes usinas hidrelétricas e termelétricas, promovem o progresso e de que são portadoras de uma solidariedade universal. A geração hidrelétrica, mesmo por meio de PCHs, pode alterar significativamente os aspectos físicos, econômicos e sócio-espaciais, sem necessariamente auferir benefícios para a população local. Os municípios recebem o ônus direto da implantação desses empreendimentos, sem receber necessariamente o bônus ou contrapartidas da operação (PAULA *et al.*, 2013).

O Quadro 5.1 mostra as PCHs implantadas na região da Zona da Mata de Minas Gerais.

Quadro 5.1 – Pequenas Centrais Hidrelétricas instaladas na região da Zona da Mata de Minas Gerais e suas respectivas potências.

Microrregião	Município	Potência (kW)
Cataguases	Leopoldina	29.232
	Santos Dumont	1.680
		5.400
	Santa Rita de Jacutinga	4.440
		8.400
	Juiz de Fora	4.000
Juiz de Fora	Rio Preto	9.540
	Matias Barbosa	4.080
	Piau	18.012
	Descoberto/Guarani	24.400
	Lima Duarte	2.340

Ponte Nova	Ponte Nova	2.900
	Abre Campo	15.930
Manhuaçu	Manhuaçu/Reduto	1.416
	Manhuaçu	9.000
	Muriaé	5.040
		22.700
Muriaé	Tombos	2.880
	Carangola	15.000
	Caiana	4.500
	Astolfo Dutra	24.400
Ubá	Astolfo Dutra/Guarani	8.000
	Guarani	12.480
Viçosa	Ervália/Guiricema	6.970
	Total	242.740

FONTE: (ANEEL, 2014)

Muitos municípios em que estão instaladas as PCHs não possuem características econômicas ou populacionais de grandes consumidores de energia. O setor da economia que geralmente apresenta maior demanda de energia é o da indústria. O município de Abre Campo, por exemplo, possui uma população de 13.311 habitantes e o seu PIB é formado majoritariamente pelos setores de serviços e agropecuário com participação de 79,84% no PIB total. Outro município, Astolfo Dutra, possui uma população de 13.840 habitantes e uma economia cujo setor de serviços responde por 50,24% do seu PIB (IBGE, 2014).

Para os empreendedores do ramo energético, no entanto, as PCHs são extremamente vantajosas, pois estão dispensadas de remunerar estados e municípios pelo uso dos recursos hídricos, somado ao fato de que para empreendimentos anteriores a 2003 não há nem mesmo o pagamento das taxas pelo uso das redes de transmissão e distribuição do sistema de eletrificação. Essa rentabilidade é uma das justificativas da proliferação das PCHs na região e pelo país.

### 5.1.2. ENERGIA E DESENVOLVIMENTO

A energia é fator fundamental para qualquer atividade econômica e no decorrer do século XX observou-se a relação entre o aumento do consumo de energia e o desenvolvimento econômico (WARR e AYRES, 2010). O atendimento das necessidades humanas básicas está diretamente relacionado à oferta de energia. A falta de acesso a serviços energéticos prejudica a saúde, limita as oportunidades para a educação, compromete o desenvolvimento impedindo que uma população saia da pobreza. O aumento do consumo de energia tem sido relacionado à melhoria do bem-estar das pessoas, tendo reflexos sobre o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) (OUEDRAOGO, 2013).

Nos países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), o consumo per capita de energia elétrica no ano de 2011 foi de 8,23 MWh/habitante (IEA, 2014). No Brasil e em Minas Gerais, o consumo per capita de eletricidade no ano de 2011 foi de 2,48 MWh/habitante e 2,67 MWh/habitante, respectivamente (EPE, 2014; CEMIG, 2012).

O Quadro 5.2 abaixo mostra o consumo de energia per capita nas microrregiões da Zona da Mata de Minas Gerais.

Quadro 5.2 – Consumo de energia per capita nas microrregiões da Zona da Mata de Minas Gerais, ano 2012

Microrregião	Consumo de Energia (MWh/ano)	População (hab)	Consumo de Energia Elétrica per capita (MWh/hab)
Cataguases	421.239	217.985	1,93
Juiz de Fora	746.986	738.328	1,01
Manhuaçu	281.674	277.362	1,02
Muriae	258.038	278.176	0,93
Ponte Nova	101.986	181.264	0,56
Ubá	436.236	273.881	1,59
Viçosa	142.491	222.542	0,64
	2.388.650	2.189.538	1,09

Fonte: (IBGE, 2014); (CEMIG, 2014); (ENERGISA, 2014).

A Figura 5.1 mostra os consumos per capita de eletricidade para os países da OCDE, Brasil, Minas Gerais e Zona da Mata.

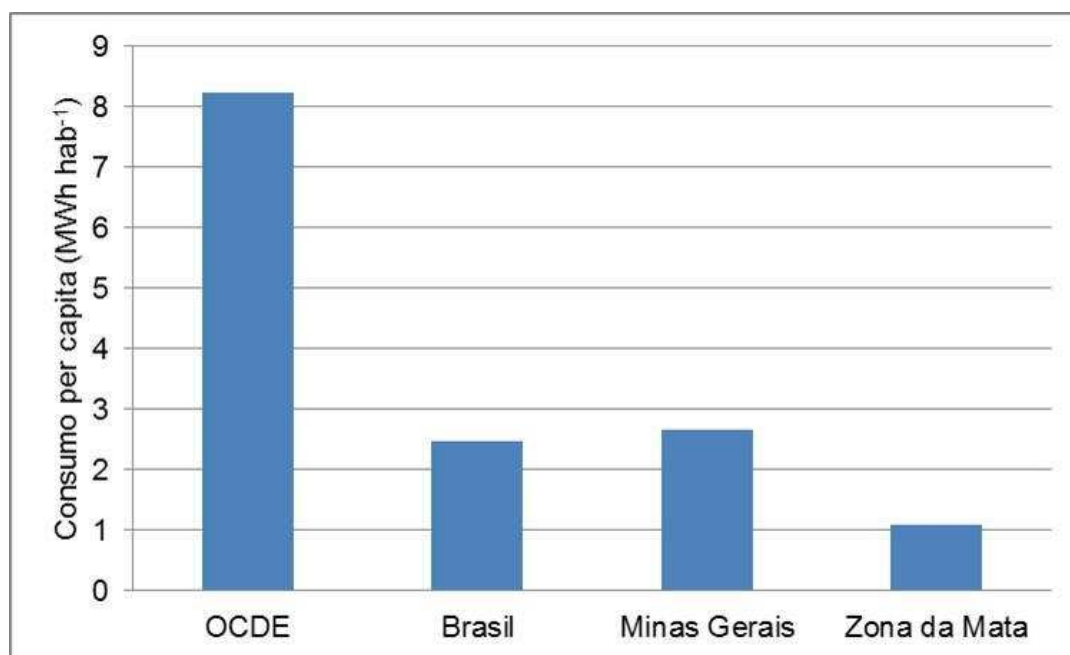


Figura 5.1 – Consumo per capita de eletricidade referente ao ano de 2011.

Fonte: (IEA, 2014); (EPE, 2014) e (CEMIG, 2012).

O Quadro 5.3 mostra o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) para os municípios da região da Zona da Mata. O IDHM adequa a metodologia do IDH global ao contexto brasileiro considerando os indicadores de longevidade, educação e renda (SCARPIN e SLOMSKI, 2007).

Quadro 5.3 – Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) para os municípios da Zona da Mata de Minas Gerais, ano 2013.

Classificação	Total de Municípios	%
Alto Desenvolvimento Humano	26	18,31
Médio Desenvolvimento Humano	110	77,46
Baixo Desenvolvimento Humano	6	4,23

Faixas IDHM

Muito alto desenvolvimento humano – 0,800 a 1

Alto desenvolvimento humano – 0,700 a 0,799

Médio desenvolvimento humano – 0,600 a 0,699

Baixo desenvolvimento humano – 0,500 a 0,599

Muito baixo desenvolvimento humano – 0 a 0,499

Fonte: (PNUD, 2013).

### 5.1.3. CULTIVOS AGRÍCOLAS NA ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS

A agropecuária na região é tradicional e voltada majoritariamente para o atendimento do mercado local/regional, com exceção dos segmentos da cafeicultura, suinocultura e avicultura (NETTO e DINIZ, 2005). Dentre os cultivos agrícolas se destacam, além do café, o feijão, o milho e a cana de açúcar.

O Quadro 5.4 mostra a área plantada e a produção dos principais cultivos agrícolas da Zona da Mata e a participação percentual da produção em relação ao estado de Minas Gerais e Brasil.

Quadro 5.4 – Área plantada e produção de café, feijão, milho e cana-de-açúcar, ano de 2012

Microrregião	Cultivo							
	Café		Feijão		Milho		Cana	
	Área Plantada (ha)	Produção (t)	Área Plantada (ha)	Produção (t)	Área Plantada (ha)	Produção (t)	Área Plantada (ha)	Produção (t)
Cataguases	335	550	615	554	2.260	8.701	1.196	81.920
Juiz de Fora	255	373	3.348	2.196	4.928	16.648	1.488	94.990
Manhuaçu	113.355	149.078	8.210	7.114	11.645	43.871	299	11.661
Muriaé	49.973	58.259	6.209	4.141	6.070	19.250	1.639	79.745
Ponte Nova	18.803	22.660	4.012	3.154	10.450	41.937	24.599	1.729.968
Ubá	1.395	1.903	2.293	2.022	5.865	25.182	2.430	170.725
Viçosa	21.553	27.030	12.328	10.901	20.366	76.186	3.087	194.743
Total	205.669	259.853	37.015	30.082	61.584	231.775	34.738	2.363.752
% Produção de Minas Gerais	16,28		4,75		3,04		3,35	
% Produção do Brasil	8,55		1,08		0,33		0,33	

Fonte: (IBGE, 2014a).

### 5.1.4. SUINOCULTURA NA ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS

A Zona da Mata se destaca como o segundo maior polo de suinocultura do estado de Minas Gerais com 21,18% do rebanho efetivo, atrás somente da mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (ABIPECS, 2012).

O Quadro 5.5 mostra o rebanho efetivo de suínos da Zona da Mata e a participação percentual em relação ao estado de Minas Gerais e Brasil.

Quadro 5.5 – Rebanho efetivo de suínos da Zona da Mata de Minas Gerais, ano de 2012.

Microrregião	Rebanho Efetivo (número de cabeças)
Cataguases	62.934
Juiz de Fora	82.305
Manhuaçu	46.302
Muriaé	32.791
Ponte Nova	724.145
Ubá	34.244
Viçosa	109.416
Total	1.092.137
% Rebanho Efetivo de Minas Gerais	21,18
% Rebanho Efetivo do Brasil	2,82

Fonte: (IBGE, 2014b).

A microrregião de Ponte Nova possui um rebanho efetivo que corresponde a 66,3% do total de suínos da Zona da Mata de Minas Gerais. Os municípios desta microrregião compõem o Polo Suinocultor do Vale do Piranga que é considerado um dos principais polos de suinocultura independente do país sendo o quinto maior produtor e exportador nacional de carne suína (ABIPECS, 2012). Na região existe a Cooperativa dos Suinocultores de Ponte Nova e Região (Coosuioponte) e a Associação dos Suinocultores do Vale do Piranga (Assuvap) cujos objetivos são desenvolver a atividade e apoiar a gestão eficiente do setor. A atividade se destaca na região pela tecnificação das granjas e pela posição geográfica estratégica, com fácil acesso rodoviário a grandes centros consumidores do País e a pontos de escoamento da produção, como Belo Horizonte, Juiz de Fora, Vitória e Rio de Janeiro. Existe na região um frigorífico pertencente a 43 “produtores-acionistas” que comercializa a carne suína em Minas Gerais, Espírito Santo, Brasília, Rio de Janeiro, interior de São Paulo, Nordeste e mercado externo (CRITT, 2003).

### 5.1.5. AVICULTURA NA ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS

A região da Zona da Mata é o quarto maior polo de avicultura de corte de Minas Gerais com 11% do rebanho efetivo do estado, atrás somente das mesorregiões Central, Triângulo Mineiro e Centro Oeste.

O Quadro 5.6 mostra o rebanho efetivo de frangos da Zona da Mata e a participação percentual em relação ao estado de Minas Gerais e Brasil.

Quadro 5.6 – Rebanho efetivo de frangos da Zona da Mata de Minas Gerais, ano de 2012.

Microrregião	Rebanho Efetivo (número de cabeças)
Cataguases	389.187
Juiz de Fora	538.650
Manhuaçu	177.939
Muriaé	220.885
Ponte Nova	641.241
Ubá	3.552.771
Viçosa	5.224.391
Total	10.765.064
% Rebanho Efetivo de Minas Gerais	11,41
% Rebanho Efetivo do Brasil	1,04

Fonte: (IBGE, 2014b).

As microrregiões de Viçosa e Ubá concentram a maior parte do rebanho efetivo da Zona da Mata de Minas Gerais com 48,53% e 33,00%, respectivamente.

### 5.1.6. IMPACTOS AMBIENTAIS DA SUINOCULTURA E AVICULTURA

A produção de dejetos oriundos das atividades suinícola e avícola consiste em um grande problema ambiental que causam danos à saúde humana e animal (ABOUELENIEN, *et al.*, 2014; RIAÑO e GARCÍA-GONZÁLEZ, 2015). O manejo inadequado desses dejetos provoca a poluição causando a contaminação dos rios e lençóis de água superficiais que abastecem tanto o meio rural como o urbano e acarretando desequilíbrios ecológicos, disseminação de patógenos e contaminação das águas potáveis com amônia, nitratos e outros elementos tóxicos. Outro tipo de

poluição associada a essas atividades é o odor desagradável dos dejetos. Isto se deve a evaporação dos compostos voláteis, que são prejudiciais ao homem e animais. Os compostos voláteis mais nocivos e comuns nos dejetos são: amônia, metano, ácidos graxos voláteis, H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub>O, etanol, propanol, dimetil sulfidro e carbono sulfidro. Além dos prejuízos à saúde do homem e animais alguns desses gases contribuem para o aquecimento global (DIESEL, *et al.* 2002; COOLS *et al.*, 2001; OLIVEIRA, *et al.*, 2003). O fato da produção de suínos e frangos se concentrar em polos regionais como a Zona da Mata de Minas Gerais e a falta de recursos dos pequenos produtores para introduzirem soluções tecnológicas avançadas de preservação do meio ambiente agravam os impactos ambientais.

Uma alternativa para mitigar os danos ambientais, aumentar a competitividade das cadeias produtivas e a oferta de energia a nível regional é o aproveitamento energético e como biofertilizante dos dejetos animais e resíduos de cultivos vegetais. A codigestão aneróbia é o processo que permite a conversão de resíduos em biometano sendo utilizada em várias partes do mundo na gestão de resíduos agropecuários.

#### **5.1.7. ENERGIA NA AGROPECUÁRIA DA ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS**

De acordo com o Censo Agropecuário do ano de 2006, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o número de estabelecimentos rurais que geram sua própria eletricidade na Zona da Mata de Minas Gerais é de 664 (0,94% do total).

A Figura 5.2 apresenta o número de estabelecimentos que realizam a geração da energia elétrica que consomem por fontes.

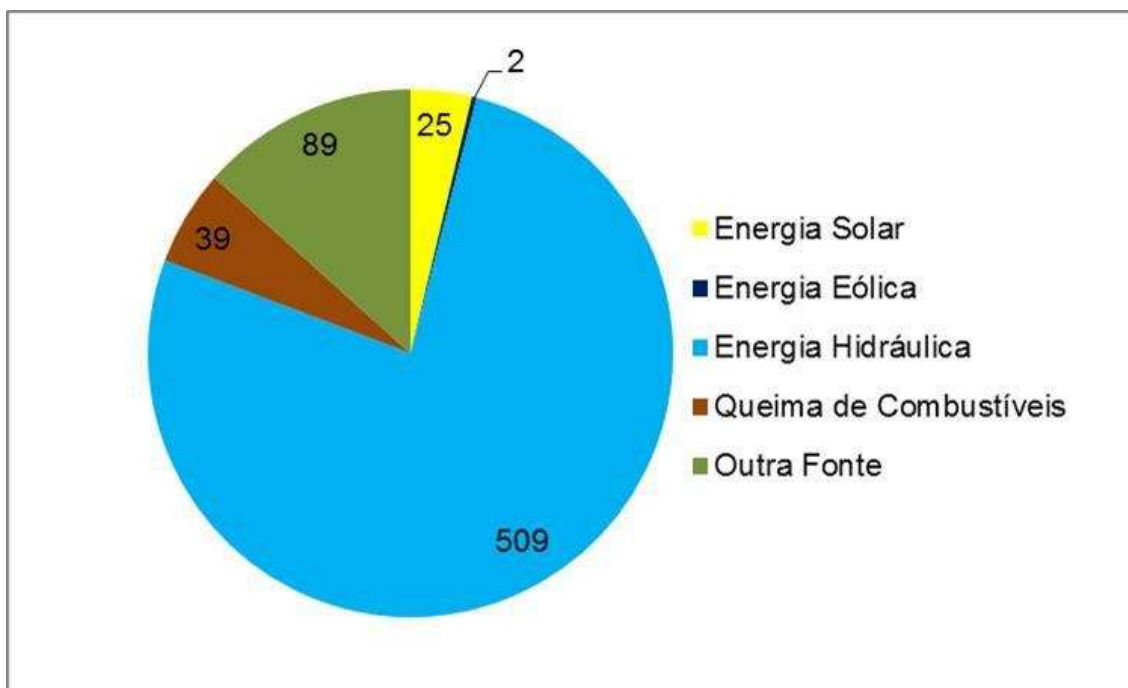


Figura 5.2 – Estabelecimentos com geração própria de energia elétrica por fonte.  
Fonte: (IBGE, 2006)

O Quadro 5.7 mostra o consumo de combustíveis nos estabelecimentos agropecuários da Zona da Mata de Minas Gerais.

Quadro 5.7 – Consumo de combustíveis nos estabelecimentos agropecuários da Zona da Mata de Minas Gerais

Microrregião	Álcool (m <sup>3</sup> )	Carvão Vegetal (t)	Gás (m <sup>3</sup> )	Gasolina (m <sup>3</sup> )	Lenha* (t)	Óleo Diesel (m <sup>3</sup> )	Querosene (m <sup>3</sup> )
Cataguases	18	0	157	380	8.840	597	0
Juiz de Fora	34	0	293	647	11.560	1.329	3
Manhuaçu	93	0	1.462	2.023	66.980	1.834	2
Muriaé	120	0	1.410	1.256	35.360	2.252	0
Ponte Nova	290	0	517	648	27.540	908	1
Ubá	5	20	854	454	20.060	825	0
Viçosa	16	17	667	648	54.060	973	3
Total	576	37	5.360	6.056	224.400	8.718	9
Total (TJ)	12,30	1,00	138,25	199,56	2.912,64	319,39	0,31

Fonte: (IBGE, 2006).

\*inclui a lenha utilizada para cocção.

Os objetivos deste trabalho foram: (i) estimar os resíduos agropecuários disponíveis na região da Zona da Mata de Minas Gerais; (ii) estimar o potencial de produção de biometano por meio da codigestão anaeróbia de dejetos de suínos e resíduos vegetais; (iii) estimar o potencial de produção de biometano por meio da codigestão anaeróbia de dejetos de frangos e resíduos vegetais; (iv) estimar e comparar o potencial de geração de energia com o biometano produzido com dejetos de suínos e por meio da codigestão com resíduos vegetais; (v) estimar e comparar o potencial de geração de energia com o biometano produzido com dejetos de frangos e por meio da codigestão com resíduos vegetais; e (vi) avaliar os impactos da energia produzida com os resíduos agropecuários na matriz energética da região.

## **5.2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.2.1. FONTE DE DADOS**

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos da literatura científica, relatórios técnicos e dos órgãos oficiais de estatística brasileiros.

Os dados da produção agropecuária são relativos ao ano de 2012 e foram obtidos a partir da Pesquisa Agrícola Municipal (IBGE, 2014a) e Pesquisa Pecuária Municipal (IBGE, 2014b), realizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Esses dados proporcionaram informação a nível municipal relativas a: (i) rebanho efetivo de suínos e frangos de corte; (ii) área plantada em hectares dos cultivos; e (iii) produção anual em toneladas dos cultivos.

### **5.2.2. APLICAÇÃO DA FERRAMENTA SAUDADE**

Foi utilizada a ferramenta computacional SAUDADE, apresentada no Capítulo 4 deste trabalho, para realizar os seguintes cálculos: (i) resíduos agropecuários produzidos na região; (ii) biometano produzido a partir dos resíduos agropecuários; (iii) energia gerada a partir do biometano; (iv) potência elétrica gerada a partir do biometano; (v) energia elétrica produzida a partir do biometano.

Foi utilizado o *software* de sistemas de informações geográficas Arc GIS 10.2 da ESRI para a elaboração de mapas da região mostrando a potência elétrica gerada a partir dos resíduos agropecuários a nível municipal.

Foi considerado que os dejetos de suínos são enviados aos biodigestores continuamente, uma vez que a limpeza das baias é realizada diariamente. Já no caso dos dejetos de frango foi considerado que os mesmos são enviados aos biodigestores ao final de cada ciclo de criação. Portanto o dimensionamento dos biodigestores considerou o modo de operação em fluxo contínuo para os dejetos da suinocultura e o modo de operação em batelada para os dejetos da avicultura. O cálculo da potência elétrica e da eletricidade gerada foi realizado separadamente da seguinte forma: (i) codigestão de dejetos de suínos e resíduos dos cultivos vegetais; e (ii) codigestão de dejetos de frangos e resíduos dos cultivos vegetais.

Os cálculos foram realizados com as seguintes equações:

### PRODUÇÃO DE DEJETOS DE SUÍNOS:

Os dejetos de suínos produzidos foram calculados pela equação 5.1.

$$D_{sui} = 365 \times N_{sui} \times d_{sui} \times \rho_{sui} \times 10^{-3} \quad (5.1)$$

em que:

$D_{sui}$	- Produção de dejetos de suínos	t.ano <sup>-1</sup> ;
365	- Número de dias em um ano,	dia;
$N_{sui}$	- Rebanho efetivo anual de suínos,	ano <sup>-1</sup> ;
$d_{sui}$	- Produção diária de dejetos,	m <sup>3</sup> .dia <sup>-1</sup> ;
$\rho_{sui}$	- Massa específica dos dejetos suínos,	kg.m <sup>-3</sup> .

Considerou-se a produção diária de dejetos pelos suínos dada por (SOUZA, *et al.*, 2009) e a massa específica dos dejetos de suínos dada por (METCALF e EDDIE, 1991).

### PRODUÇÃO DE DEJETOS DE FRANGOS:

Os dejetos de frangos produzidos foram calculados pela equação 5.2.

$$D_{fran} = N_{fran} \times CF_{fran} \times ciclos \times 10^{-3} \quad (5.2)$$

em que:

$D_{fran}$	- Produção de dejetos de frango,	t ano <sup>-1</sup> ;
$N_{fran}$	- Rebanho efetivo anual de frangos,	frango ano <sup>-1</sup> ;
$CF_{fran}$	- Cama de Frango produzida por ave,	kg frango <sup>-1</sup> ;
ciclos	- Número de ciclos por ano,	adimensional.

Considerou-se a cama de frango produzida por ave dada por (MITCHELL JUNIOR, 1991).

O número de ciclos por ano foi calculado considerando-se um tempo médio de 45 dias para abate do frango e 15 dias de vazio sanitário para o ingresso de um

novo lote de pintinhos. Dessa forma, o cálculo do número de ciclos foi realizado pela equação 5.3:

$$Ciclos = \frac{365}{(\Delta t_{criação} + \Delta t_{vazio\ sanitário})} \quad (5.3)$$

em que:

- Ciclos - Número de ciclos por ano, adimensional;
- 365 - Número de dias em um ano, dia;
- $\Delta t_{criação}$  - Duração do ciclo de criação, dia;
- $\Delta t_{vazio\ sanitário}$  - Tempo de vazio sanitário, dia.

O número de ciclos de criação de frangos de corte por ano considerado nos cálculos foi de 6,1.

## RESÍDUOS DO CULTIVO DE CAFÉ:

A produção de resíduos do cultivo de café foi calculada pela equação 5.4.

$$R_{café} = P_{café} \times F_{Res} \quad (5.4)$$

em que:

- $R_{café}$  - Produção de resíduos do cultivo do café,  $t.ano^{-1}$ ;
- $P_{café}$  - Produção de café,  $t.ano^{-1}$ ; e
- $F_{Res}$  - Fração de resíduos no grão de café, adimensional.

A fração de casca e polpa no grão de café foi obtida de trabalho realizado por (MURTHY e NAIDU, 2013).

## RESÍDUOS DO CULTIVO DE FEIJÃO:

A produção de resíduos do cultivo de feijão foi calculada pela equação 5.5.

$$R_{feijão} = 0,3 \times A_{feijão} \times res_{ha} \quad (5.5)$$

em que:

- $R_{\text{feijão}}$  - Produção de resíduos do cultivo de feijão, t.ano<sup>-1</sup>;
- 0,3 - Taxa de retirada dos resíduos do solo, adimensional;
- $A_{\text{feijão}}$  - Área plantada de feijão, ha.ano<sup>-1</sup>;
- $res_{ha}$  - Resíduo de feijão por área plantada, t.ha<sup>-1</sup>.

A taxa de retirada de resíduo de feijão do solo considerou trabalho realizado por (ANDREWS, 2006). A quantidade de resíduos de feijão por área plantada foi obtida de trabalho realizado por (SOUZA, *et al.*, 2002).

### **RESÍDUOS DO CULTIVO DE MILHO:**

A produção de resíduos do cultivo de milho foi calculada pela equação 5.6.

$$R_{\text{milho}} = 0,3 \times A_{\text{milho}} \times res_{ha} \quad (5.6)$$

em que:

- $R_{\text{milho}}$  - Produção de resíduos do cultivo de milho, t.ano<sup>-1</sup>;
- 0,3 - Taxa de retirada dos resíduos do solo, adimensional;
- $A_{\text{feijão}}$  - Área plantada de milho, ha.ano<sup>-1</sup>;
- $res_{ha}$  - Resíduo de milho por área plantada, t.ha<sup>-1</sup>.

A taxa de retirada de resíduo de milho do solo considerou trabalho realizado por (ANDREWS, 2006). A quantidade de resíduos de milho por área plantada foi obtida de trabalho realizado por (SOUZA, *et al.*, 2002).

### **RESÍDUOS DO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR:**

#### **BAGAÇO:**

A quantidade de bagaço de cana disponível para a codigestão foi calculada pela equação 5.7.

$$R_{bagaço} = P_{cana} \times F_{Res} \times F_{codigestão} \quad (5.7)$$

em que:

- $R_{bagaço}$  - Produção de bagaço de cana para codigestão, t ano<sup>-1</sup>;  
 $P_{cana}$  - Produção de cana-de-açúcar, t ano<sup>-1</sup>;  
 $F_{Res}$  - Fração de bagaço na cana de açúcar, adimensional;  
 $F_{codigestão}$  - Fração de bagaço disponível para codigestão, adimensional.

A fração de bagaço na produção de cana foi obtida de (SANTOS, *et al.*, 2012) e (SOUZA, 2001). A fração de bagaço disponível para a codigestão anaeróbia foi obtida de (DE PAOLI, *et al.*, 2011).

#### **PALHA:**

A quantidade de palha de cana disponível para a codigestão foi calculada pela equação 5.8.

$$R_{palha} = P_{cana} \times F_{Res} \times F_{codigestão} \quad (5.8)$$

em que:

- $R_{palha}$  - Produção de palha de cana para codigestão, t ano<sup>-1</sup>;  
 $P_{cana}$  - Produção de cana-de-açúcar, t ano<sup>-1</sup>;  
 $F_{Res}$  - Fração de palha na cana-de-açúcar, adimensional;  
 $F_{codigestão}$  - Fração de palha disponível para codigestão, adimensional.

A fração de palha na produção de cana foi obtida de (SANTOS, *et al.*, 2012) e (SOUZA, 2001). A fração de palha disponível para a codigestão anaeróbia foi obtida de (DE PAOLI, *et al.*, 2011).

#### **PRODUÇÃO DE BIOMETANO COM DEJETOS DE SUÍNOS:**

A produção de biometano com dejetos de suínos foi calculada pela equação 5.9.

$$P_{Bsui} = D_{sui} \times ST \times SV \times B_{sui} \quad (5.9)$$

em que:

$P_{Bsui}$	- Produção de biometano com dejetos de suínos,	$m^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ;
$D_{sui}$	- Produção de dejetos de suínos,	$\text{kg} \cdot \text{ano}^{-1}$ ;
ST	- Sólidos Totais por massa de dejetos,	$\text{kg de ST} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;
SV	- Sólidos Voláteis por massa de ST,	$\text{kg de SV} \cdot \text{kg de ST}^{-1}$ ;
$B_{sui}$	- Volume de biometano por SV,	$m^3 (\text{kg de SV})^{-1}$ .

Considerou-se a concentração de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV) dadas por (SOUZA, *et al.*, 2009). O volume de metano por massa de sólidos voláteis considerado foi o apresentado por (ORRICO JUNIOR, *et al.*, 2011).

#### **PRODUÇÃO DE BIOMETANO COM DEJETOS DE FRANGOS:**

A produção de biometano com dejetos de frangos foi calculada pela equação 5.10.

$$P_{Bfran} = D_{fran} \times ST \times SV \times B_{fran} \quad (5.10)$$

em que:

$P_{Bfran}$	- Produção de biometano com dejetos de frangos,	$m^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ;
$D_{fran}$	- Produção de dejetos de frangos,	$\text{kg} \cdot \text{ano}^{-1}$ ;
ST	- Sólidos Totais por massa de dejetos,	$\text{kg de ST} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;
SV	- Sólidos Voláteis por massa de ST,	$\text{kg de SV} \cdot \text{kg de ST}^{-1}$ ;
$B_{fran}$	- Volume de biometano por SV,	$m^3 (\text{kg de SV})^{-1}$ .

Considerou-se a concentração de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV) dadas por (MALLIK, *et al.*, 1990). O volume de metano por massa de sólidos voláteis considerado foi obtido de (ORRICO JUNIOR, *et al.*, 2011).

## PRODUÇÃO DE BIOMETANO COM RESÍDUOS DE CAFÉ

A produção de biometano com resíduos do cultivo de café foi calculada pela equação 5.11.

$$P_{Bcafé} = R_{café} \times ST \times SV \times B_{café} \quad (5.11)$$

em que:

$P_{Bcafé}$	- Produção de biometano com resíduos de café,	$m^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ;
$R_{café}$	- Produção de resíduos de café,	$\text{kg} \cdot \text{ano}^{-1}$ ;
ST	- Sólidos Totais por massa de dejetos,	$\text{kg de ST} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;
SV	- Sólidos Voláteis por massa de ST,	$\text{kg de SV} \cdot \text{kg de ST}^{-1}$ ;
$B_{café}$	- Volume de biometano por SV,	$m^3 (\text{kg de SV})^{-1}$ .

Considerou-se a concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e o volume de metano por massa de sólidos voláteis apresentados por (FISCHER *et al.*, 2010).

## PRODUÇÃO DE BIOMETANO COM RESÍDUOS DE FEIJÃO

A produção de biometano com resíduos do cultivo de feijão foi calculada pela equação 5.12.

$$P_{Bfeijão} = R_{feijão} \times ST \times SV \times B_{feijão} \quad (5.12)$$

em que:

$P_{Bfeijão}$	- Produção de biometano com resíduos de feijão,	$m^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ;
$R_{feijão}$	- Produção de resíduos de feijão,	$\text{kg} \cdot \text{ano}^{-1}$ ;
ST	- Sólidos Totais por massa de dejetos,	$\text{kg de ST} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;
SV	- Sólidos Voláteis por massa de ST,	$\text{kg de SV} \cdot \text{kg de ST}^{-1}$ ;
$B_{feijão}$	- Volume de biometano por SV,	$m^3 (\text{kg de SV})^{-1}$ .

Considerou-se a concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e o volume de metano por massa de sólidos voláteis apresentados por (PETERSSON, *et al.*, 2007).

## PRODUÇÃO DE BIOMETANO COM RESÍDUOS DE MILHO

A produção de biometano com resíduos do cultivo de milho foi calculada pela equação 5.13.

$$P_{Bmilho} = R_{milho} \times ST \times SV \times B_{milho} \quad (5.13)$$

em que:

$P_{Bmilho}$	- Produção de biometano com resíduos de milho,	$m^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ;
$R_{milho}$	- Produção de resíduos de milho,	$\text{kg} \cdot \text{ano}^{-1}$ ;
ST	- Sólidos Totais por massa de dejetos,	$\text{kg de ST} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;
SV	- Sólidos Voláteis por massa de ST,	$\text{kg de SV} \cdot \text{kg de ST}^{-1}$ ;
$B_{milho}$	- Volume de biometano por SV,	$m^3 (\text{kg de SV})^{-1}$ .

Considerou-se a concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e o volume de biometano por massa de sólidos voláteis apresentados por (KTBL, 2014).

Produção de biometano com resíduos de cana-de-açúcar:

## PRODUÇÃO DE BIOMETANO COM RESÍDUOS DE BAGAÇO DE CANA

A produção de biometano com bagaço de cana foi calculada pela equação 5.14.

$$P_{Bbagaço} = R_{bagaço} \times ST \times SV \times B_{bagaço} \quad (5.14)$$

em que:

$P_{Bbagaço}$	- Produção de biometano com bagaço de cana,	$m^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ;
$R_{bagaço}$	- Produção de bagaço de cana,	$\text{kg} \cdot \text{ano}^{-1}$ ;
ST	- Sólidos Totais por massa de dejetos,	$\text{kg de ST} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;
SV	- Sólidos Voláteis por massa de ST,	$\text{kg de SV} \cdot \text{kg de ST}^{-1}$ ;
$B_{bagaço}$	- Volume de biometano por SV,	$m^3 (\text{kg de SV})^{-1}$ .

Considerou-se a concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e o volume de biometano por massa de sólidos voláteis apresentados por (DE PAOLI, *et al.*, 2011).

## PRODUÇÃO DE BIOMETANO COM PALHA DE CANA

A produção de biometano com palha de cana foi calculada pela equação 5.15.

$$P_{Bpalha} = R_{palha} \times ST \times SV \times B_{palha} \quad (5.15)$$

em que:

$P_{Bpalha}$	- Produção de biometano com palha de cana,	$m^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ;
$R_{palha}$	- Produção de palha de cana,	$\text{kg} \cdot \text{ano}^{-1}$ ;
ST	- Sólidos Totais por massa de dejetos,	$\text{kg de ST} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;
SV	- Sólidos Voláteis por massa de ST,	$\text{kg de SV} \cdot \text{kg de ST}^{-1}$ ;
$B_{palha}$	- Volume de biometano por SV,	$m^3 (\text{kg de SV})^{-1}$ .

Considerou-se a concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e o volume de biometano por massa de sólidos voláteis apresentados por (DE PAOLI, *et al.*, 2011).

## POTENCIAL DE ENERGIA A PARTIR DO BIOMETANO

O potencial de energia disponível a partir do biometano foi calculado a partir da equação 5.16.

$$E = P_B \times PCI_B \times 10^{-9} \quad (5.16)$$

em que:

E	- Potencial de energia,	$\text{TJ} \cdot \text{ano}^{-1}$ ;
$P_B$	- Produção de biometano,	$m^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ; e
$PCI_B$	- Poder Calorífico Inferior do biometano,	$\text{kJ} \cdot m^{-3}$ .

Considerou-se o Poder Calorífico Inferior (PCI) do biometano igual a  $36.000 \text{ kJ} \cdot m^{-3}$  (PANTALEO, *et al.*, 2013).

## POTÊNCIA ELÉTRICA A PARTIR DO METANO

A potência elétrica disponível a partir do metano produzido foi calculada com a equação 5.17.

$$Pot_{elétrica} = PCI_B \times \dot{v} \times \eta_{motor-gerador} \quad (5.17)$$

em que:

$Pot_{elétrica}$	- Potência elétrica,	kW;
$PCI_B$	- Poder Calorífico Inferior do biometano,	$\text{kJ m}^{-3}$ ;
$\dot{v}$	- vazão de biometano,	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ; e
$\eta_{motor-gerador}$	- rendimento do conjunto motor-gerador,	adimensional.

O Quadro 5.8 apresenta a eficiência do conjunto motor gerador de acordo com a produção de biogás.

Quadro 5.8 – Eficiência do conjunto motor-gerador de acordo com a produção de metano

Produção de $\text{CH}_4$ ( $\text{m}^3/\text{ano}$ )	Eficiência ( $\eta$ )
< 165.000	0,266
165.000 < Prod < 412.000	0,299
412.000 < Prod < 824.000	0,338
824.000 < Prod < 1.645.000	0,355
Prod >1.645.000	0,371

Fonte: (PANTALEO, *et al.*, 2013)

## ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA

O cálculo da energia elétrica produzida a partir do metano obtido dos resíduos foi dado pela equação 5.18.

$$EE = Pot_{elétrica} \times \Delta t \times 10^{-3} \quad (5.18)$$

em que:

EE	- Energia elétrica gerada com biometano,	$\text{MWhano}^{-1}$ ;
$Pot_{elétrica}$	- Potência elétrica da usina,	kW; e
$\Delta t$	- Tempo de operação da usina,	$\text{h/ano}^{-1}$ .

Os tempos de operação, de acordo com a potência da usina, são apresentados no Quadro 5.9.

Quadro 5.9. Tempo de operação da usina

Potencia elétrica da usina (kW)	Tempo de Operação (h.ano <sup>-1</sup> )
< 250 kW	7.500
250 kW < P < 1000	7.800
> 1000 kW	8.000

Fonte: (PANTALEO, *et al.*, 2013).

### 5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.3.1. PRODUÇÃO DE DEJETOS DE SUÍNOS E FRANGO DE CORTE NA ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS

O Quadro 5.10 mostra as quantidades de dejetos de suínos e frangos ( $t\text{ ano}^{-1}$ ) disponíveis nas microrregiões da Zona da Mata de Minas Gerais.

Quadro 5.10 – Produção de dejetos suínos e de frangos por microrregião

Microrregião	Dejetos suínos ( $t\text{ ano}^{-1}$ )	Dejetos frango ( $t\text{ ano}^{-1}$ )
Cataguases	164.414,29	793,94
Juiz de Fora	215.020,78	1.098,85
Manhuaçu	120.963,40	363,00
Muriaé	85.666,08	450,61
Ponte Nova	1.891.819,76	1.308,13
Ubá	89.462,02	7.247,65
Viçosa	285.847,93	10.657,76
Total	2.853.194,26	21.960,73

A carga poluidora, em termos de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), dos dejetos produzidos anualmente pelo rebanho efetivo de suínos da região corresponde aproximadamente a carga poluidora produzida por uma cidade de 3,5 milhões de habitantes. O total de resíduos produzidos anualmente pelo rebanho efetivo de frango na região corresponde aos resíduos produzidos por uma cidade de 3.364 habitantes (FLEMING e FORD, 2001).

Observa-se que o potencial poluidor dos dejetos de suínos é da ordem de 1000 vezes maior que os dejetos de frangos.

O Quadro 5.11 apresenta a quantidade de resíduos dos cultivos de café, feijão, milho, bagaço de cana e palha de cana ( $t\text{ ano}^{-1}$ ) disponível nas microrregiões da Zona da Mata de Minas Gerais.

Quadro 5.11 – Resíduos vegetais disponíveis na Zona da Mata de Minas Gerais

Microrregião	café (t ano <sup>-1</sup> )	feijão (t ano <sup>-1</sup> )	milho (t ano <sup>-1</sup> )	bagaço de cana (t ano <sup>-1</sup> )	palha de cana (t ano <sup>-1</sup> )
Cataguases	247,50	677,12	962,76	3.932,16	5.734,40
Juiz de Fora	167,85	3.686,15	2.099,33	4.559,52	6.649,30
Manhuaçu	67.085,10	9.039,21	4.960,77	559,73	816,27
Muriaé	26.216,55	6.836,11	2.585,82	3.827,76	5.582,15
Ponte Nova	10.197,00	4.417,21	4.451,70	83.038,46	121.097,76
Ubá	856,35	2.524,59	2.498,49	8.194,80	11.950,75
Viçosa	12.163,50	13.573,13	8.675,92	9.347,66	13.632,01
Total	116.933,85	40.753,52	26.234,78	113.460,10	165.462,64

A disponibilidade de resíduos vegetais disponíveis varia de acordo com a microrregião. Essa heterogeneidade tem implicações no potencial da produção de biometano devido aos diferentes potenciais metanogênicos de cada tipo de resíduo.

O Quadro 5.12 mostra informações sobre o potencial de produção de biometano e de energia (TJ ano<sup>-1</sup>).

Quadro 5.12 – Potencial de produção de biometano e de energia

Tipo de Resíduo	Produção de Metano (m <sup>3</sup> ano <sup>-1</sup> )	Potencial de Energia (TJ ano <sup>-1</sup> )
Suíno	63.830.797	2.298
Frango	28.870.072	1.039
Café	5.306.926	191
Feijão	15.193.758	547
Milho	3.216.462	116
Bagaço de Cana	45.727.390	1.646
Palha de Cana	59.941.899	2.158
Total	222.087.304	7.995

Os resíduos vegetais disponíveis respondem por 58,26% do potencial da produção de biometano na região (bagaço e palha de cana-de-açúcar totalizam 47,58%). Os dejetos de suínos e de frangos respondem por 28,74% e 13,00%, respectivamente.

O potencial da produção de biometano com os resíduos agropecuários atende a toda a demanda de combustíveis (fósseis e renováveis) do setor agropecuário da região da Zona da Mata de Minas Gerais e apresenta um saldo de 4412 TJ ano<sup>-1</sup> de energia. Esse excedente pode ser utilizado para o desenvolvimento de mais atividades agropecuárias ou para o atendimento a outros setores da região.

A energia disponível nos dejetos de suínos é capaz de atender totalmente a demanda de combustíveis fósseis (gás, gasolina, óleo diesel e querosene) do setor agropecuário da Zona da Mata de Minas Gerais havendo um superávit de 1640 TJ.ano<sup>-1</sup> de energia. O biometano dos dejetos de suínos atende a 64,13% da demanda de combustíveis do setor agropecuário regional.

A energia disponível nos dejetos de frango é capaz de atender totalmente a demanda de combustíveis fósseis do setor agropecuário da Zona da Mata de Minas Gerais havendo um superávit de 382 TJ.ano<sup>-1</sup> de energia. O biometano dos dejetos de frangos atende a 28,99% da demanda de combustíveis do setor agropecuário regional.

### **5.3.2. SUINOCULTURA**

A Figura 5.3 mostra a porcentagem de participação dos dejetos de suínos e dos resíduos vegetais no potencial da produção de biometano por meio da codigestão nas sete microrregiões da Zona da Mata de Minas Gerais.

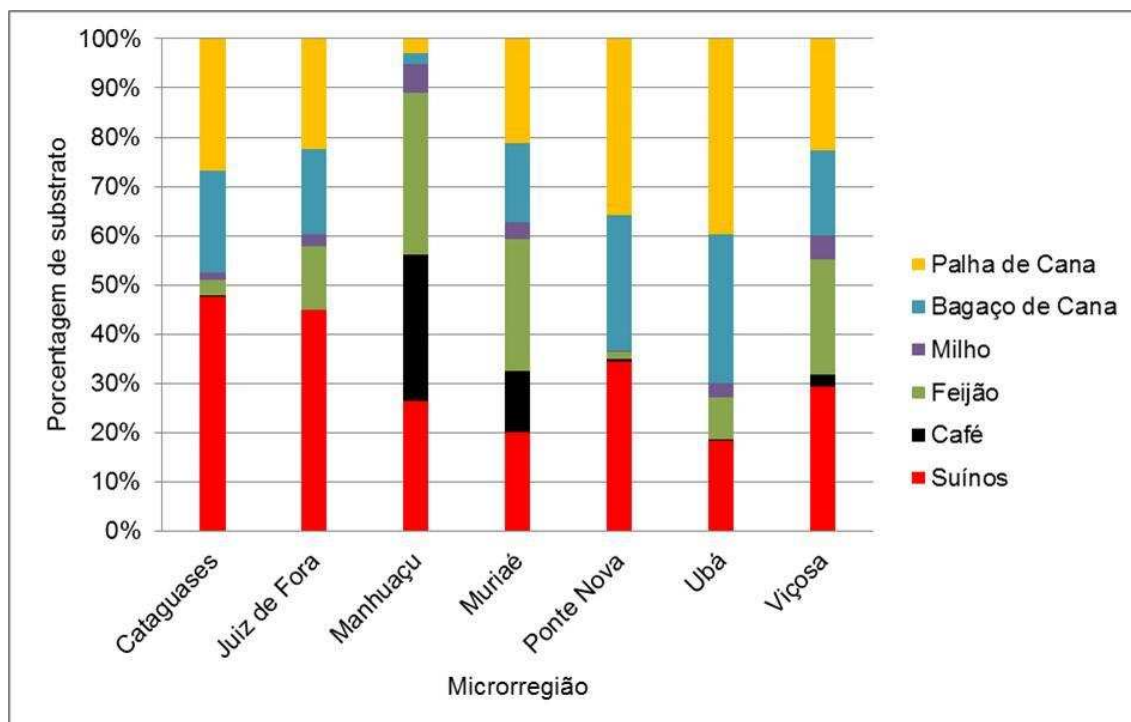


Figura 5.3 – Produção de biometano com dejetos de suínos e resíduos vegetais.

Os resíduos vegetais respondem por 66,94% do potencial total de biometano que pode ser produzido por meio da codigestão anaeróbia dos dejetos da suinocultura e resíduos vegetais. Devido a seu potencial metanogênico e grande quantidade produzida, os resíduos da cana-de-açúcar (bagaço e palha) são responsáveis pela maior parte da produção de biometano nas microrregiões de Muriaé, Ponte Nova, Ubá e Viçosa. No entanto resíduos com baixo potencial metanogênico, como o do café, respondem por importante parcela do biometano em microrregiões como a de Manhuaçu (29,70%) devido a sua grande produção. Nas microrregiões de Cataguases e Juiz de Fora os dejetos de suínos são responsáveis por 47,63% e 44,97% da produção de biometano, respectivamente.

A estimativa da potência elétrica gerada a partir do biometano dos dejetos da suinocultura e da codigestão com resíduos vegetais em cada microrregião da Zona da Mata de Minas Gerais é apresentada no Quadro 5.13 abaixo:

Quadro 5.13 – Estimativa da potência elétrica gerada a partir dos dejetos da suinocultura e resíduos vegetais por microrregião da Zona da Mata de Minas Gerais

Microrregião	Potência Elétrica (kW)	
	sem codigestão	com codigestão
Cataguases	1.438	3.029
Juiz de Fora	1.800	3.998
Manhuaçu	955	3.924
Muriaé	653	3.630
Ponte Nova	17.743	51.614
Ubá	654	4.311
Viçosa	2.387	8.804
Total	25.630	79.309

A Figura 5.4 mostra a estimativa da potência elétrica gerada a partir dos dejetos da suinocultura para os municípios da Zona da Mata de Minas Gerais.

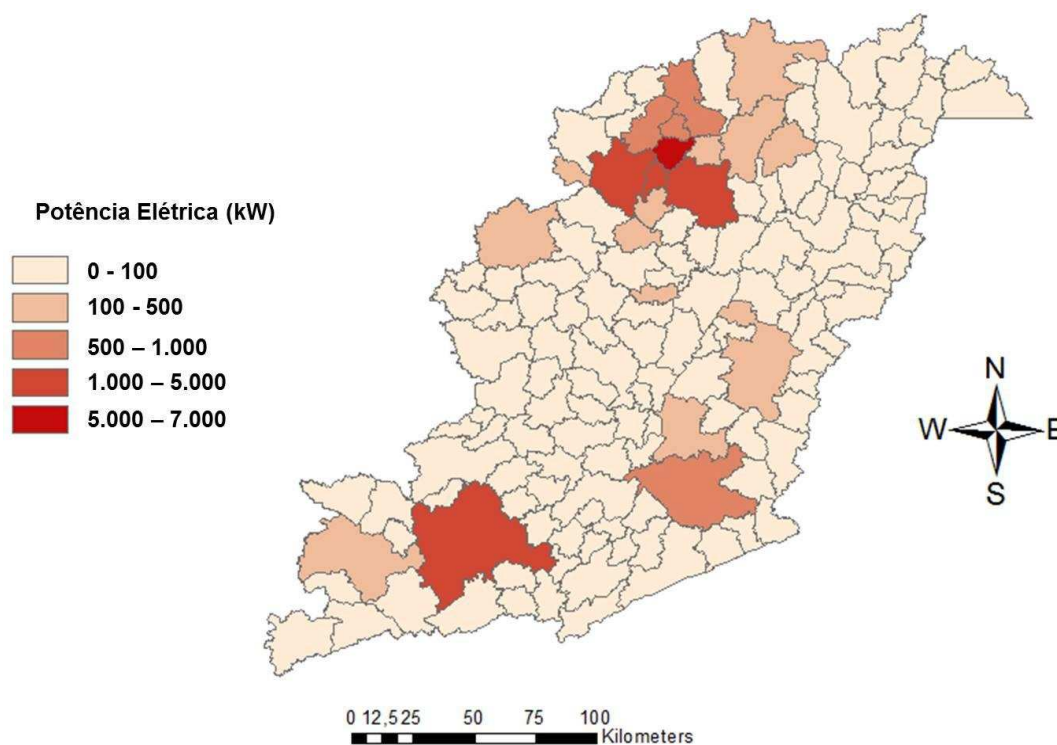


Figura 5.4 – Estimativa da potência elétrica produzida a partir dos dejetos da suinocultura.

Os municípios da microrregião de Ponte Nova apresentam o maior potencial de geração de energia elétrica a partir dos dejetos da suinocultura. O município de Urucânia apresenta potencial de 6,15 MW. Em Juiz de Fora, município em que existe um grande parque industrial e conseqüente demanda de eletricidade, o

potencial é de 1,10 MW de capacidade de geração. A grande maioria dos municípios da região (85,21%) apresentam potencial de geração de energia elétrica a partir do biometano menor que 100 kW.

A Figura 5.5 mostra a estimativa da potência elétrica gerada a partir da codigestão de dejetos de suínos com os resíduos vegetais para os municípios da Zona da Mata de Minas Gerais.

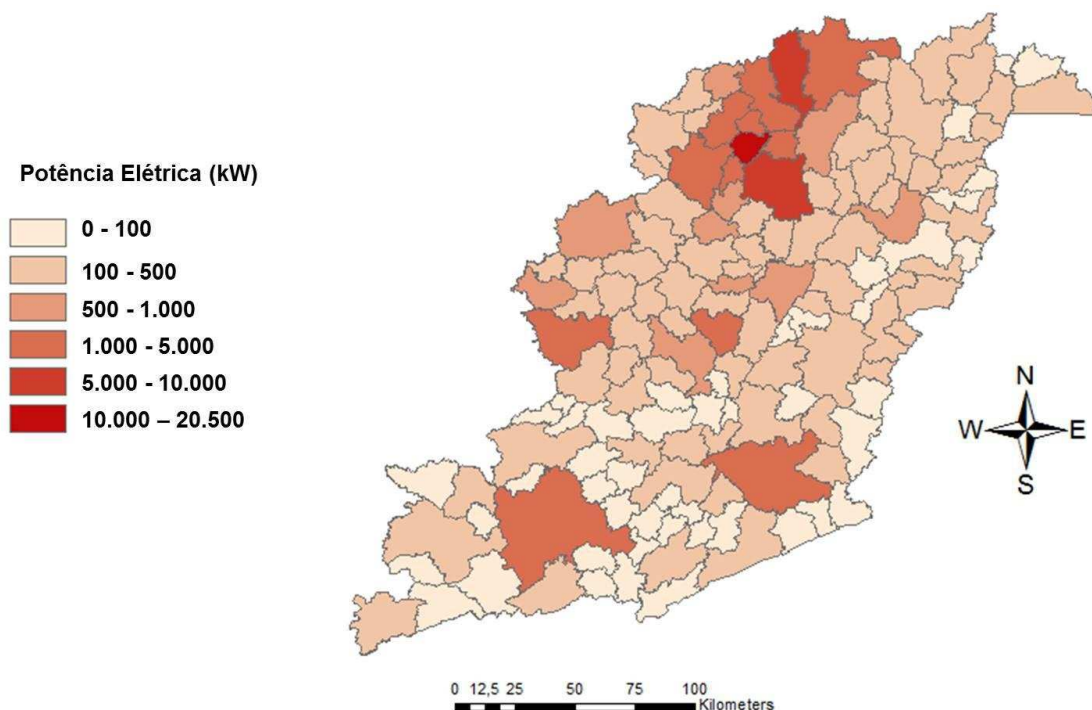


Figura 5.5 – Estimativa da potência elétrica produzida a partir da codigestão dos resíduos agropecuários.

Com a codigestão anaeróbia o potencial de geração de eletricidade a partir do biometano no município de Urucânia alcança 20,33 MW. No município de Juiz de Fora o aumento da capacidade com a codigestão é de 0,20 MW devido a pequena disponibilidade de resíduos vegetais com grande potencial metanogênico no município. O número de municípios com capacidade de geração maior que 100 kW aumenta de 21 para 95 com a codigestão anaeróbia.

O Quadro 5.14 apresenta a comparação entre a potência elétrica gerada com o biometano e com a energia hidrelétrica na região.

Quadro 5.14. Comparação da potência elétrica gerada com biometano (de dejetos de suínos e resíduos vegetais) com hidrelétricas

Resíduos	Potência elétrica (kW)	% da capacidade hidrelétrica regional
Suínos	25.630	10,56
Suínos + resíduos vegetais (codigestão)	79.309	32,67

O Quadro 5.15 mostra a geração de energia elétrica, nas microrregiões da Zona da Mata de Minas Gerais, com o biometano produzido a partir dos dejetos de suínos e com a codigestão anaeróbia.

Quadro 5.15 – Potencial de produção de energia elétrica a partir do biometano de dejetos suínos e resíduos vegetais por microrregião da Zona da Mata

Microrregião	Energia Elétrica (MWh.ano <sup>-1</sup> )		% do consumo de eletricidade	
	sem codigestão	com codigestão	sem codigestão	com codigestão
Cataguases	11.042	23.172	2,62	5,50
Juiz de Fora	14.053	30.634	1,88	4,10
Manhuaçu	7.264	29.625	2,58	10,52
Muriaé	4.899	27.227	1,90	10,55
Ponte Nova	141.039	406.685	138,29	398,77
Ubá	4.904	32.330	1,12	7,41
Viçosa	18.376	66.783	12,90	46,87
Total	201.577	616.455	8,44	25,81

A geração de energia elétrica com o biometano produzido a partir dos dejetos de suínos é capaz de atender a 8,44% do consumo da região. Com a codigestão de dejetos de suínos e resíduos vegetais esse percentual sobe para 25,81%. O excedente de energia elétrica produzido na microrregião de Ponte Nova pode ser utilizado para ampliar as atividades do setor produtivo ou comercializado com as outras microrregiões.

A Figura 5.6 mostra o aumento do consumo de energia elétrica per capita com o aproveitamento dos dejetos suínos e resíduos vegetais.



Figura 5.6 – Aumento do consumo de energia elétrica per capita na Zona da Mata de Minas Gerais com o aproveitamento energético de dejetos suínos e resíduos vegetais.

A eletricidade gerada com o biometano, obtido de dejetos de suínos e resíduos vegetais, contribui para elevar o consumo per capita em 25,69%.

### 5.3.3. AVICULTURA

A Figura 5.7 mostra a porcentagem de participação dos dejetos de frangos e dos resíduos vegetais na produção de biometano por meio da codigestão nas sete microrregiões da Zona da Mata de Minas Gerais.

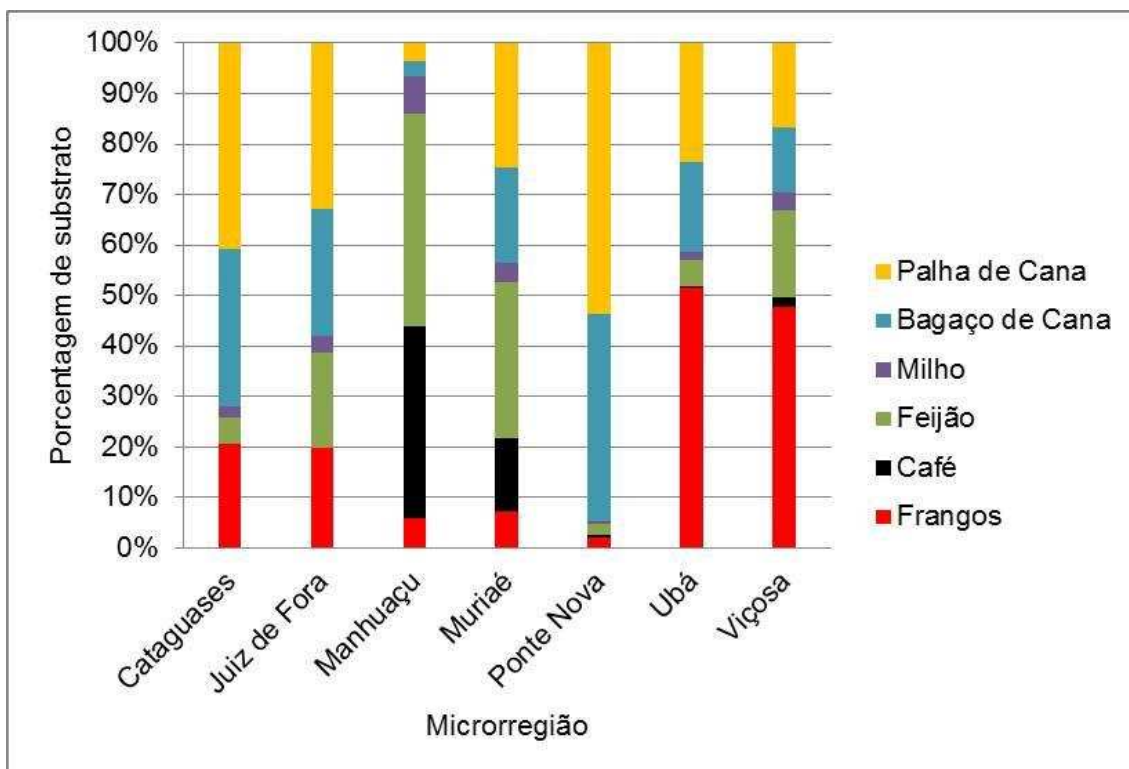


Figura 5.7 – Produção de biometano com dejetos de frangos e resíduos vegetais.

Os resíduos vegetais respondem por 81,76% do total de biometano produzido por meio da codigestão anaeróbica. Devido a seu potencial metanogênico e grande quantidade produzida, os resíduos da cana-de-açúcar (bagaço e palha) são responsáveis pela maior parte da produção de biometano nas microrregiões de Cataguases, Juiz de Fora, Muriaé e Ponte Nova (onde respondem por 94,65% da produção de biometano). No entanto resíduos com baixo potencial metanogênico, como o do café, respondem por importante parcela do biometano em microrregiões como a de Manhuaçu (37,96%) devido a sua grande produção. Nas microrregiões de Ubá e Viçosa os dejetos de frangos são responsáveis por 51,65% e 47,76% da produção de biometano, respectivamente.

A estimativa da potência elétrica gerada a partir do biometano dos dejetos da avicultura e da codigestão desses dejetos com resíduos agrícolas em cada microrregião da Zona da Mata de Minas Gerais é apresentada no Quadro 5.16.

Quadro 5.16 – Estimativa da potência elétrica gerada com biometano produzido a partir dos dejetos da avicultura e resíduos agropecuários por microrregião da Zona da Mata de Minas Gerais

Microrregião	Potência Elétrica (kW)	
	sem codigestão	com codigestão
Cataguases	345	1.962
Juiz de Fora	495	2.594
Manhuaçu	145	2.952
Muriaé	194	3.072
Ponte Nova	626	34.428
Ubá	3.755	7.561
Viçosa	5.754	12.186
<b>Total</b>	<b>11.314</b>	<b>64.755</b>

A Figura 5.8 mostra a estimativa da potência elétrica gerada a partir dos dejetos da avicultura para os municípios da Zona da Mata de Minas Gerais.

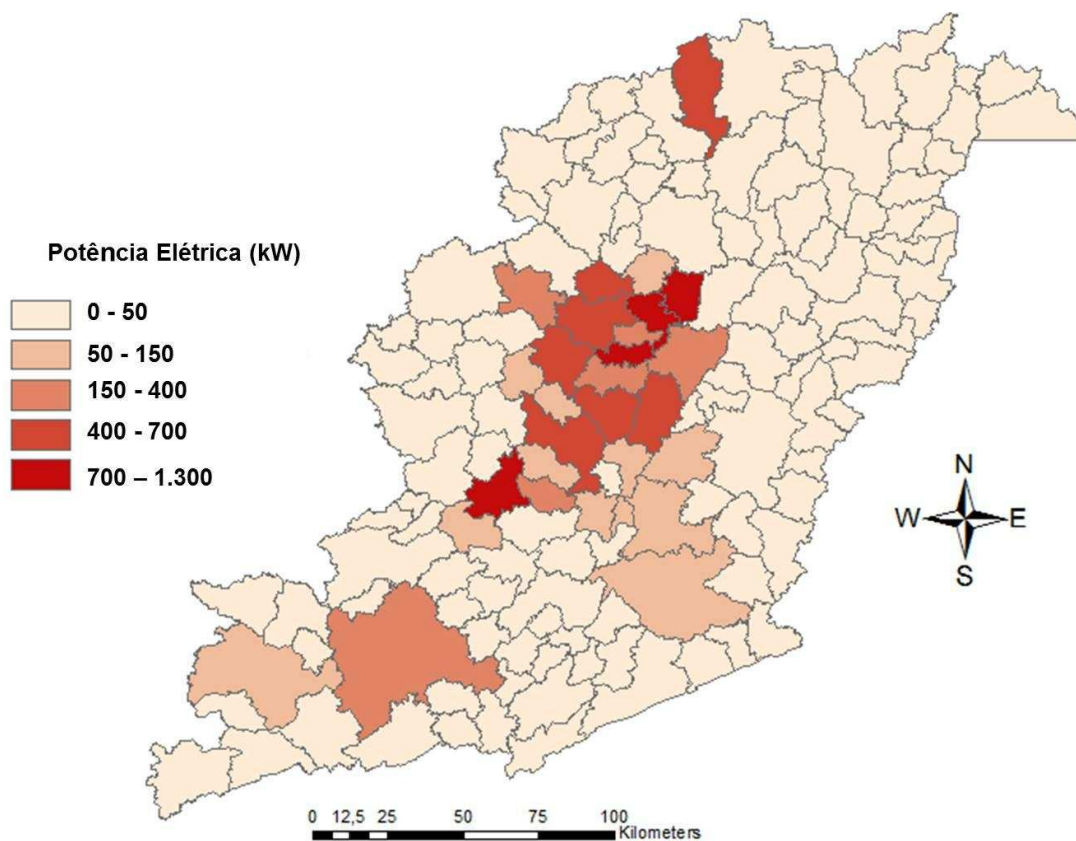


Figura 5.8 – Estimativa da potência elétrica produzida a partir dos dejetos da avicultura.

Os municípios das microrregiões de Ubá e Viçosa apresentam o maior potencial de geração de energia elétrica a partir dos dejetos da avicultura. O município de São Miguel do Anta, microrregião de Viçosa, apresenta potencial de 1,22 MW. Em Rio Pomba o potencial é de 1,10 MW de capacidade de geração. Há de se destacar o município de São Pedro dos Ferros, microrregião de Ponte Nova, que se destaca no norte da Zona da Mata com um potencial de 0,41 MW. A grande maioria dos municípios da região (85,91%) apresentam potencial de geração de energia elétrica a partir do biometano menor que 100 kW.

A Figura 5.9 mostra a estimativa da potência elétrica gerada a partir da codigestão dos dejetos da avicultura e resíduos vegetais para os municípios da Zona da Mata de Minas Gerais.

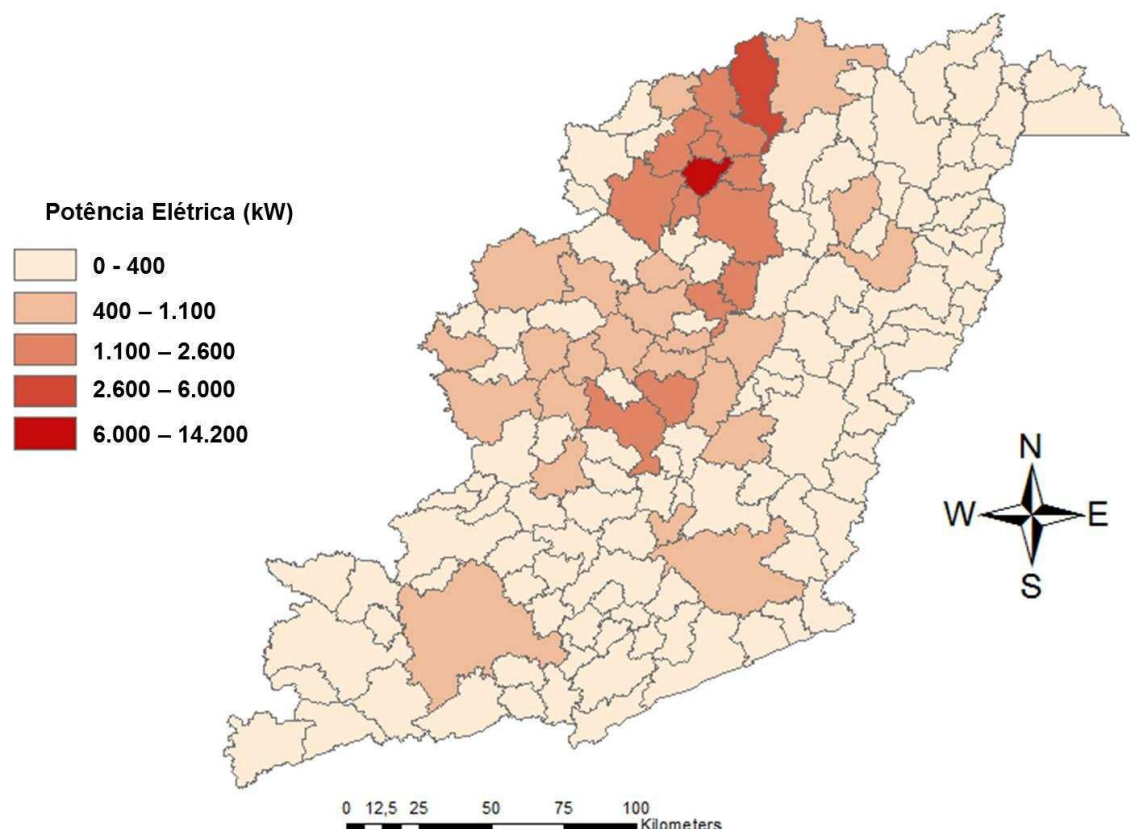


Figura 5.9 – Estimativa da potência elétrica produzida a partir da codigestão dos dejetos da avicultura e resíduos vegetais.

Em São Miguel do Anta o aumento da capacidade com a codigestão é de 0,26 MW devido a pequena disponibilidade de resíduos vegetais com grande potencial metanogênico no município. Em São Pedro dos Ferros o potencial de geração de eletricidade a partir do biometano alcança 5,83 MW, o município possui uma grande quantidade de resíduos de cana-de-açúcar disponível. O número de municípios com capacidade de geração maior que 100 kW aumenta de 20 para 81 com a codigestão anaeróbia.

O município de Urucânia, cuja vocação pecuária não é a avicultura, salta de um potencial de 16 kW para 14,20 MW com a codigestão. A justificativa para isso é mais uma vez a disponibilidade de bagaço e palha de cana-de-açúcar.

O Quadro 5.17 apresenta a comparação entre a potência elétrica gerada com o biometano e com a energia hidrelétrica na região.

Quadro 5.17. Comparação da potência elétrica gerada com biometano (de dejetos de frangos e resíduos vegetais) com hidrelétricas

Resíduos	Potência elétrica (kW)	% da capacidade hidrelétrica regional
Frangos	11.314	4,66
Frangos + resíduos vegetais (codigestão)	64.755	26,68

O Quadro 5.18 mostra a geração de energia elétrica, nas microrregiões da Zona da Mata de Minas Gerais, com o biometano produzido a partir dos dejetos da avicultura e com a codigestão destes com os resíduos vegetais.

Quadro 5.18 – Potencial de produção de energia elétrica a partir do biometano de dejetos da avicultura e resíduos vegetais por microrregião da Zona da Mata

Microrregião	Energia Elétrica (MWh.ano <sup>-1</sup> )		% do consumo de eletricidade	
	sem codigestão	com codigestão	sem codigestão	com codigestão
Cataguases	2.591	14.717	0,62	3,49
Juiz de Fora	3.714	19.454	0,50	2,60
Manhuaçu	1.087	22.136	0,39	7,86
Muriaé	1.458	23.043	0,57	8,93
Ponte Nova	4.818	259.957	4,72	254,90
Ubá	29.029	58.218	6,65	13,35
Viçosa	44.942	93.724	31,54	65,78
Total	87.639	491.248	3,67	20,57

A geração de energia elétrica com o biometano produzido a partir dos dejetos de frangos é capaz de atender a 3,67% do consumo da região. Com a codigestão de dejetos de frangos e resíduos vegetais esse percentual sobe para 20,57%.

A Figura 5.10 o aumento da energia elétrica per capita com o aproveitamento dos dejetos de frangos e resíduos vegetais:

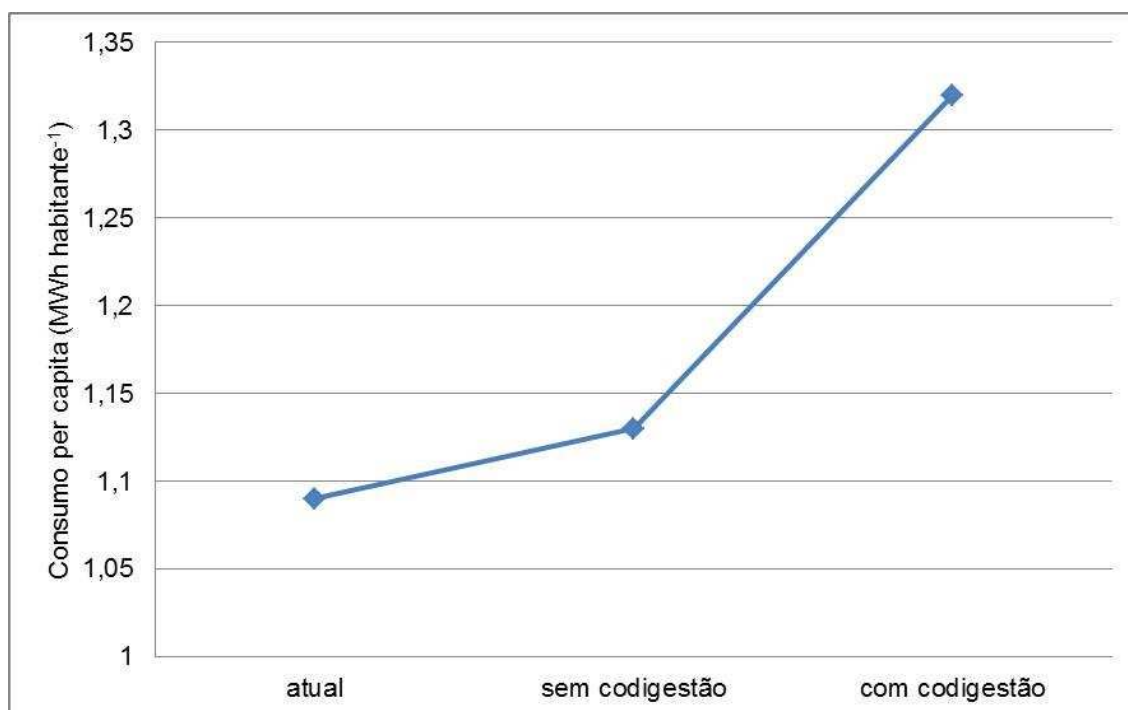


Figura 5.10 – Aumento do consumo de energia elétrica per capita na Zona da Mata de Minas Gerais com o aproveitamento energético de dejetos de frangos e resíduos vegetais.

A eletricidade gerada com o biometano, obtido de dejetos de frangos e resíduos vegetais, contribui para elevar o consumo per capita em 21,10%.

## 5.4. CONCLUSÃO

Os resíduos agropecuários disponíveis na Zona da Mata de Minas Gerais foram estimados em aproximadamente  $3,3 \times 10^6$  t ano<sup>-1</sup>, tornando primordial a gestão adequada dos mesmos. O aproveitamento energético dos resíduos agropecuários, e em particular os resíduos de suínos e frangos, além de representar uma solução ambiental e energética pode ter reflexos positivos do ponto de vista econômico e social.

A redução da contaminação do ar e dos corpos d'água é essencial para que os suinocultores e avicultores possam cumprir a legislação ambiental. Outro subproduto da codigestão anaeróbia, o digestato, pode ser utilizado como biofertilizante adicionando valor agrônômico e econômico ao processo.

Os resíduos vegetais, por meio da codigestão anaeróbia, aportam uma grande contribuição para a produção de biometano. Mais da metade do biometano produzido é oriundo dos resíduos dos cultivos do café, feijão, milho e cana-de-açúcar.

O biometano produzido a partir dos resíduos agropecuários atende a toda a demanda de combustíveis (fósseis e renováveis) do setor agropecuário da região da Zona da Mata de Minas Gerais, gerando um excedente de energia que pode ser aproveitado em outros setores produtivos, como a indústria.

A codigestão anaeróbia aumenta substancialmente o potencial de geração de eletricidade. O percentual de municípios que apresentam capacidade de geração maior que 100 kW sem codigestão é de 14,79% para os dejetos de suínos e 14,09% para dejetos de frangos. Esse percentual aumenta para 66,90% e 57,04% para a codigestão anaeróbia de dejetos de suínos/resíduos vegetais e dejetos de frangos/resíduos vegetais, respectivamente.

A inserção da eletricidade gerada pode evitar a construção de novas PCHs evitando assim impactos ambientais e sociais.

O aumento da oferta de eletricidade pode representar a melhoria de qualidade de vida das pessoas contribuindo para a elevação do índice de

desenvolvimento humano regional. O atendimento do consumo de eletricidade na região com a energia gerada a partir dos resíduos agropecuários pode chegar a 25,81% (dejetos de suínos e resíduos vegetais) e 20,57% (dejetos de frangos e resíduos vegetais).

A geração, transmissão e distribuição de eletricidade podem representar uma redução na evasão de divisas econômicas, uma vez que a energia pode ser produzida e consumida *in loco* não sendo exportada a outras regiões.

Existirá a necessidade de profissionais de manutenção e operação, sendo a criação de postos de trabalho uma outra consequência direta da aplicação destes projetos.

Entretanto são necessárias políticas públicas claras e eficazes de incentivos para a geração distribuída e o aproveitamento energético de resíduos agropecuários. Sem isto, este potencial não poderá ser convertido em capacidade instalada.

## 5.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPECS – **Associação Brasileira das Indústrias Produtoras e Exportadoras de Carne Suína**. Carne Suína Brasileira em 2011. Disponível em: [www.abipecs.org.br](http://www.abipecs.org.br), (Consulta em: 09/2012).

ABOUELENIEN, F., NAMBA, Y., KOSSEVA, M. R., NISHIO, N., NAKASHIMADA, Y. (2014). Enhancement of methane production from co-digestion of chicken manure with agricultural wastes, *Bioresource Technology*, Vol 159: 80-87.

ANDREWS, S. (2006). Crop Residue Removal for Biomass Energy Production: Effects on Soils and Recommendations. White Paper, published online. USDA Natural Resources Conservation Service.

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/GeracaoTipoFase.asp?tipo=5&fase=3&UF=MG:MINAS%20GERAIS> Data da Consulta: Set 2014.

CEMIG – COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, [www.cemig.com.br](http://www.cemig.com.br) (Consulta em: 08/2014).

CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. 27º Balanço Energético de Minas Gerais - BEEMG, 2012. Ano base 2011. Belo Horizonte: Cemig, 2012.

COOLS, D.; MERCKX, R.; VLASSAK, K.; VERHAEGEN, J. (2001). Survival of *E. Coli* and *Enterococcus* spp. Derived From Pig Slurry in Soils of Different Texture. *Applied Soil Ecology*. Vol 17:53-62.

CRITT, Centro Regional de Inovação e Transferência de Tecnologia/Universidade Federal de Juiz de Fora (2003). **Diagnóstico do Arranjo Produtivo da Suinocultura de Ponte Nova e Região**. UFJF: Juiz de Fora, 97 p.

DE PAOLI, F., BAUER, A., LEONHARTSBERGER, C., AMON, B., AMON, T. (2011). Utilization of by-products from ethanol production as substrate for biogas production, *Bioresource Technology*, Vol 102 (11): 6621-6624.

DIESEL, R.; MIRANDA, C. R.; PERDOMO, C. C. (2002). **Coletânea de tecnologias sobre dejetos suínos**. Boletim Informativo – BIPERS, Vol 10 (14):4-28.

ENERGISA, [www.energisa.com.br](http://www.energisa.com.br), (Consulta em: 08/2014).

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2012. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>.

(Consulta em: 06/2014).

FISCHER, E., SCHMIDT, T., HORA, S., GIERSDORF, J., STINNER, W., SCHOLWIN, F. (2010). Agro-industrial biogas in Kenya, Potentials, Estimates for Tariffs, Policy and Business Recommendations. Federal Ministry of Economics and Technology, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).

FLEMING, R., FORD, M. (2001). Humans versus Animals - Comparison of Waste Properties. Disponível em: [http://www.ridgetownc.uoguelph.ca/research/documents/fleming\\_huvsanim\\_0107.pdf](http://www.ridgetownc.uoguelph.ca/research/documents/fleming_huvsanim_0107.pdf).

(Consulta em: 04/2015).

IBGE, 2014a. Pesquisa Agrícola Municipal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pam/default.asp?o=28&i=P>, (Consulta em: 09/2014).

IBGE, 2014b. Pesquisa Pecuária Municipal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/ppm/default.asp?o=27&i=P>, (Consulta em: 09/2014).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário 2006**. Disponível em <http://www.sidra.ibge.gov.br>. (Consulta em:09/2014).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). IBGE Cidades. Disponível em:

<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/uf.php?lang=&coduf=31&search=minas-gerais>.

(Consulta em: 09/2014).

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY (IEA), **Key World Energy Statistics**,

Disponível

em:

<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2013.pdf>,

(Consulta em: 08/2014).

KTBL, (2014). Kuratorium fur Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft.

<http://daten.ktbl.de/euagrobiogasbasis/startSeite.do;jsessionid=B9227F8151EE276102038F7038DC3710?selectedAction=start> .

(Consulta em: 09/2014).

MALLIK, M.K., SINGH, U.K., AHMAD, N. (1990). Batch digester studies on biogas production from Cannabis sativa, water hyacinth and crop wastes mixed with dung and poultry litter, Biological Wastes, Vol 31(4): 315-319.

METCALF & EDDIE (1991) Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse. Mc Graw-Hill, New York.

MITCHELL JUNIOR, C.C. (1991). The value and use of poultry waste as a fertilizer. In: POULTRY by-product management handbook. Alabama: Auburn University, Cooperative Extensive Service (Circular ANR-244).

MURTHY, P. S., NAIDU M. M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review, Resources, Conservation and Recycling, Vol 66: 45-58.

NETTO, M. M. & DINIZ, A. M. A. (2005). A estagnação sócio-econômica da Zona da Mata de Minas Gerais: uma abordagem geohistórica. X Encontro de Geógrafos da América Latina, São Paulo. 9342-9367.

OLIVEIRA, P. A. V.; HIGARASHI, M. M.; NUNES, M. L. A. (2003). Efeito Estufa. Suinocultura Industrial, São Paulo, v. 25, n. 7, ed. 172, p. 16-20.

ORRICO JUNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A., LUCAS JUNIOR, J. (2011). Produção animal e o meio ambiente: uma comparação entre potencial de emissão

de metano dos dejetos e a quantidade de alimento produzido. Eng. Agríc. Vol.31 (2): 399-410.

OUEDRAOGO, N. S. (2013). Energy consumption and human development: Evidence from a panel cointegration and error correction model, Energy, Vol 63: 28-41.

PANTALEO, A., DE GENNARO, B., SHAH, N. (2013). Assessment of optimal size of anaerobic co-digestion plants: An application to cattle farms in the province of Bari (Italy), Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 20: 57-70.

PAULA, A. R. P. ; CRISTOVAO, E. C. ; MIRANDA, H. P. ; AMARAL, T. O. (2013). Vocaç o Energética na Zona da Mata Mineira. XIV Encontro de Geógrafos da América Latina, Lima – Peru.

PETERSSON, A., THOMSEN, M. H., HAUGGAARD-NIELSEN, H., THOMSEN, A. B. (2007). Potential bioethanol and biogas production using lignocellulosic biomass from winter rye, oilseed rape and faba bean, Biomass and Bioenergy, Vo 31 (11-12): 812-819.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD). Atlas do desenvolvimento humano no Brasil – 2013. Disponível em: <http://www.pnud.org.br/IDH/Default.aspx?indiceAccordion=1&li=li AtlasMunicipios>. (Consulta em: 09/2014).

RIAÑO, B., GARCÍA-GONZÁLEZ, M.C. (2015). Greenhouse gas emissions of an on-farm swine manure treatment plant – comparison with conventional storage in anaerobic tanks, Journal of Cleaner Production, Vol 103: 542-548.

SANTOS, F. A., QUEIRÓZ, J. H., COLODETTE, J. L., FERNANDES, S. A., GUIMARĂES, V. M., REZENDE, S. T.. (2012). Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. Química Nova, 35(5), 1004-1010.

SCARPIN, J. E., SLOMSKI, V. (2007). Estudo dos fatores condicionantes do  ndice de desenvolvimento humano nos municípios do estado do Paraná: instrumento de

controladoria para a tomada de decisões na gestão governamental. Rev. Adm. Pública. Vol.41 (5): 909-933.

SOUZA, S. N. M. (2001). Energia excedente de biomassa nas usinas de açúcar e álcool para produção de hidrogênio In:. IV Congresso Internacional de Ingeniería Agrícola. Vol 1: 131–133, Chillán.

SOUZA, S. N. M. de, SORDI, A., OLIVA, C. A. (2002). Potencial de energia primária de resíduos vegetais no Paraná: 4º Encontro de Energia no Meio Rural.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, Campinas.

SOUZA, C.F.; CARVALHO, C.C.S.; CAMPOS, J.A.; MATOS, A.T., FERREIRA, W.P.M. (2009). Caracterização de dejetos de suínos em fase de terminação. R. Ceres, Vol 56:128-133.

WARR, B.S., AYRES, R.U. (2010). Evidence of causality between the quantity and quality of energy consumption and economic growth, Energy, Vol 35 (4): 1688-1693.

## **CAPÍTULO 6**

# **POTENCIAL ENERGÉTICO DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA EM GRANJAS DE SUÍNOS E FRANGOS NA ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS**

**RESUMO:**

A avicultura e a suinocultura estão entre os segmentos que mais se destacam na agropecuária da Zona da Mata de Minas Gerais. De acordo com o IMA existem 241 granjas de suínos e 530 granjas de frango na região. As cadeias produtivas de suínos e frango de corte demandam muita energia e produzem uma grande quantidade de dejetos causadores de graves impactos ambientais. O aproveitamento do biometano produzido a partir da codigestão anaeróbia desses dejetos associados com resíduos de cultivos vegetais constitui uma alternativa para a sustentabilidade das granjas. Os objetivos deste trabalho foram avaliar o aproveitamento energético dos resíduos agropecuários por meio da codigestão anaeróbia de dejetos de suínos e frangos de corte com resíduos de cultivos vegetais em granjas da região. O dimensionamento energético e a análise da viabilidade econômica foram realizados com a ferramenta computacional SAUDADE. A energia gerada a partir do biometano atende a demanda da produção de suínos e frangos nas granjas havendo excedente que pode ser comercializado.

**Palavras-Chave:** suinocultura, avicultura, biometano

## 6.1. INTRODUÇÃO

### 6.1.1. GRANJAS DE SUÍNOS NA ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS

A suinocultura é uma grande geradora de emprego e renda no Brasil. Mais de 70% da produção de suínos é destinada ao processamento industrial, isso implica numa influência em outros setores da economia. O Brasil é o quarto maior produtor de suínos do mundo ficando atrás da China, União Europeia e Estados Unidos. A produção brasileira de carne suína no ano de 2012 foi de 3,488 milhões de toneladas, o que representou um crescimento de 2,65% em relação ao ano de 2011. Nos últimos anos o país se consolidou como um grande exportador mundial, as exportações alcançaram mais de 581 mil toneladas totalizando uma receita de US\$ 1,49 bilhão (ABIPECS, 2015). O estado de Minas Gerais possui o quarto maior efetivo de suínos do Brasil, ficando atrás de Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Paraná. A Zona da Mata é um dos principais polos de suinocultura independente do país e o segundo maior polo de suinocultura de Minas Gerais com 21,18% do rebanho efetivo do estado, atrás somente da mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (IBGE, 2014b).

A Figura 6.1 apresenta os polos produtores de suínos de Minas Gerais.

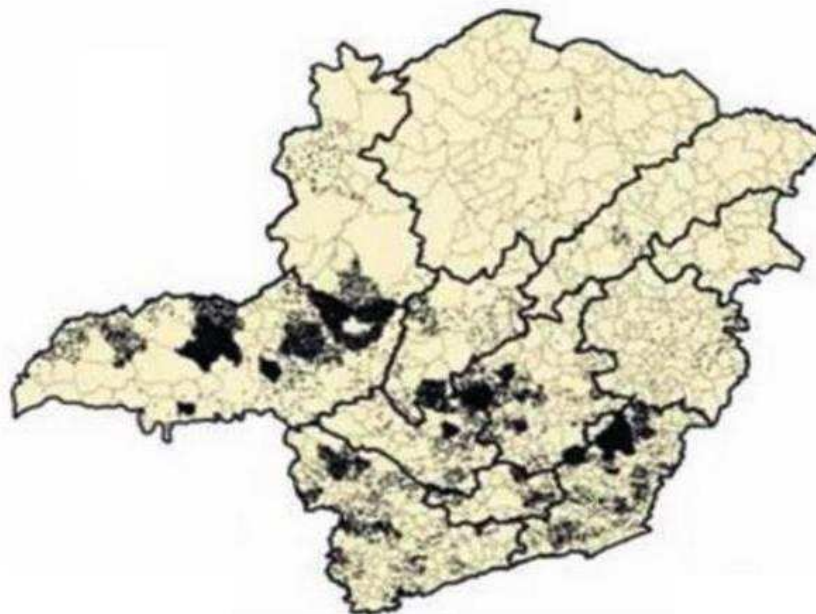


Figura 6.1 – Polos produtores de suínos no estado de Minas Gerais.  
Fonte: (GARCIA, *et al.*, 2005)

Predomina na região o suinocultor que possui até 500 matrizes, que tem faturamento anual inferior a R\$ 1 milhão, que emprega mão-de-obra assalariada e cuja administração da propriedade é feita por pessoas da família. Dentre os insumos necessários para produção, podem-se destacar os ingredientes para formulação das rações, medicamentos, genética, equipamentos, etc. (MOURA, 2004).

De acordo com o Cadastro de Suinocultores realizado pelo IMA, no ano de 2013 na Zona da Mata havia 241 granjas desenvolvendo a atividade da suinocultura. A Figura 6.2 apresenta o número de granjas em função do plantel de suínos.

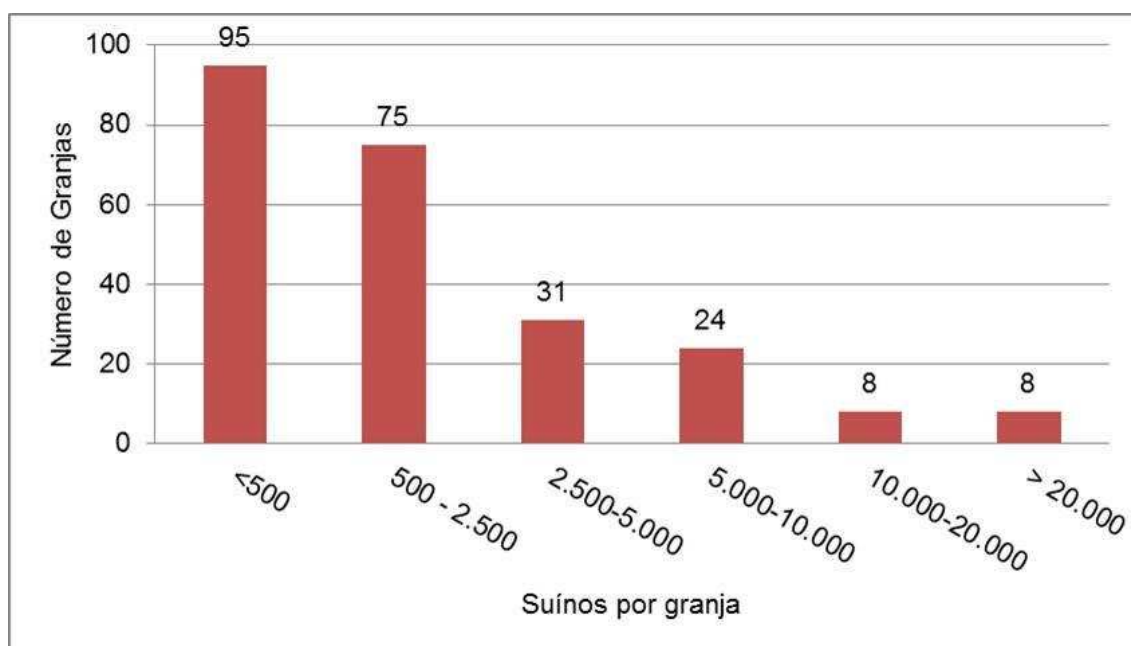


Figura 6.2 – Número de granjas em função do plantel de suínos no ano de 2013.

Fonte: (IMA, 2013a)

De acordo com dados da EMBRAPA e da CEMIG, cada suíno consome 4,70 kWh durante seu ciclo de produção (EMBRAPA, 2015; CEMIG, 2015).

### 6.1.2. GRANJAS DE FRANGOS NA ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS

A cadeia de produção de carne de aves no Brasil é altamente competitiva. O setor produziu, no ano de 2012, mais de 12,65 milhões de toneladas, o que situou a avicultura como o setor mais importante na produção de carne e manteve o país como o terceiro produtor mundial, precedido por Estados Unidos e China, respectivamente. O Brasil foi o maior exportador mundial de carne de frango, com

38,04% de participação, sendo esse produto o terceiro nas exportações do agronegócio brasileiro. A carne de frango brasileira chega a mais de 150 países em todos os continentes. As exportações de carne de frango encerraram 2012 com embarque de 3,92 milhões de toneladas. Uma soma de US\$ 7,7 bilhões à receita cambial. A avicultura brasileira, principalmente a de corte, é uma das atividades mais avançadas tecnologicamente o que a faz atingir níveis de produtividade comparados aos de países mais desenvolvidos no mundo. O impacto social da avicultura nacional é destacado, gerando mais de 3,6 milhões de empregos e respondendo por quase 1,5% do PIB nacional (UBABEF, 2015).

A região da Zona da Mata é o quarto maior polo de produção de frango de corte do estado de Minas Gerais. A atividade contribui de forma destacada para a economia da região e principalmente, permite inserir cerca de 530 produtores rurais, sendo 95% classificados como agricultores familiares.

A Figura 6.3 apresenta os polos produtores de frangos de Minas Gerais.

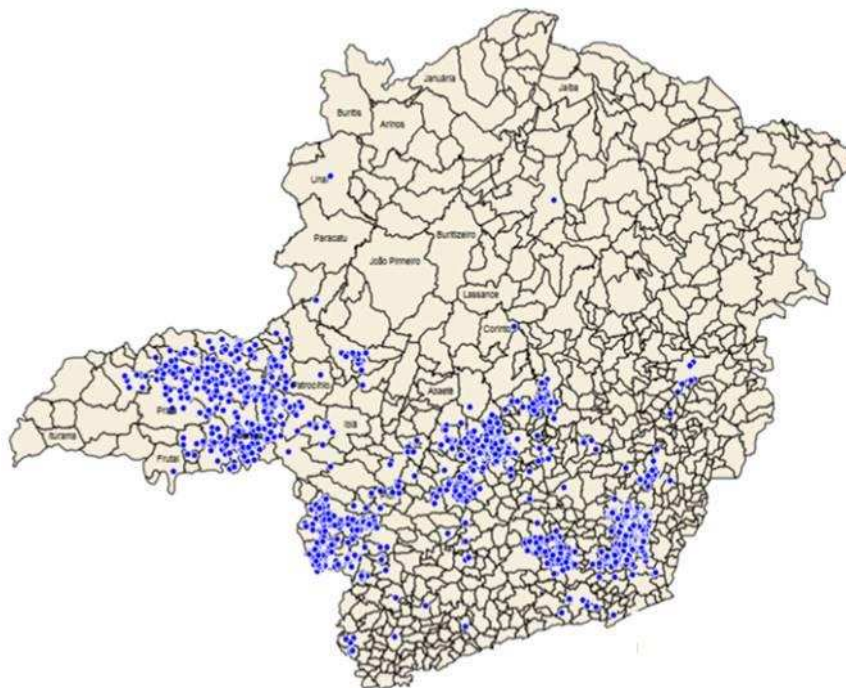


Figura 6.3 – Polos de produção de frango de corte no estado de Minas Gerais.

Fonte: (IMA, 2012)

A grande maioria dos agricultores da região possuem contratos na modalidade integração com uma unidade industrial de abate e processamento de carne de frango localizada no município de Visconde do Rio Branco. O produtor é

levado a assinar contratos de integração devido a uma série de razões como: (i) falta de capital próprio para investir na criação, embora muitas propriedades se utilizem da mão-de-obra familiar para minimizar custos de produção; (ii) opção de renda para a propriedade, pois além da venda do frango, o produtor usa ou vende a cama ou esterco que é produzido na propriedade; (ii) redução de custos para o frigorífico, visto que reduções no custo do frango vivo nas granjas impactam diretamente o custo da carne processada; e (iii) garantia de renda, dada a instabilidade do mercado de frango (RICHETTI e SANTOS, 2000).

De acordo com o Cadastro de Avicultores realizado pelo IMA, no ano de 2013 na Zona da Mata havia 530 granjas desenvolvendo a atividade da avicultura de corte. A Figura 6.4 apresenta o número de granjas em função do plantel de frangos.

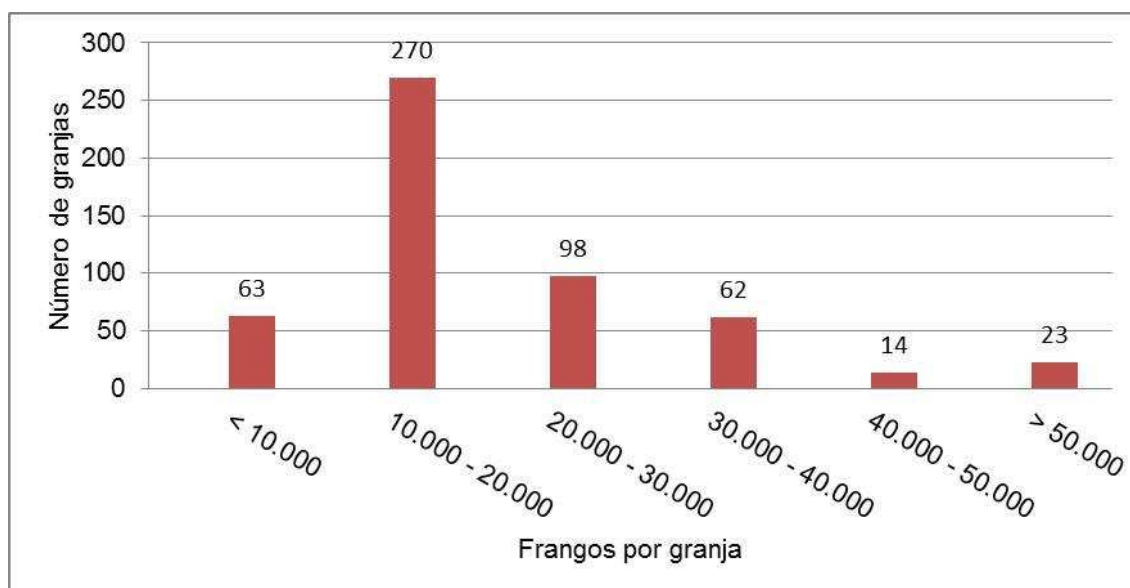


Figura 6.4 – Número de granjas em função do plantel de frangos.

Fonte: (IMA, 2013b)

De acordo com dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária e da Companhia Energética de Minas Gerais, cada frango consome 0,083 kWh durante seu ciclo de produção (EMBRAPA, 2015; CEMIG, 2015).

### 6.1.3. SUINOCULTURA, AVICULTURA E O MEIO AMBIENTE

A produção industrial de animais implica no confinamento de grandes rebanhos em áreas reduzidas. Isso ocorre com a suinocultura e avicultura na Zona

da Mata de Minas Gerais. O maior problema associado à estas atividades é a produção de dejetos e os riscos de contaminação ambiental. Uma das tecnologias para estabilização dos dejetos de suínos e frangos é a digestão anaeróbia. Uma vez que a relação carbono/nitrogênio (C/N) para dejetos animais é muito baixa para que o processo de digestão anaeróbia ocorra de forma eficiente, uma solução visando melhorar o processo de biodigestão anaeróbia e maximizar a produção de biogás é a codigestão de resíduos animais com resíduos vegetais. Esta sinergia positiva implica num maior rendimento de biometano (MATA-ALVAREZ *et al.*, 2000).

A gestão dos resíduos da suinocultura e da avicultura pode gerar energia por meio do biometano e também biofertilizante com o digestato resultante da codigestão anaeróbia. Com isso pode-se adicionar valor energético, agrônômico e econômico.

Os objetivos deste trabalho foram avaliar para granjas de suínos e frangos de corte localizadas em distintos municípios da região da Zona da Mata: (i) o potencial de produção de biometano a partir dos dejetos animais (suínos e frangos) e da codigestão de dejetos de animais com os resíduos vegetais disponíveis; (ii) o potencial de geração de energia elétrica a partir do biometano; (iii) o potencial de geração de biofertilizante; (iv) o potencial de geração de Certificados de Emissões Reduzidas (CER) de CO<sub>2</sub>; e (v) a viabilidade econômica do aproveitamento dos resíduos agropecuários.

## 6.2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a avaliação do potencial de geração de energia elétrica, biofertilizante e certificados de emissões reduzidas, bem como da viabilidade econômica de tal aproveitamento foi utilizada a ferramenta computacional SAUDADE (Sistema de Avaliação do Uso da Digestão Anaeróbia para o Dimensionamento Energético) conforme descrito no capítulo 4.

### 6.2.1. GRANJAS DE SUÍNOS

A avaliação das granjas de suínos foi realizada para os municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri que possuem granjas suícolas de pequeno, médio e grande porte.

A Figura 6.5 mostra a localização dos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri na Zona da Mata de Minas Gerais.

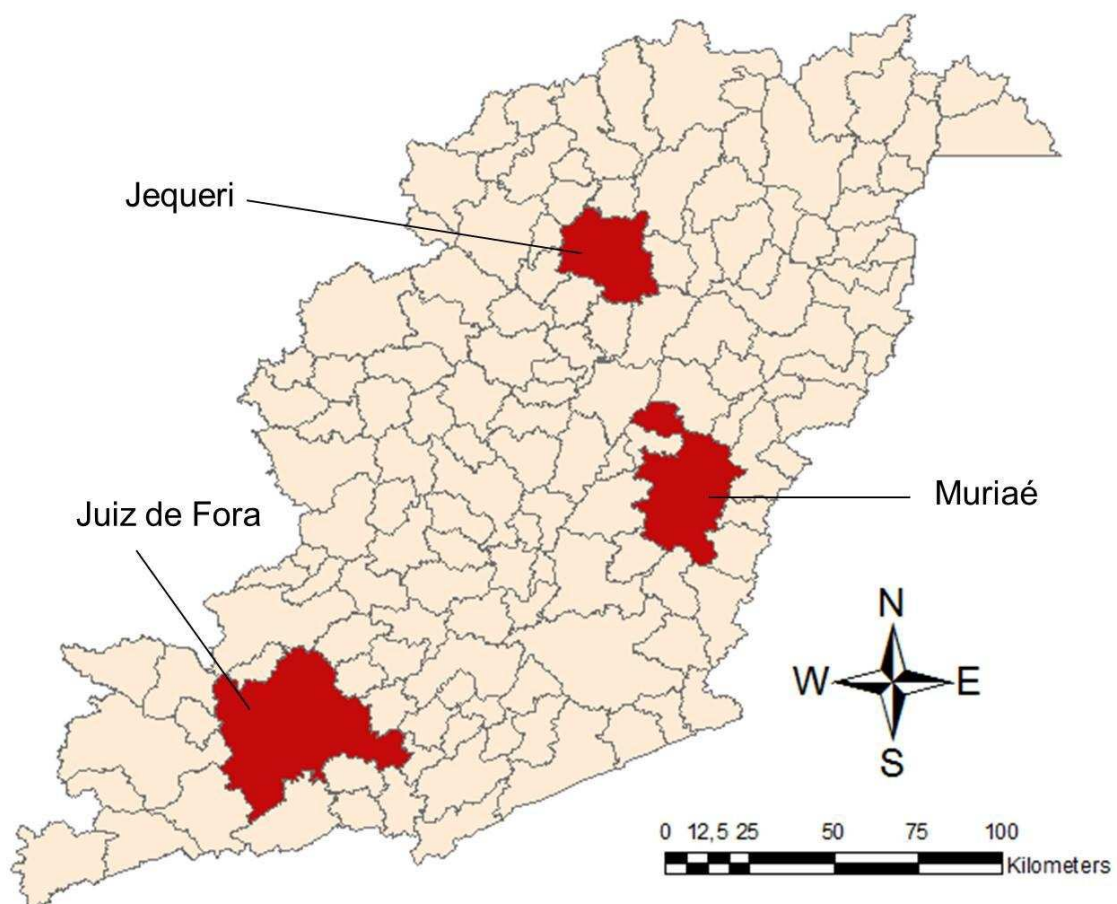


Figura 6.5 – Localização dos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri na Zona da Mata de Minas Gerais.

O Quadro 6.1 apresenta o rebanho efetivo e o plantel de suínos da maior granja dos municípios supracitados.

Quadro 6.1 – Rebanho efetivo e quantidade de suínos na maior granja do município no ano de 2012

Município	Rebanho Efetivo <sup>a</sup>	Plantel Maior Granja <sup>b</sup>
Muriaé	9.800	2.701
Juiz de Fora	44.500	27.552
Jequeri	155.768	62.456

Fonte: (<sup>a</sup>IBGE, 2014b e <sup>b</sup>IMA, 2013)

Para permitir a comparação entre dos três municípios, a simulação utilizando a ferramenta computacional SAUDADE considerou as quantidade de suínos nas granjas iguais a 500, 2.500, 5.000, 10.000, 25.000 e 60.000 animais. Esses valores se justificam considerando os plantéis de suínos disponíveis nas granjas dos municípios simulados.

O Quadro 6.2 apresenta informações referentes à área plantada e à produção dos cultivos de café, feijão, milho e cana-de-açúcar para os municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri referentes ao ano de 2012.

Quadro 6.2 – Área plantada e produção de café, feijão, milho e cana-de-açúcar dos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri no ano de 2012

Município	Cultivo							
	Café		Feijão		Milho		Cana	
	Área Plantada (ha)	Produção (t)	Área Plantada (ha)	Produção (t)	Área Plantada (ha)	Produção (t)	Área Plantada (ha)	Produção (t)
Muriaé	1.700	1.734	400	320	600	2.520	110	6.600
Juiz de Fora	15	11	170	120	380	1.482	170	8.500
Jequeri	3.000	5.400	200	100	1.000	3.500	1.000	60.000

Fonte: (IBGE, 2014a).

O consumo de energia elétrica para a produção de suínos foi calculado por meio da equação 6.1.

$$EE_{prod\ sui} = N_{sui} \times ee_{sui} \times n_{ciclos} \times 10^{-3} \quad (6.1)$$

em que:

$EE_{\text{prod sui}}$	- Consumo de energia elétrica na produção de suínos,	$MWh.ano^{-1}$ ;
$N_{\text{sui}}$	- Número de suínos na granja,	suíno;
$ee_{\text{sui}}$	- Consumo de energia elétrica por suíno,	$kWh.suíno^{-1}$ ;
$n_{\text{ciclos}}$	- Número de ciclos de criação por ano,	$ano^{-1}$ .

Considerou-se o ciclo de criação do suíno igual a 175 dias e o vazio sanitário igual a 8 dias (AMARAL e MORES, 2008). Logo em um ano existem 2 ciclos de criação de suínos.

### **6.2.2. GRANJAS DE FRANGOS DE CORTE**

A Figura 6.6 mostra a localização dos municípios de Miraf, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora na Zona da Mata de Minas Gerais.

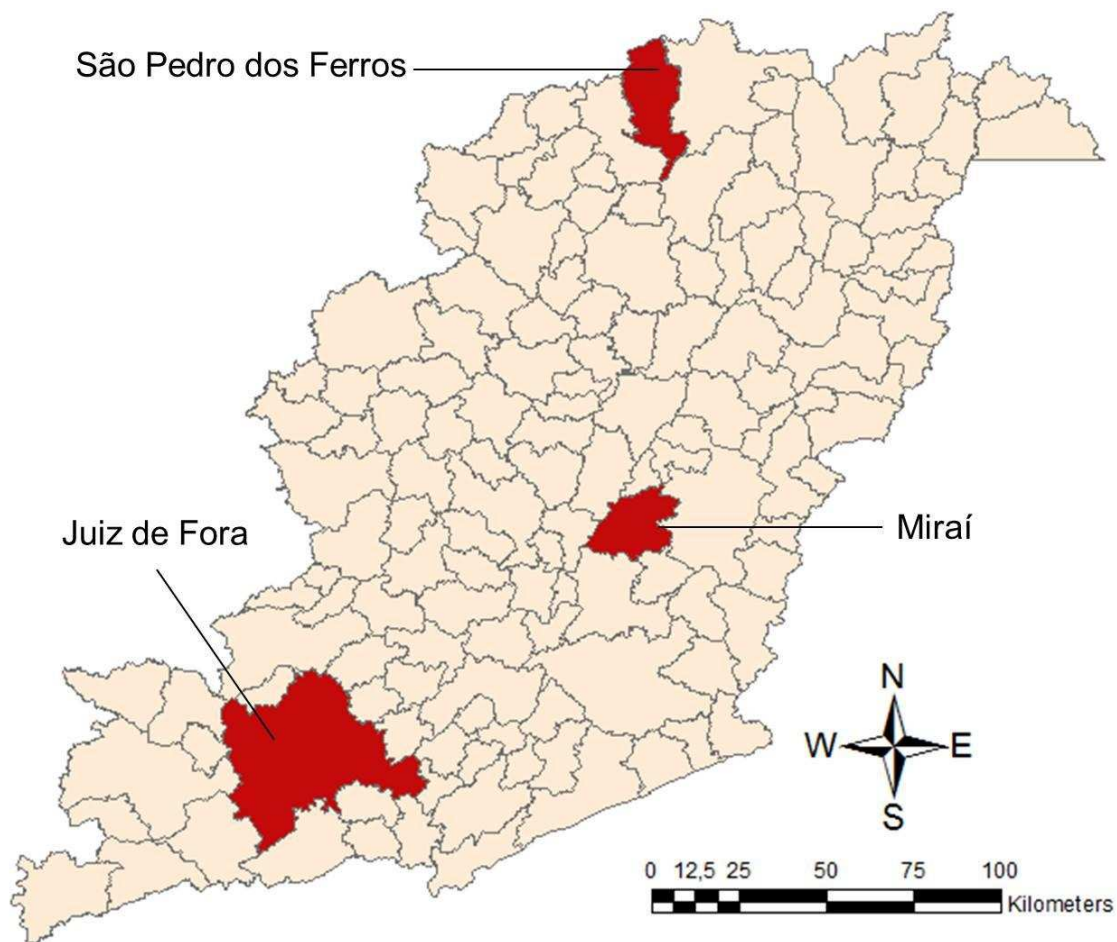


Figura 6.6 – Localização dos municípios de Miraf, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora na Zona da Mata de Minas Gerais.

A avaliação das granjas de frangos foi realizada para os municípios de Miraf, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora que possuem granjas avícolas de pequeno, médio e grande porte.

O Quadro 6.3 apresenta o rebanho efetivo e o plantel de frangos da maior granja dos municípios supracitados.

Quadro 6.3 – Rebanho efetivo e quantidade de frangos na maior granja do município no ano de 2012

Município	Rebanho Efetivo <sup>a</sup>	Plantel Maior Granja <sup>b</sup>
Miraf	144.341	32.000
S. Pedro dos Ferros	380.336	80.600
Juiz de Fora	220.000	150.000

Fonte: (<sup>a</sup>IBGE, 2014b e <sup>b</sup>IMA, 2013)

Para permitir a comparação entre dos três municípios, a simulação utilizando a ferramenta computacional SAUDADE considerou as quantidade de frangos nas granjas iguais a 10.000, 20.000, 30.000, 50.000, 80.000 e 150.000 animais.

O Quadro 6.4 apresenta informações referentes à área plantada e à produção dos cultivos de café, feijão, milho e cana-de-açúcar para os municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora referentes ao ano de 2012.

Quadro 6.4 – Área plantada e produção de café, feijão, milho e cana-de-açúcar dos municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora no ano de 2012

Município	Cultivo							
	Café		Feijão		Milho		Cana	
	Área Plantada (ha)	Produção (t)	Área Plantada (ha)	Produção (t)	Área Plantada (ha)	Produção (t)	Área Plantada (ha)	Produção (t)
Mirai	655	786	110	66	130	520	260	15.600
S. Pedro dos Ferros	30	24	366	284	450	2.025	3.270	281.220
Juiz de Fora	15	11	170	120	380	1.482	170	8.500

Fonte: (IBGE, 2014a).

O consumo de energia elétrica para a produção de frangos foi calculado por meio da equação 6.2.

$$EE_{prod\ fran} = N_{fran} \times ee_{fran} \times n_{ciclos} \times 10^{-3} \quad (6.2)$$

em que:

- $EE_{prod\ fran}$  - Consumo de energia elétrica na produção de frangos, MWh.ano<sup>-1</sup>;
- $N_{fran}$  - Número de suínos na granja, frango;
- $ee_{fran}$  - Consumo de energia elétrica por suíno, kWh.frango<sup>-1</sup>;
- $n_{ciclos}$  - Número de ciclos de criação por ano, ano<sup>-1</sup>.

O número de ciclos por ano foi calculado considerando-se um tempo médio de 45 dias para abate do frango e 15 dias de galpão vazio para o ingresso de um novo lote de pintinhos. Dessa forma em uma granja de frango ocorrem anualmente 6,1 ciclos de criação.

### 6.2.3. CENÁRIOS:

Os cenários simulados na ferramenta computacional SAUDADE para dimensionar o aproveitamento de resíduos agropecuários em granjas de suínos considerou: (i) o processo de conversão dos resíduos em metano (sem codigestão e com codigestão); (ii) as fontes de financiamento (recursos próprios ou empréstimo); e (iii) a forma de comercialização (preço da energia elétrica nos leilões ou preço da energia elétrica praticados pelas concessionárias da região). O Quadro 6.5 mostra os cenários que foram simulados:

Quadro 6.5 – Cenários simulados

<b>SEM CODIGESTÃO</b>		
<b>CENÁRIO</b>	<b>FINANCIAMENTO</b>	<b>COMERCIALIZAÇÃO</b>
1	Recursos Próprios	Energia Elétrica Leilões
2	Empréstimo	Energia Elétrica Leilões
3	Recursos Próprios	Energia Elétrica Concessionária
4	Empréstimo	Energia Elétrica Concessionária
5	Recursos Próprios	Energia Elétrica Leilões+Biofertilizante
6	Empréstimo	Energia Elétrica Leilões+Biofertilizante
7	Recursos Próprios	Energia Elétrica Concessionária+Biofertilizante
8	Empréstimo	Energia Elétrica Concessionária+Biofertilizante
<b>COM CODIGESTÃO</b>		
<b>CENÁRIO</b>	<b>FINANCIAMENTO</b>	<b>COMERCIALIZAÇÃO</b>
9	Recursos Próprios	Energia Elétrica Leilões
10	Empréstimo	Energia Elétrica Leilões
11	Recursos Próprios	Energia Elétrica Concessionária
12	Empréstimo	Energia Elétrica Concessionária
13	Recursos Próprios	Energia Elétrica Leilões+Biofertilizante
14	Empréstimo	Energia Elétrica Leilões+Biofertilizante
15	Recursos Próprios	Energia Elétrica Concessionária+Biofertilizante
16	Empréstimo	Energia Elétrica Concessionária+Biofertilizante

## 6.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.3.1. GRANJAS DE SUÍNOS

O Quadro 6.6 apresenta a massa de dejetos em função da quantidade de suínos nas granjas.

Quadro 6.6 – Estimativa da produção de dejetos suínos nas granjas simuladas

Quantidade de Suínos	Dejetos (t ano <sup>-1</sup> )
500	1.306,2
2.500	6.531,0
5.000	13.062,0
10.000	26.124,0
15.000	39.186,0
20.000	52.248,0
25.000	65.310,0
60.000	156.744,0

A carga poluidora dos dejetos de suínos produzidos anualmente no município de Muriaé corresponde à produzida em uma cidade com 31.360 habitantes. Para os municípios de Juiz de Fora e Jequeri, as cargas poluidoras dos dejetos equivalem às produzidas por cidades com 142.400 e 498.458 habitantes, respectivamente (IBGE, 2014b; FLEMING e FORD, 2001).

O Quadro 6.7 apresenta a massa de resíduos vegetais disponível nos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri.

Quadro 6.7 – Resíduos de cultivos vegetais disponíveis nos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri

Município	café (t ano <sup>-1</sup> )	feijão (t ano <sup>-1</sup> )	milho (t ano <sup>-1</sup> )	Bagaço de cana (t ano <sup>-1</sup> )	palha de cana (t ano <sup>-1</sup> )
Muriaé	780,3	440,4	255,6	316,8	462,0
Juiz de Fora	5,0	187,2	161,9	408,0	595,0
Jequeri	2.430,0	220,2	426,0	2.880,0	4.200,0

A Figura 6.7 apresenta a produção de biometano em granjas com 500, 2.500, 5.000, 10.000, 15.000, 20.000, 25.000 e 60.000 suínos localizadas nos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri considerando apenas os dejetos de suínos (sem

codigestão) e a codigestão com os resíduos vegetais disponíveis em cada município.

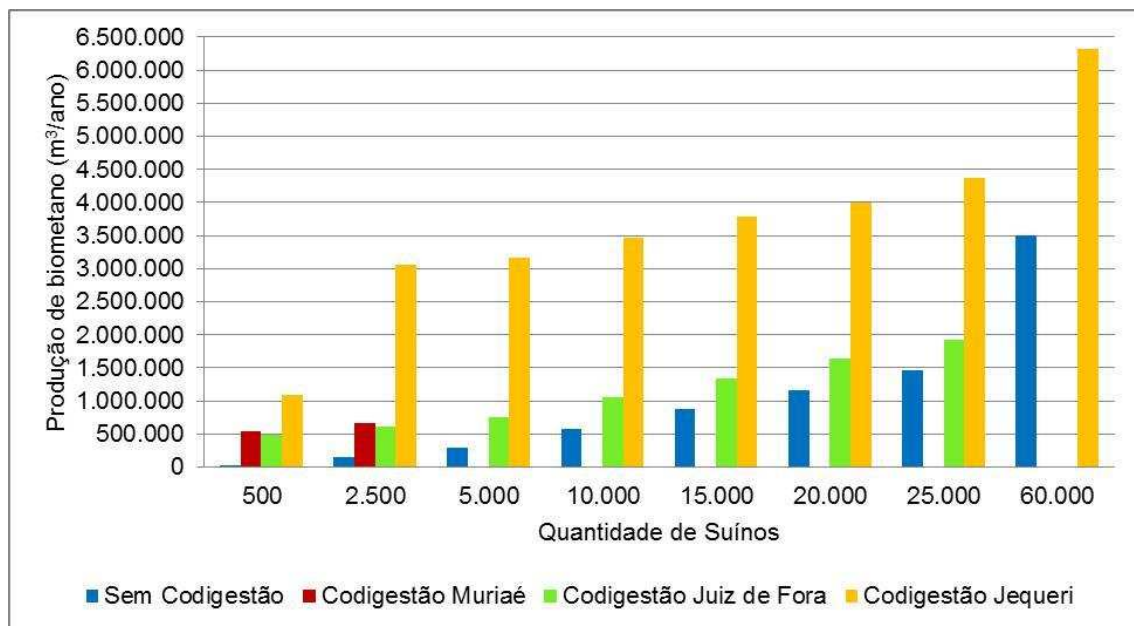


Figura 6.7 – Produção de biometano em granjas dos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri.

Existe um aumento significativo da produção de biometano com a codigestão de dejetos de suínos com os resíduos vegetais. As granjas localizadas no município de Jequeri apresentam maior produção de biometano quando comparadas às granjas dos municípios de Muriaé e Juiz de Fora. Isso se deve ao fato de possuir maior disponibilidade dos substratos que apresentam maior poder metanogênico.

Considerando que nos três municípios simulados existem granjas com plantéis de 500 e 2.500 suínos, foram apresentados os resultados para granjas com esses quantitativos.

As Figuras 6.8, 6.9 e 6.10 apresentam a produção de biometano por substrato para granjas com 500 suínos nos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri.

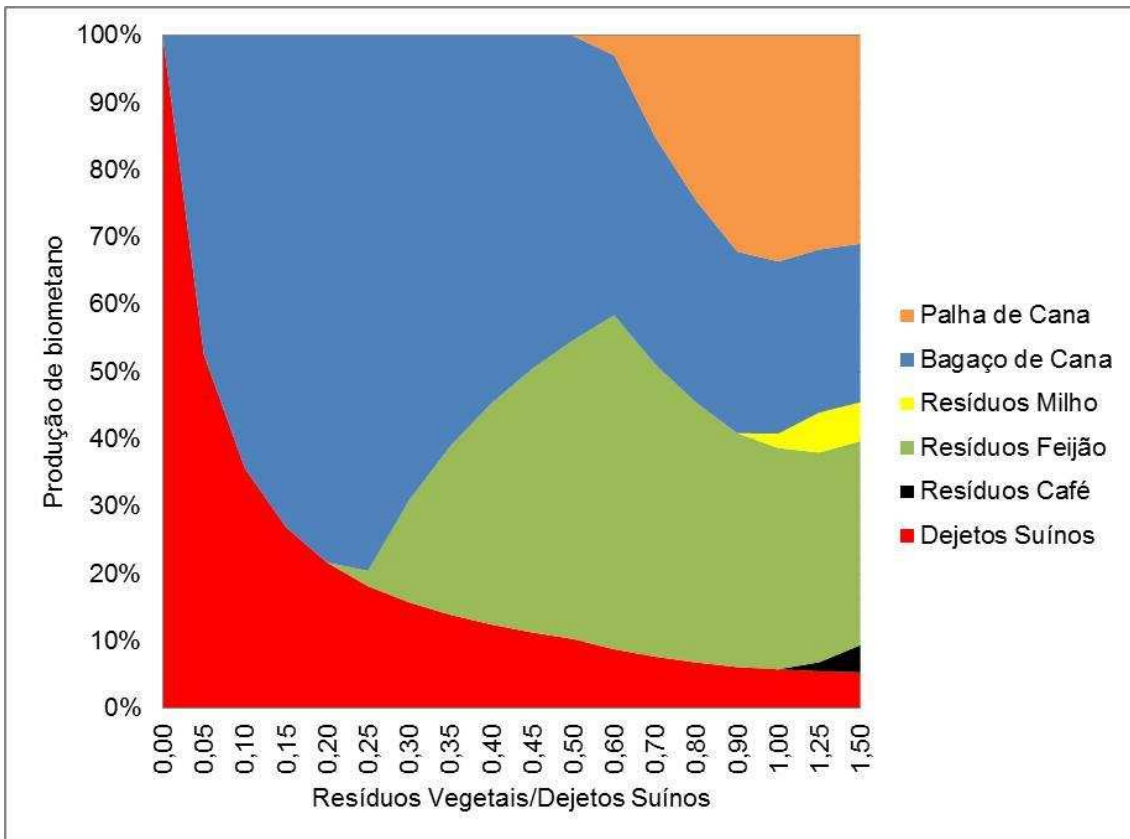


Figura 6.8 – Produção de metano por substrato para uma granja com 500 suínos no município de Muriaé.

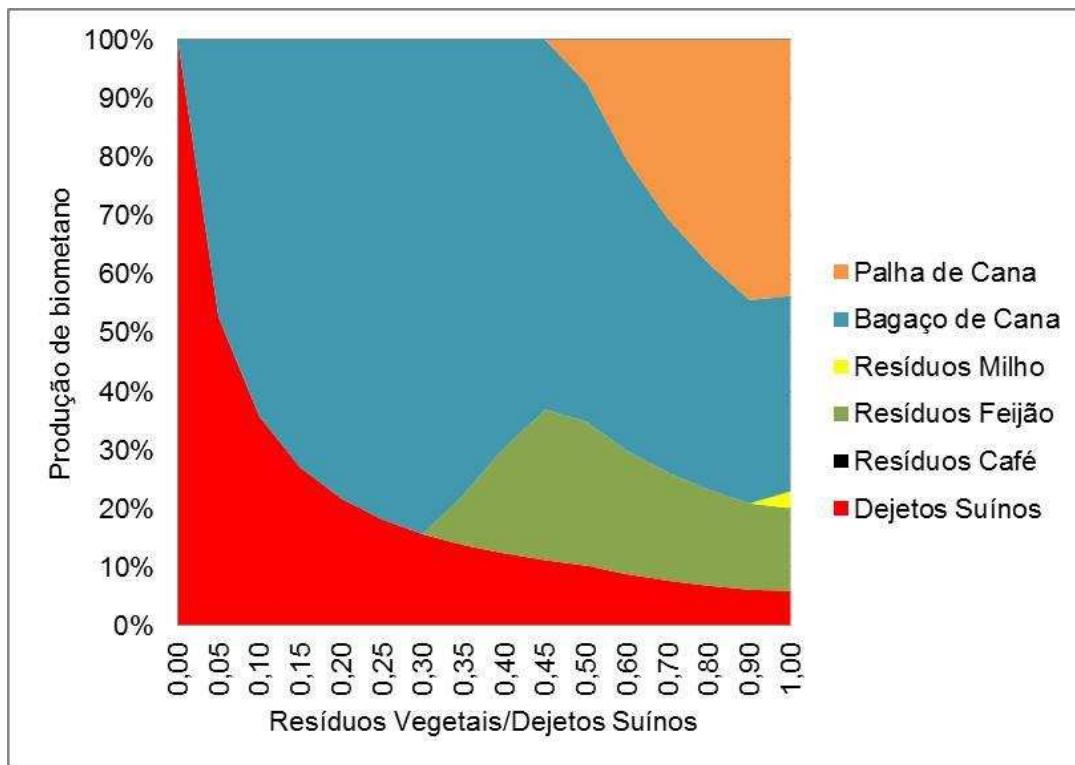


Figura 6.9 – Produção de metano por substrato para uma granja com 500 suínos no município de Juiz de Fora.

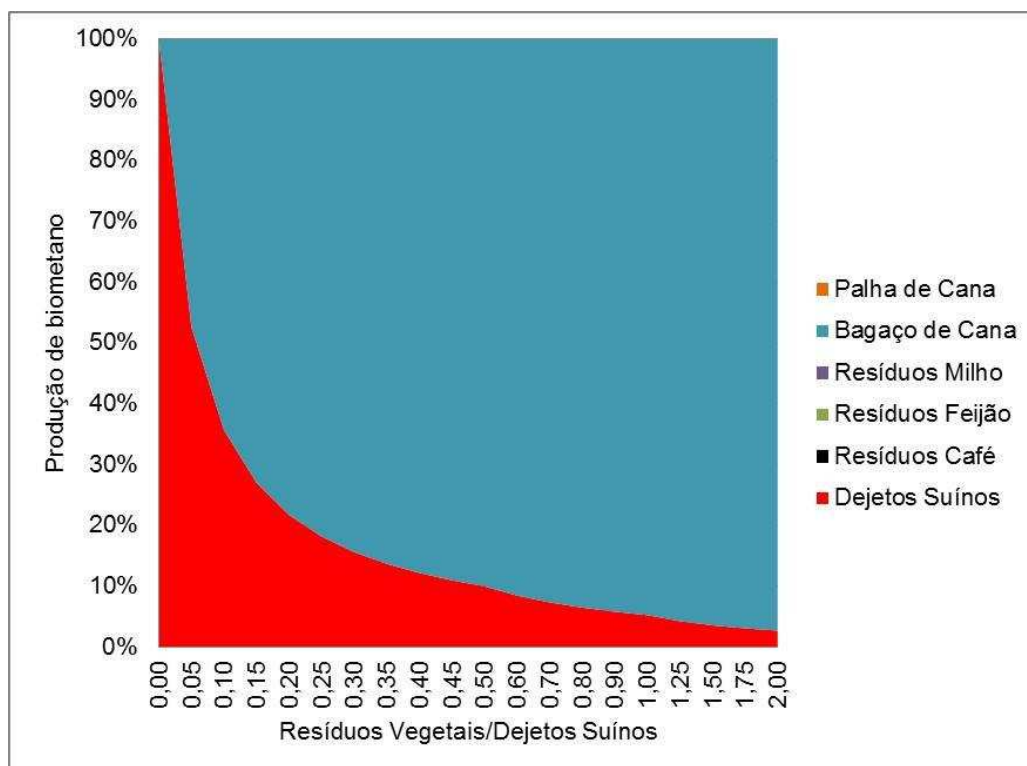


Figura 6.10 – Produção de metano por substrato para uma granja com 500 suínos no município de Jequeri.

A disponibilidade de resíduos vegetais define a porcentagem de mistura desses substratos na codigestão com os dejetos de suínos. No município de Muriaé a utilização de 86,88% dos resíduos vegetais disponíveis permite a codigestão a uma razão resíduos vegetais/dejetos de suínos igual 150%. No município de Juiz de Fora 92,26% dos resíduos vegetais disponíveis permite a codigestão a uma razão máxima de 100%. No município de Jequeri apenas 25,72% dos resíduos vegetais disponíveis permite simular a codigestão para uma razão resíduos vegetais/dejetos de suínos igual a 200%, com a utilização apenas do substrato bagaço de cana.

As Figuras 6.11, 6.12 e 6.13 apresentam a produção de biometano por substrato para granjas com 2.500 suínos nos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri.

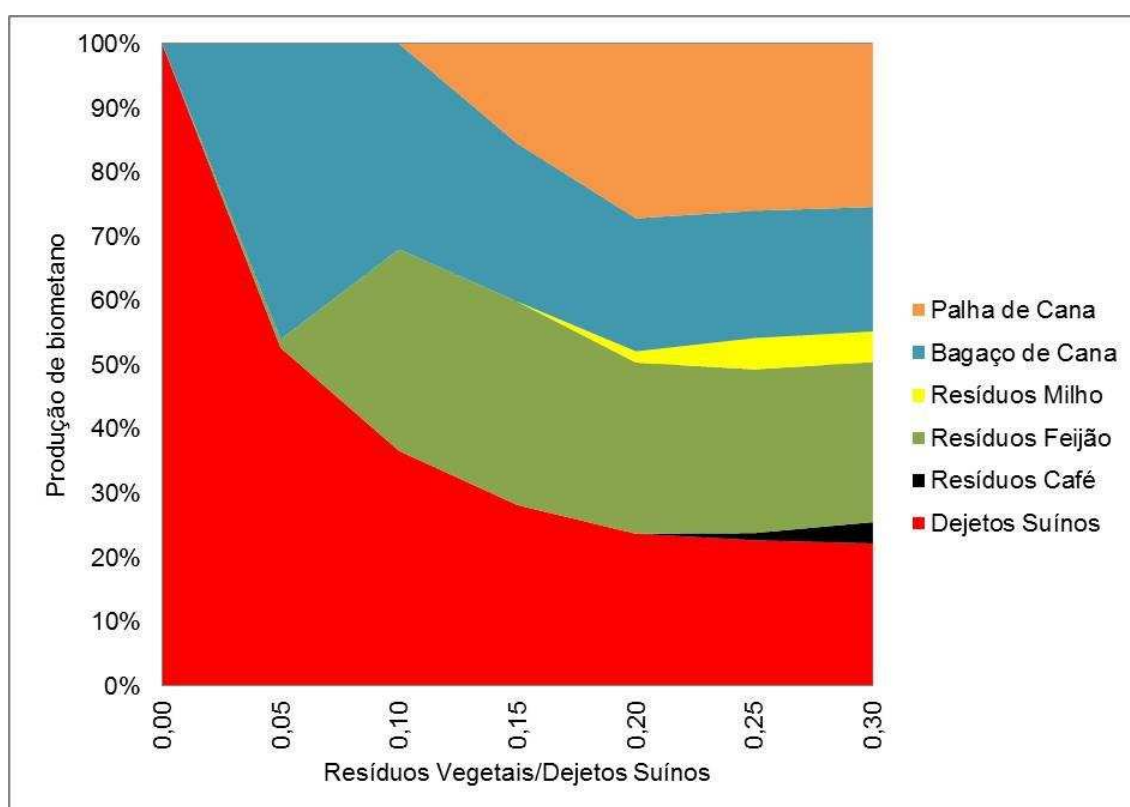


Figura 6.11 – Produção de metano por substrato para uma granja com 2.500 suínos no município de Muriaé.

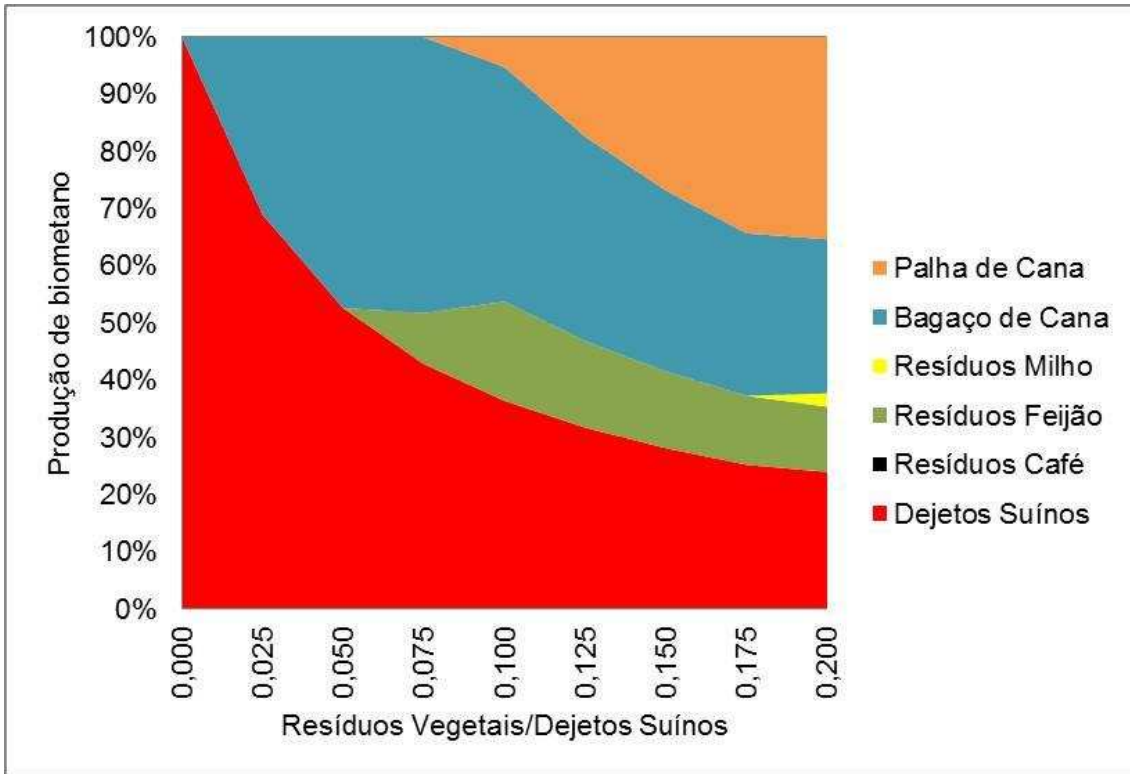


Figura 6.12 – Produção de metano por substrato para uma granja com 2.500 suínos no município de Juiz de Fora.

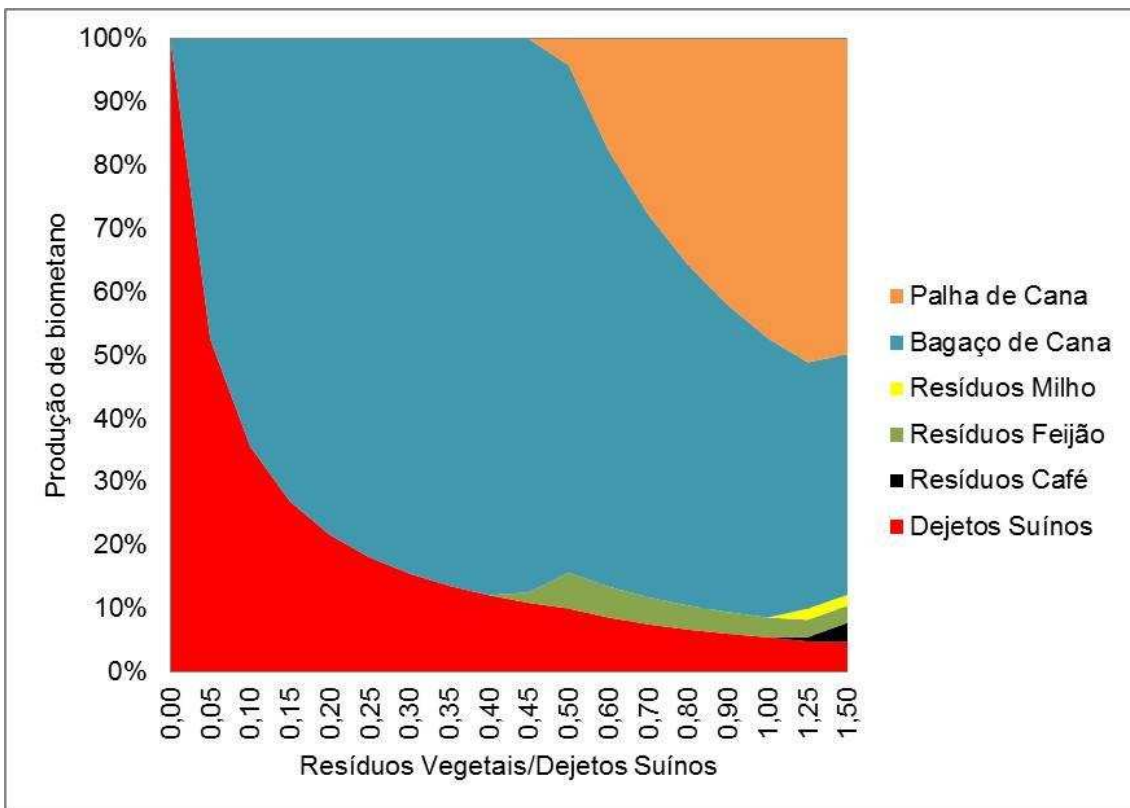


Figura 6.13 – Produção de metano por substrato para uma granja com 2.500 suínos no município de Jequeri.

No município de Muriaé a utilização dos mesmos 86,88% dos resíduos vegetais disponíveis permite a codigestão a uma razão resíduos vegetais/dejetos de suínos igual 30%. No município de Juiz de Fora 92,26% dos resíduos vegetais disponíveis permite a codigestão a uma razão máxima de 20%. No município de Jequeri, 96,46% dos resíduos vegetais disponíveis permite simular a codigestão para uma razão resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 150%, com a utilização de todos os tipos de resíduos vegetais disponíveis no município.

## POTÊNCIA ELÉTRICA E PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O Quadro 6.8 apresenta o consumo de energia elétrica para a produção de suínos nas granjas.

Quadro 6.8 – Consumo de energia elétrica para a produção de suínos

Número de suínos	Consumo de energia elétrica (MWh ano <sup>-1</sup> )
500	4,7
2.500	23,5
5.000	47,0
10.000	94,0
15.000	141,0
20.000	188,0
25.000	235,0
60.000	564,0

A Figura 6.14 apresenta a potência elétrica e a energia elétrica geradas a partir dos resíduos agropecuários em granjas com 500 e 2.500 suínos nos municípios de Muriaé e Juiz de Fora.

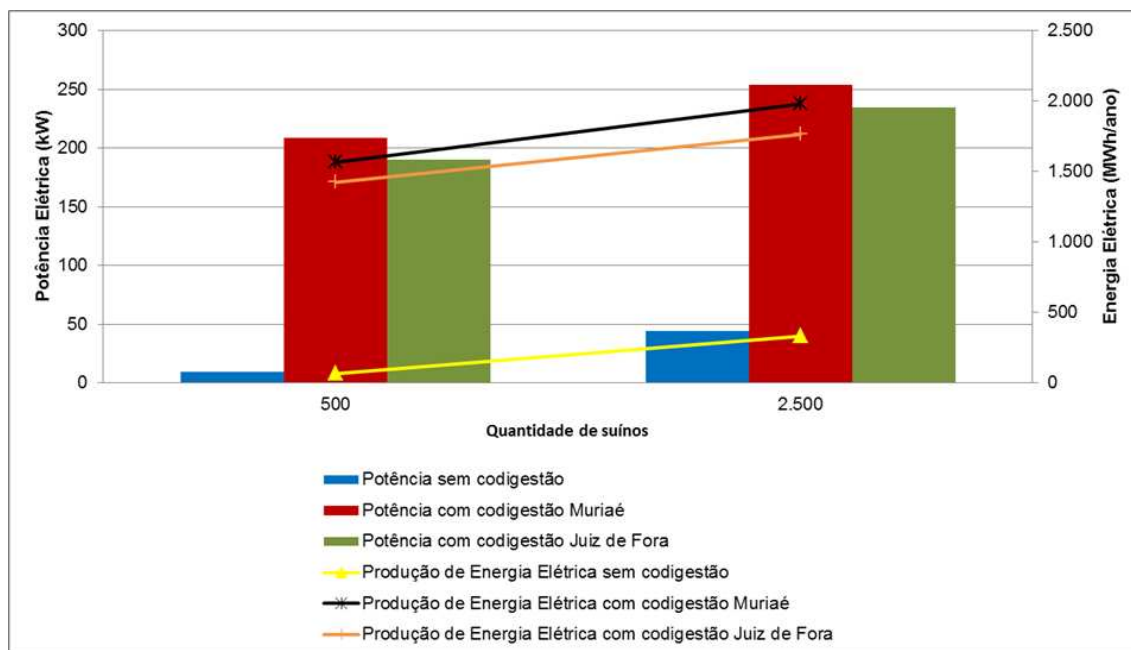


Figura 6.14 – Potência e energia elétrica gerada em granjas dos municípios de Muriaé e Juiz de Fora.

A potência elétrica e a eletricidade geradas são diretamente proporcionais à produção de biometano. Para granjas com 500 e 2500 suínos nos municípios de Muriaé e Juiz de Fora a potência elétrica gerada com o biometano obtido dos resíduos agropecuários varia entre 190 e 250 kW.

A Figura 6.15 apresenta a potência elétrica e a energia elétrica geradas em granjas com 500, 2.500, 5.000, 10.000, 15.000, 20.000, 25.000 e 60.000 suínos nos municípios de Juiz de Fora e Jequeri.

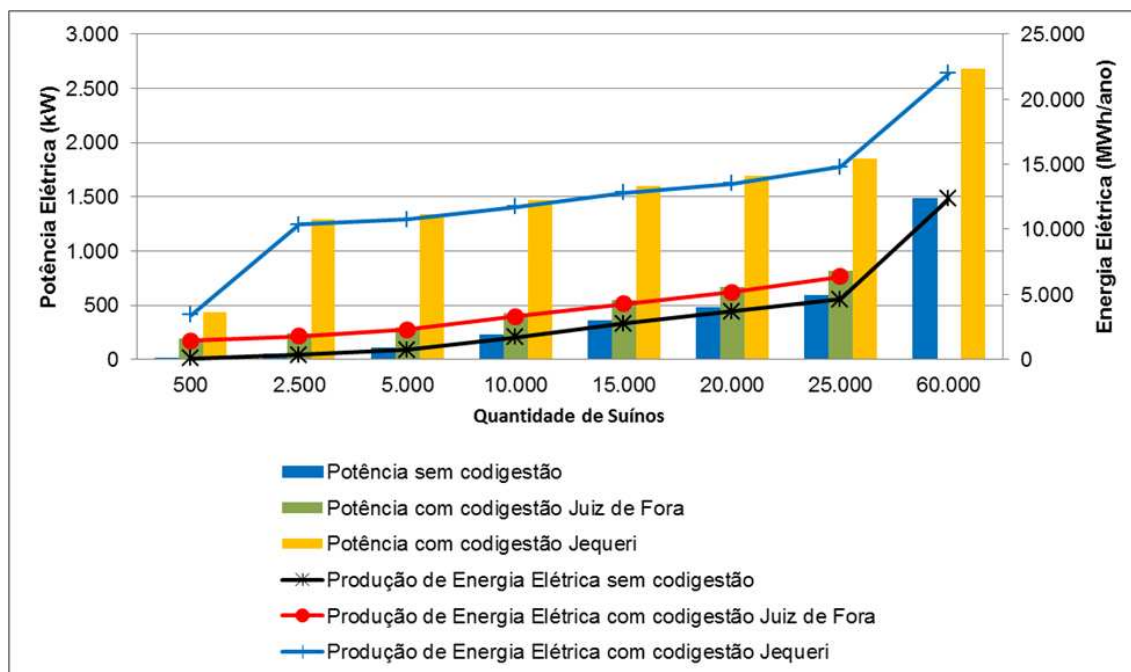


Figura 6.15 – Potência e energia elétrica gerada em granjas dos municípios de Juiz de Fora e Jequeri.

Para uma granja de 25.000 suínos a potência elétrica gerada com a codigestão no município de Juiz de Fora chega a 818 kW, enquanto numa granja com o mesmo plantel no município de Jequeri a potência chega a 1.851 kW. Isso se deve ao maior poder metanogênico dos resíduos vegetais disponíveis no município de Jequeri.

A granja com o maior plantel de suínos no município de Jequeri é capaz de gerar uma potência elétrica comparável às Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) que existem na região.

A eletricidade gerada é capaz de atender à demanda para a produção de suínos nas granjas havendo um grande excedente.

## PRODUÇÃO DE BIOFERTILIZANTE

A Figura 6.16 apresenta a massa de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) contida no digestato dos resíduos agropecuários nos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri, para granjas com 500 suínos.

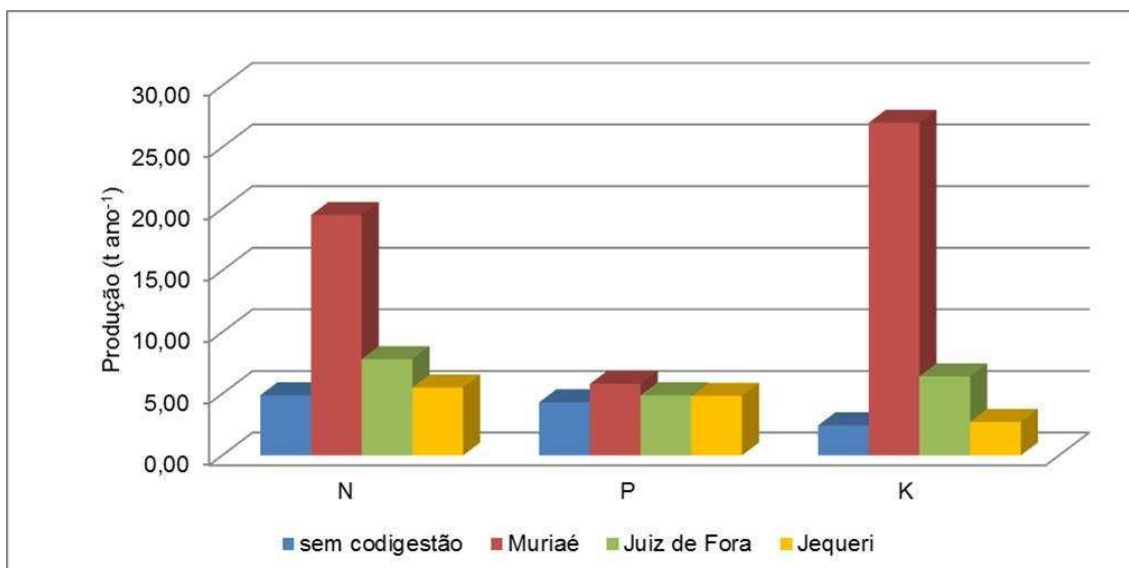


Figura 6.16 – Produção de biofertilizante em granja com 500 suínos nos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri.

O município de Muriaé se destaca na produção de biofertilizante, principalmente dos nutrientes nitrogênio (N) e potássio (K). Isso se deve principalmente a disponibilidade dos resíduos de café que apresentam um baixo poder metanogênico, mas em contrapartida uma boa concentração dos nutrientes N e K.

A Figura 6.17 apresenta a massa de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) contida no digestato dos resíduos agropecuários nos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri, para granjas com 2.500 suínos.

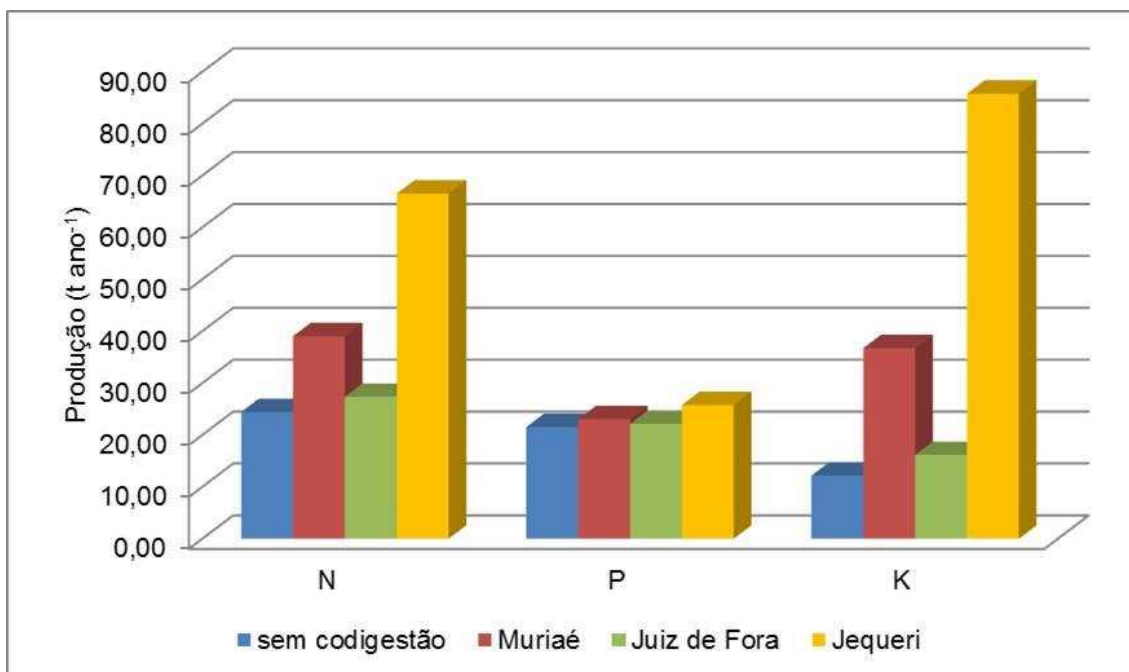


Figura 6.17 – Produção de biofertilizante em granja com 2.500 suínos nos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri.

Para a codigestão em uma granja com 2.500 suínos, a produção de biofertilizante no município de Jequeri suplanta os demais, com destaque para os nutrientes nitrogênio (N) e potássio (K). A justificativa se deve a grande quantidade de resíduos de café utilizada na codigestão.

## MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

A Figura 6.18 apresenta o potencial de toneladas de dióxido de carbono que podem ser mitigadas com a geração de energia elétrica a partir da codigestão dos resíduos agropecuários nas granjas de suínos dos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri.

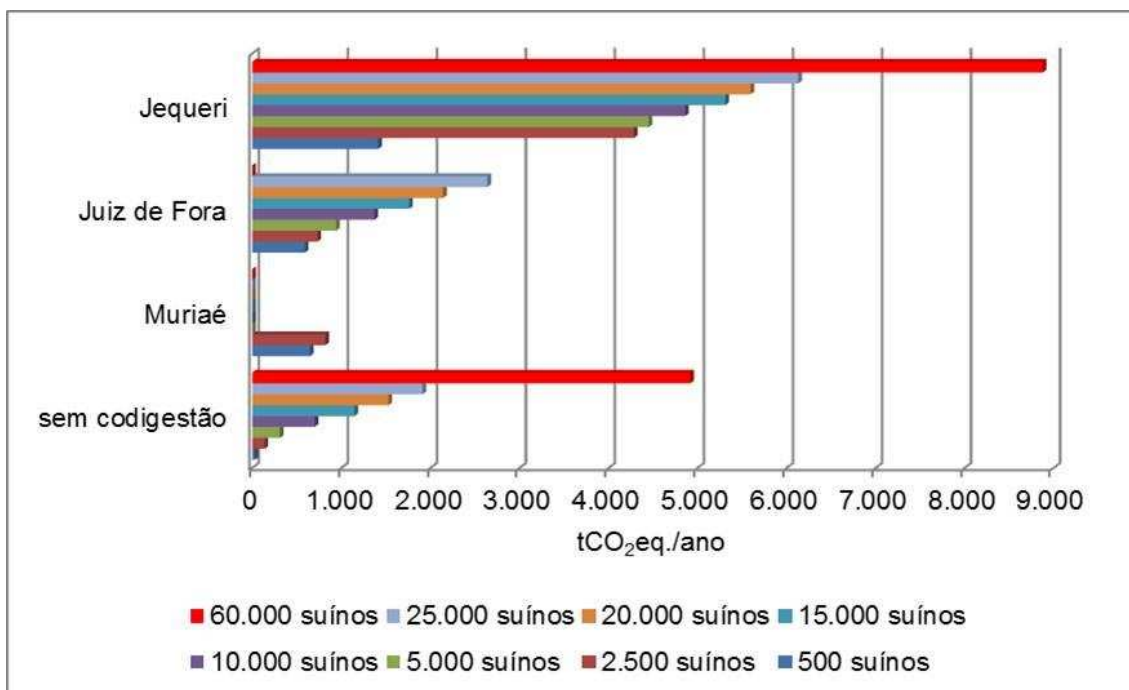


Figura 6.18 – Potencial de toneladas de dióxido de carbono para granjas de suínos nos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri.

O potencial de toneladas equivalente de dióxido de carbono (tCO<sub>2</sub>eq.) mitigadas é diretamente proporcional a geração de eletricidade e consequentemente ao poder metanogênico dos resíduos disponíveis nos municípios em que se encontram as granjas.

A intensidade de emissão média de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>eq.) da carne suína é de 6,1 kg de CO<sub>2</sub>eq./kg de carcaça, sendo produção de ração para os animais e a gestão dos dejetos respondendo pela maior parte das emissões (MACLEOD, *et al.*, 2013). O peso médio da carcaça suína produzida em Minas Gerais no ano de 2012 foi de 88,1 kg (MINAS GERAIS, 2015a). O Quadro 6.9 apresenta as emissões totais para as granjas de suínos simuladas e a equivalente mitigação representada pelo aproveitamento dos resíduos agropecuários por meio da geração de energia elétrica.

Quadro 6.9 – Emissão e mitigação de CO<sub>2</sub>eq. com geração de eletricidade

Número de suínos	Emissão de CO <sub>2</sub> eq. (tCO <sub>2</sub> eq./ano)	Mitigação com geração de eletricidade (tCO <sub>2</sub> eq./ano)			
		Sem codigestão	Codigestão nas granjas		
			Muriaé	Juiz de Fora	Jequeri
500	537	28	649	591	1.416
2.500	2.687	138	821	731	4.288
5.000	5.374	310	0	942	4.451
10.000	10.748	700	0	1.372	4.861
15.000	16.122	1.147	0	1.762	5.312
20.000	21.496	1.530	0	2.144	5.597
25.000	26.871	1.912	0	2.641	6.132
60.000	64.489	4.919	0	0	8.877

A energia elétrica gerada a partir do biometano produzido apenas com os dejetos de suínos não é capaz de compensar as emissões de CO<sub>2</sub> em todo o ciclo de produção da carne de porco. O maior percentual de mitigação com aproveitamento somente de dejetos animais, 7,63%, corresponde a granjas com plantel de 60.000 suínos. Em granjas com 500 suínos nos três municípios simulados a geração de eletricidade com o biometano da codigestão dos resíduos agropecuários é capaz de compensar as emissões de CO<sub>2</sub> na cadeia de produção de suínos. Em granjas com 2.500 suínos localizadas no município de Jequeri seriam capazes de mitigar as emissões de CO<sub>2</sub>. Para os demais plantéis de suínos e em todos os municípios simulados a geração de eletricidade mitiga uma fração das emissões de CO<sub>2</sub> da produção da carne suína. É importante observar que essa mitigação diz respeito a apenas ao aproveitamento energético dos resíduos. A cadeia produtiva da suinocultura é formada por outros elos emissores de dióxido de carbono.

Devido o custo de transação de projetos de geração de créditos de carbono ser extremamente elevado a geração de receitas a partir dos Certificados de Emissões Reduzidas (CER) não foi considerada na análise econômica dos empreendimentos.

## ANÁLISE ECONÔMICA

A Figura 6.19 apresenta os custos de produção de energia elétrica sem codigestão e com codigestão em granjas com 500, 2.500, 5.000, 10.000, 15.000, 20.000, 25.000 e 60.000 suínos nos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri comparados com o valor pago pela energia elétrica gerada a partir do biogás nos leilões de energia nova da ANEEL e as tarifas praticadas pelas concessionárias de energia na região da Zona da Mata de Minas Gerais.

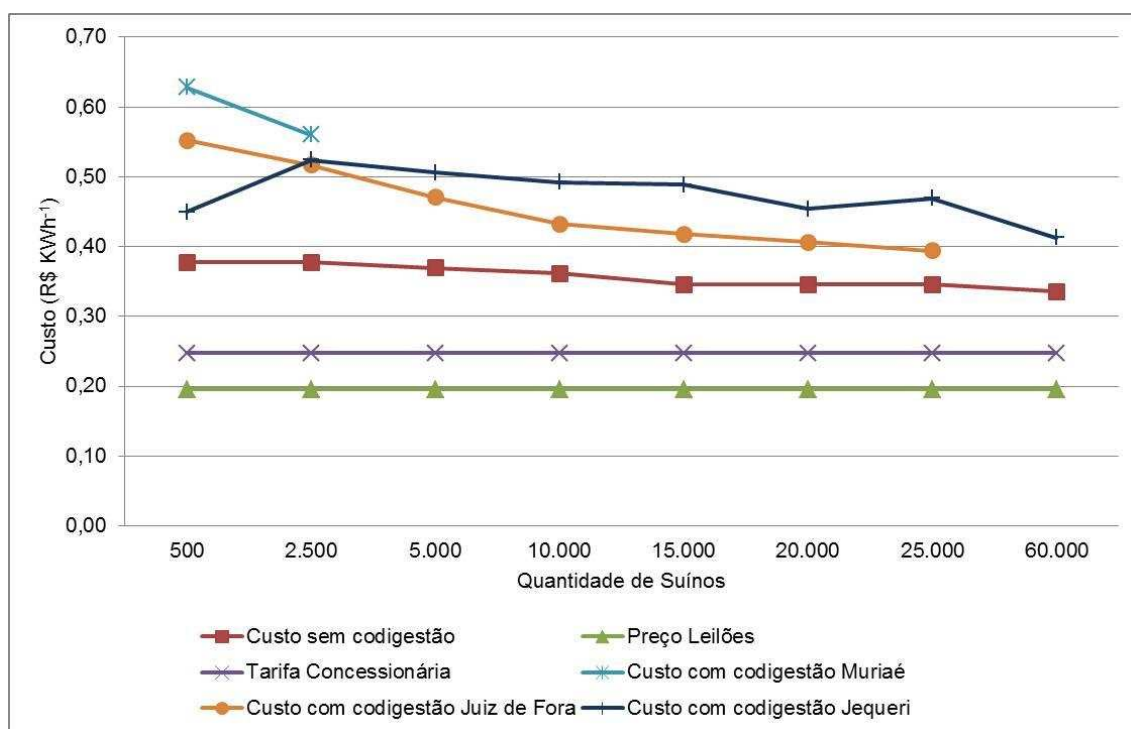


Figura 6.19 – Custo de produção de energia elétrica com codigestão de resíduos agropecuárias em granjas com 500, 2.500, 5.000, 10.000, 15.000, 20.000, 25.000 e 60.000 suínos nos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri.

Os custos de produção de energia elétrica são superiores ao valor pago nos leilões de energia nova da ANEEL e à tarifa praticada pelas concessionárias na região. A geração de eletricidade apenas com os dejetos de suínos apresenta custos menores uma vez que não existe gastos com o transporte e processamento de resíduos vegetais. Os custos de produção de energia elétrica com a codigestão é diretamente proporcional à massa de resíduos vegetais utilizada e inversamente proporcional ao poder metanogênico desses resíduos. Dessa forma o custo da

geração de energia elétrica para uma granja com 500 suínos no município de Muriaé é maior devido a grande massa de resíduos de café, representando 14,84% da massa de resíduos (suínos e vegetais) empregada na codigestão. Para granjas com 2.500 suínos o custo diminui uma vez que a participação de resíduos com pequeno poder metanogênico como os de café é menor, 5,71%. Já para o município de Jequeri o custo de geração em granjas com 2.500 suínos é maior que para granjas com 500 suínos, mais uma vez isso se justifica pela massa e poder metanogênico dos resíduos vegetais utilizados na codigestão. Em granjas com 500 suínos não são empregados resíduos de café na codigestão enquanto para granjas com 2.500 suínos o percentual desses resíduos é de 12,68%. Dentre os municípios simulados Juiz de Fora apresenta os menores custos de geração de energia elétrica para granjas com 2.500, 5.000, 10.000, 15.000, 20.000 e 25.000 suínos. Isso se deve ao fato da participação dos resíduos vegetais diminuir de 16,67% para 2,03% do total empregado na codigestão.

## **VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)**

Foi calculado o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 1 a 8 dos empreendimentos de aproveitamento de dejetos de suínos (sem codigestão). Os resultados são válidos para todos os municípios simulados (Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri) uma vez que a produção de energia elétrica e biofertilizante depende somente da quantidade de suínos.

A Figura 6.20 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para empreendimentos de aproveitamento de dejetos de suínos (sem codigestão) em granjas com 500, 2.500, 5.000 e 10.000 animais. Foram simulados os cenários de 1 a 8.

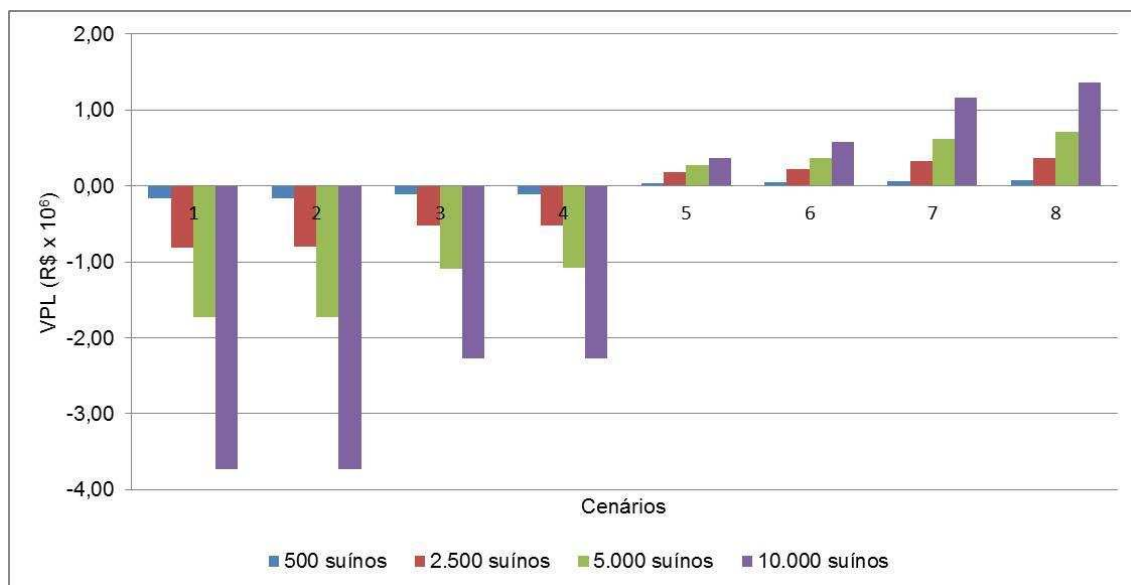


Figura 6.20 – VPL para os cenários sem codigestão em granjas com 500, 2.500, 5.000 e 10.000 suínos.

Para os cenários 1, 2, 3 e 4 em que se comercializa apenas a energia elétrica gerada a partir do biometano a valores dos leilões de energia e da tarifa das concessionárias, com financiamento dos empreendimentos com recursos próprios e por meio de empréstimos não há viabilidade econômica, ou seja,  $VPL < 0$ .

Para os cenários 5, 6, 7 e 8 em que se comercializam a energia elétrica gerada a partir do biometano a valores dos leilões de energia e da tarifa das concessionárias e o biofertilizante, com financiamento dos empreendimentos com recursos próprios ou por meio de empréstimos existe viabilidade econômica, ou seja,  $VPL > 0$ . Quanto maior a quantidade de suínos nas granjas maior é o Valor Presente Líquido (VPL). A comercialização do biofertilizante é determinante para a viabilidade econômica dos empreendimentos de geração de energia elétrica sem codigestão.

Nos cenários 5 e 6, em que a energia elétrica é comercializada aos preços praticados nos leilões de energia nova, o biofertilizante responde por mais da metade da receita obtida.

Nos cenários 7 e 8, em que a energia elétrica é comercializada aos valores das tarifas praticadas pelas concessionárias, o biofertilizante responde por mais da metade da receita em granjas com 500 e 2.500 suínos. Nas granjas com 5.000 e 10.000 suínos o valor obtido com a comercialização do biofertilizante responde 48,42% e 45,37%, respectivamente.

A Figura 6.21 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para empreendimentos de aproveitamento de dejetos de suínos (sem codigestão) em granjas com 15.000, 20.000, 25.000 e 60.000 animais. Foram simulados os cenários de 1 a 8.

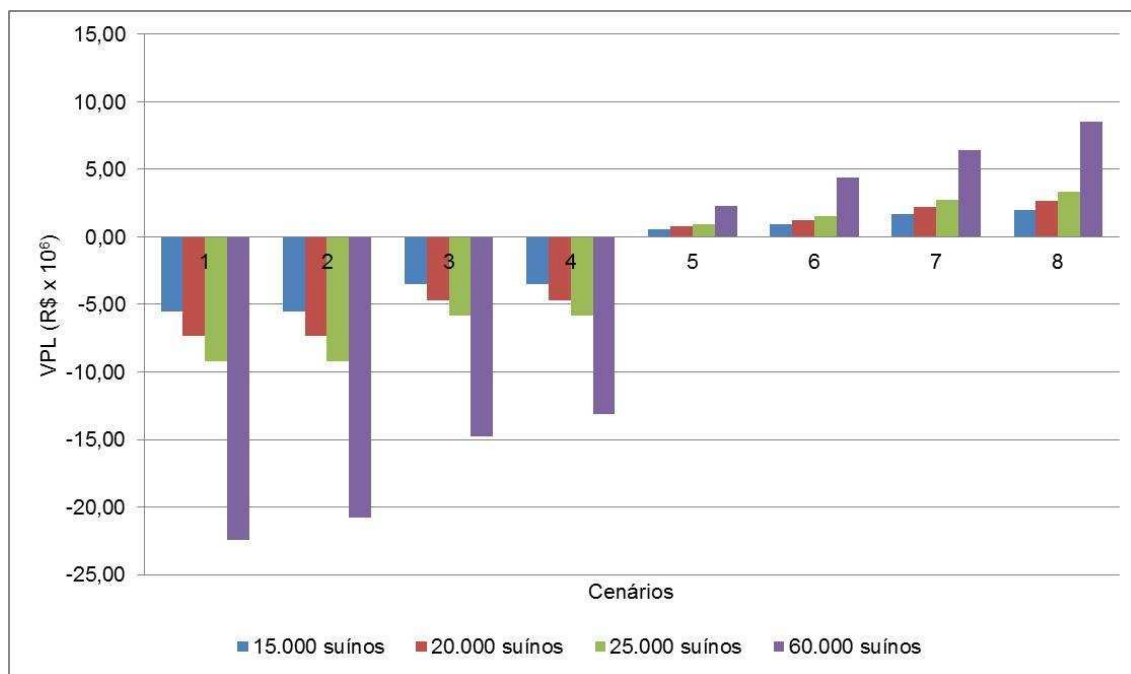


Figura 6.21 – VPL para os cenários sem codigestão em granjas com 15.000, 20.000, 25.000 e 60.000 suínos.

Para os cenários 1, 2, 3 e 4 em que se comercializa apenas a energia elétrica gerada a partir do biometano a valores dos leilões de energia e da tarifa das concessionárias, com financiamento dos empreendimentos com recursos próprios e por meio de empréstimos não há viabilidade econômica, ou seja,  $VPL < 0$ .

Para os cenários 5, 6, 7 e 8 em que se comercializam a energia elétrica gerada a partir do biometano a valores dos leilões de energia e da tarifa das concessionárias e o biofertilizante, com financiamento dos empreendimentos com recursos próprios ou por meio de empréstimos existe viabilidade econômica, ou seja,  $VPL > 0$ . Quanto maior a quantidade de suínos nas granjas maior é o Valor Presente Líquido (VPL). A comercialização do biofertilizante é determinante para a viabilidade econômica dos empreendimentos de geração de energia elétrica sem codigestão.

Nos cenários 5 e 6, em que a energia elétrica é comercializada aos preços praticados nos leilões de energia nova, o biofertilizante responde 49,97% da receita

em granjas com 15.000 e 20.000 suínos. Para as granjas com 25.000 e 60.000 suínos a porcentagem da receita devida a comercialização do biofertilizante é de 49,76% e 48,24%, respectivamente.

Nos cenários 7 e 8, em que a energia elétrica é comercializada aos valores das tarifas praticadas pelas concessionárias, o biofertilizante responde 44,16% da receita em granjas com 15.000 e 20.000 suínos. Para as granjas com 25.000 e 60.000 suínos a porcentagem da receita devida a comercialização do biofertilizante é de 43,95% e 43,07%, respectivamente.

A seguir são apresentados o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16 dos empreendimentos em que ocorre a codigestão de dejetos de suínos com resíduos vegetais.

A Figura 6.22 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para empreendimentos de codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 5% em granjas com 500 animais dos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri.

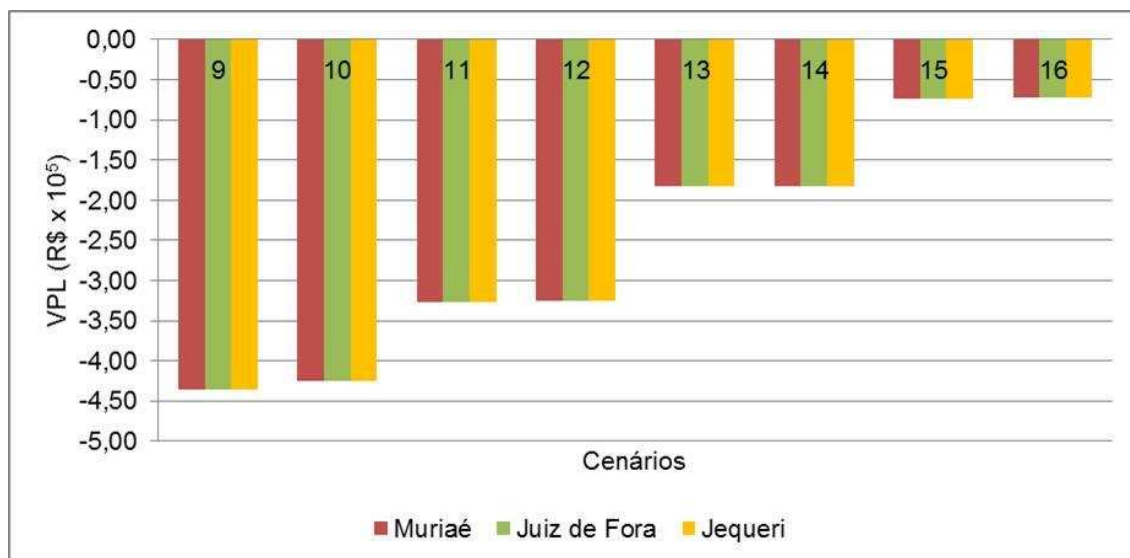


Figura 6.22 – VPL para os cenários com codigestão em granja com 500 suínos com razão resíduos vegetais/dejetos de suínos igual a 5%.

Na simulação para granjas com 500 suínos e razão resíduos vegetais/dejetos de suínos igual a 5%, os cenários 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16 apresentam o mesmo valor para o VPL. Isso se deve ao fato de que as variáveis utilizadas na análise econômica serem idênticas para os três municípios simulados. Todos os cenários são inviáveis economicamente nos três municípios (VPL<0).

A Figura 6.23 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para empreendimentos de codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 5% em granjas com 2.500 animais dos municípios de Muriaé, Juiz de Fora e Jequeri.

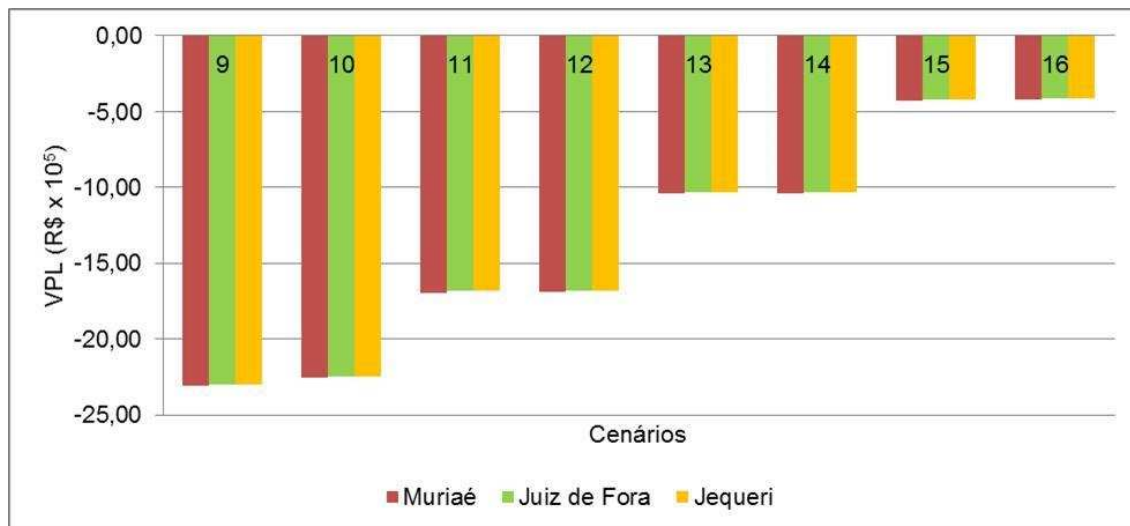


Figura 6.23 – VPL para os cenários com codigestão em granja com 2.500 suínos com razão resíduos vegetais/dejetos de suínos igual a 5%.

Na simulação para granjas com 2.500 suínos e razão resíduos vegetais/dejetos de suínos igual a 5%, os cenários 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16 apresentam o mesmo valor do VPL para os municípios de Juiz de Fora e Jequeri. Isso se deve ao fato de que as variáveis utilizadas na análise econômica serem idênticas para os dois municípios simulados. O VPL desses cenários para o município de Muriaé é mais negativo, tornando os empreendimentos neste município ainda mais inviável do ponto de vista econômico. Todos os cenários são inviáveis economicamente nos três municípios (VPL<0).

Os cenários 13, 14, 15 e 16 em que ocorre a comercialização do biofertilizante apresentam VPL's maiores que os cenários 9, 10, 11 e 12 em que ocorre apenas a comercialização da energia elétrica. Os resíduos vegetais utilizados na codigestão não contribuem significativamente para a produção dos nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), o que torna os custos de transporte dos resíduos maior que as receitas obtidas com a comercialização da energia elétrica e biofertilizante.

Nas granjas com 5.000, 10.000, 15.000, 20.000, 25.000 e 60.000 suínos os valores do VPL são negativos para todos os cenários com codigestão.

### 6.3.2. GRANJAS DE FRANGOS

O Quadro 6.10 apresenta a massa de dejetos em função da quantidade de frangos nas granjas.

Quadro 6.10 – Estimativa da produção de dejetos de frangos nas granjas simuladas

Quantidade de Suínos	Dejetos (t ano <sup>-1</sup> )
10.000	124,6
20.000	249,3
30.000	373,9
50.000	623,2
80.000	997,2
150.000	1.869,7

O total de resíduos produzidos anualmente pelo rebanho efetivo de frango na cidade de Mirai corresponde aos resíduos produzidos por 45 pessoas. Nos municípios de São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora o total de resíduos produzidos correspondem a 119 e 69 pessoas, respectivamente (IBGE, 2014b; FLEMING e FORD, 2001).

O Quadro 6.11 apresenta a massa de resíduos vegetais disponível nos municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.

Quadro 6.11 – Resíduos de cultivos vegetais disponíveis nos municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora

Município	café (t ano <sup>-1</sup> )	feijão (t ano <sup>-1</sup> )	milho (t ano <sup>-1</sup> )	bagaço de cana (t ano <sup>-1</sup> )	palha de cana (t ano <sup>-1</sup> )
Mirai	353,7	121,1	55,4	748,8	1.092,0
S. Pedro dos Ferros	10,8	403,0	191,7	13.498,6	19.685,4
Juiz de Fora	5,0	187,2	161,9	408,0	595,0

A Figura 6.24 apresenta a produção de biometano em granjas com 10.000, 20.000, 30.000, 50.000, 80.000 e 150.000 frangos localizadas nos municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora considerando apenas os dejetos de frangos (sem codigestão) e a codigestão com os resíduos vegetais disponíveis em cada município.

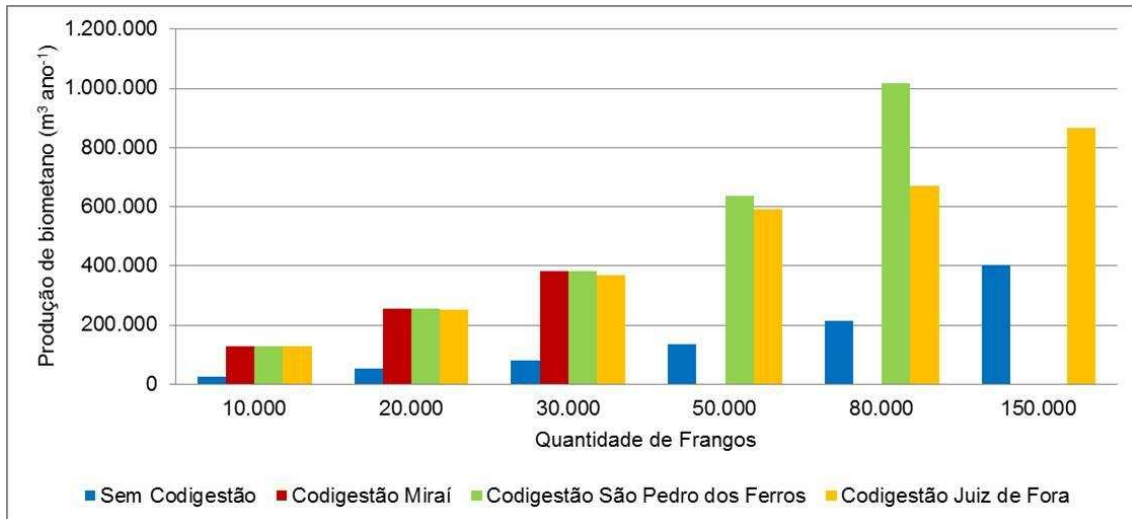


Figura 6.24 – Produção de biometano em granjas dos municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.

Existe um aumento significativo da produção de biometano com a codigestão de dejetos de frangos com os resíduos vegetais. Para a codigestão em granjas com 10.000, 20.000 e 30.000 frangos a produção de biometano é praticamente a mesma para os três municípios. As granjas com 50.000 e 80.000 frangos do município de São Pedro dos Ferros se destacam com uma maior produção de biometano comparada às granjas do município de Juiz de Fora. Isso se deve ao fato de possuir maior disponibilidade dos substratos bagaço e palha de cana-de-açúcar, resíduos que apresentam maior poder metanogênico.

Considerando-se que nos três municípios simulados existem granjas com plantéis de 10.000, 20.000 e 30.000 frangos, apresentou-se a seguir os resultados para granjas com esses quantitativos.

As Figuras 6.25, 6.26 e 6.27 apresentam a produção de biometano por substrato para granjas com 10.000 frangos nos municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.

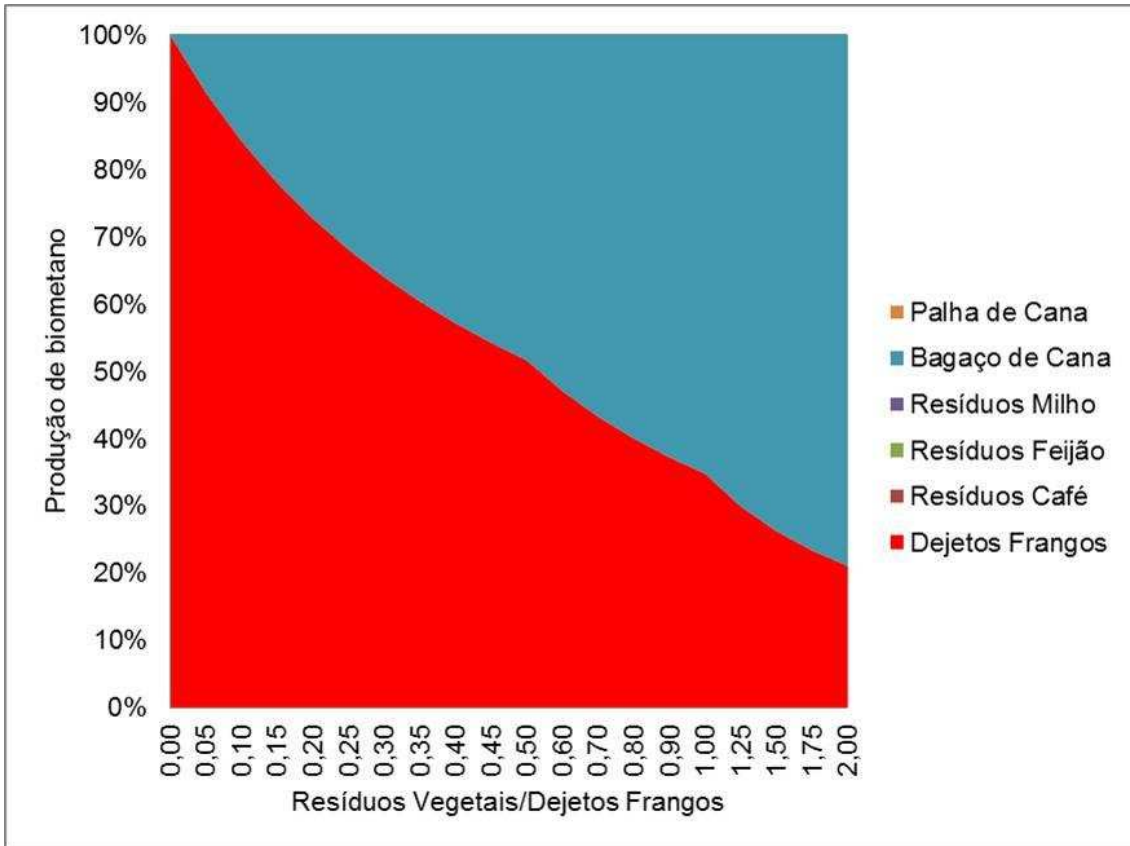


Figura 6.25 – Produção de metano por substrato para uma granja com 10.000 frangos no município de Miraf.

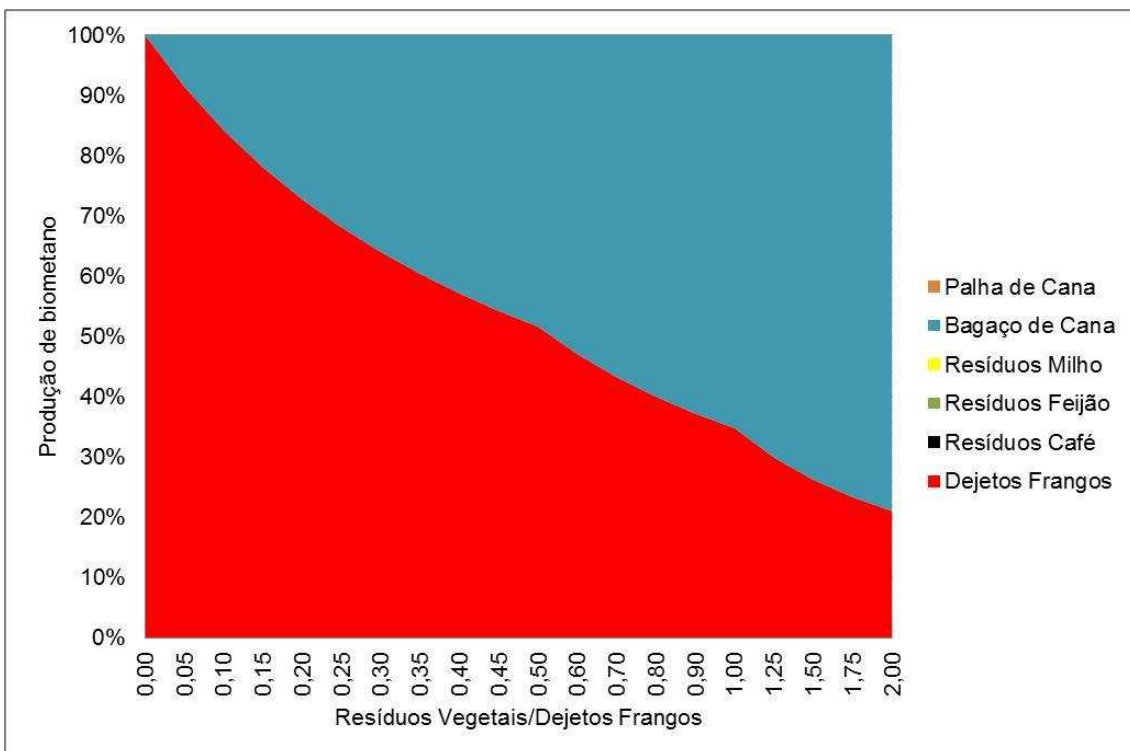


Figura 6.26 – Produção de metano por substrato para uma granja com 10.000 frangos no município de São Pedro dos Ferros.

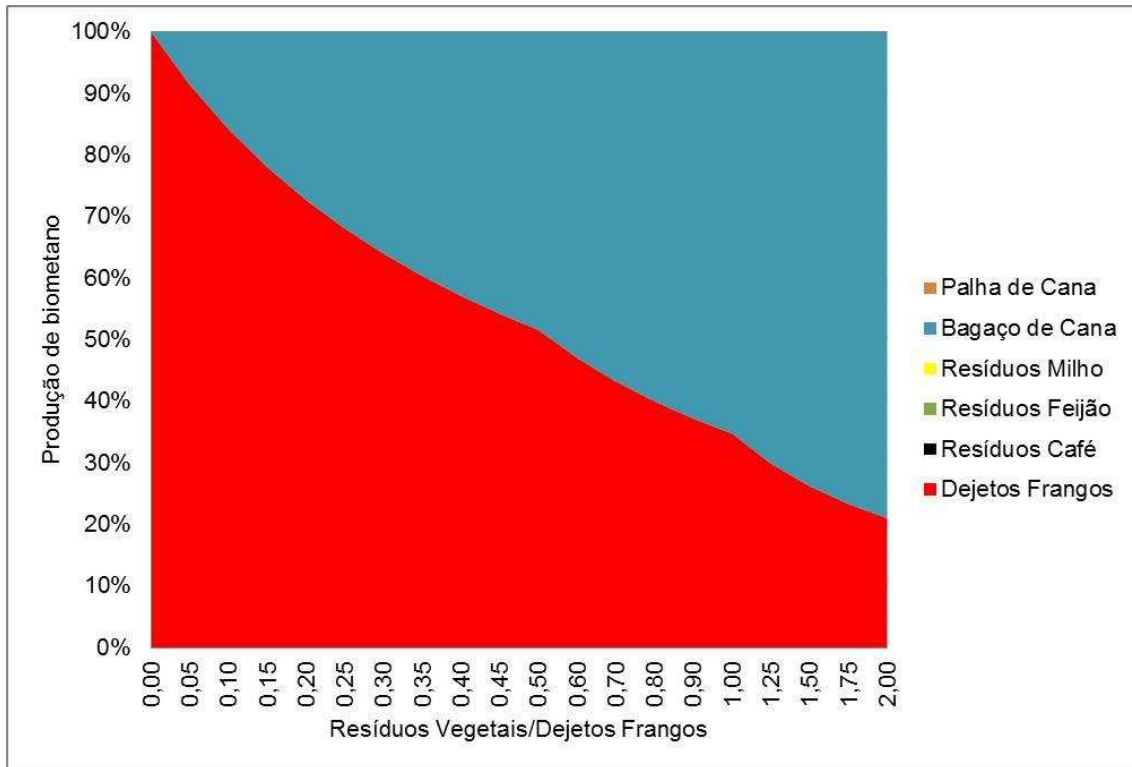


Figura 6.27 – Produção de metano por substrato para uma granja com 10.000 frangos no município de Juiz de Fora.

A produção de dejetos nas granjas com 10.000 frangos é pequena quando comparada aos resíduos vegetais disponíveis nos municípios. Devido a esse fato a produção de biometano por substrato nos três municípios é a mesma, sendo utilizado na codigestão apenas o bagaço de cana e razão resíduos vegetais/dejetos de frangos máxima igual a 200%.

As Figuras 6.28, 6.29 e 6.30 apresentam a produção de biometano por substrato para granjas com 20.000 frangos nos municípios de Miraf, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.

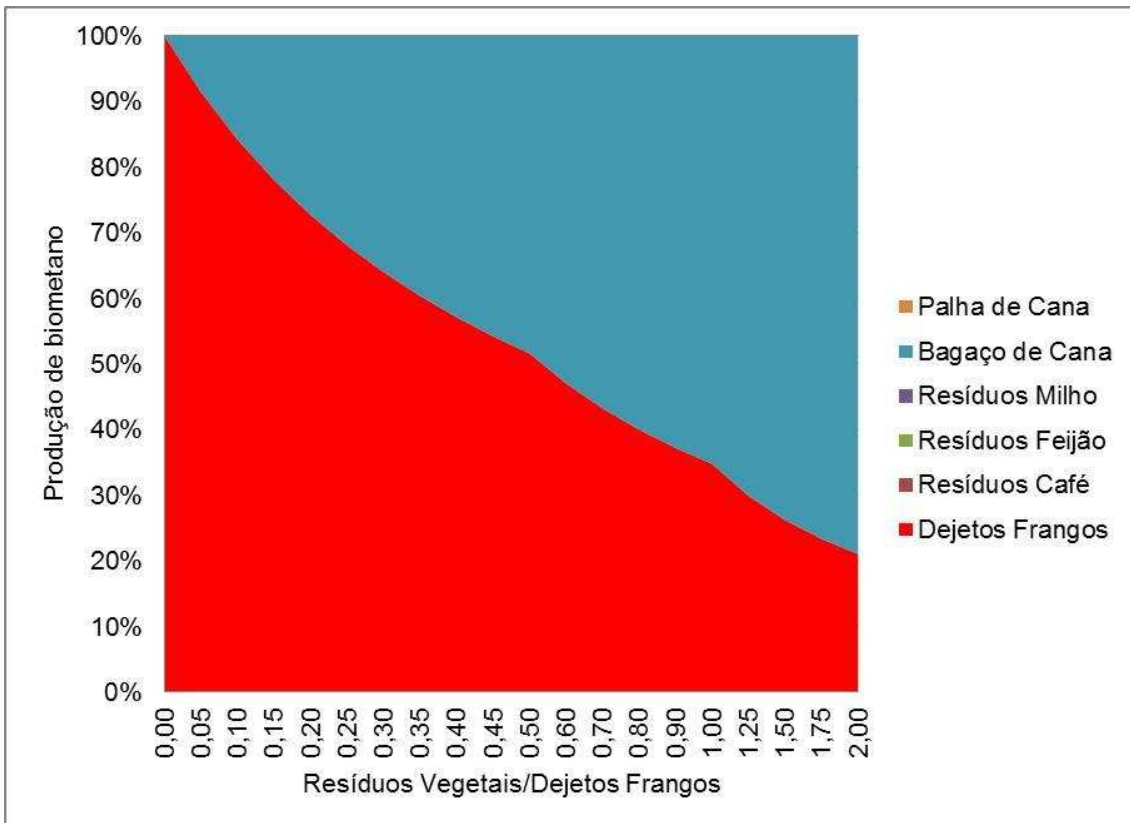


Figura 6.28 – Produção de metano por substrato para uma granja com 20.000 frangos no município de Mirafí.

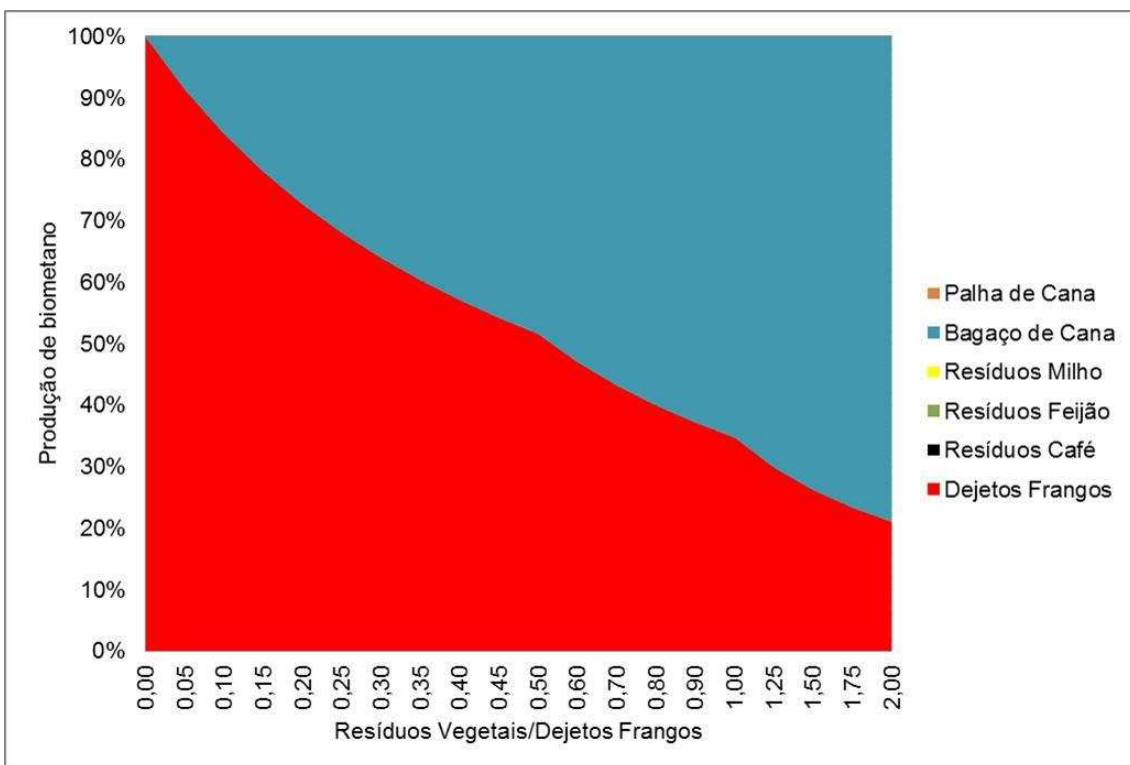


Figura 6.29 – Produção de metano por substrato para uma granja com 20.000 frangos no município de São Pedro dos Ferros.

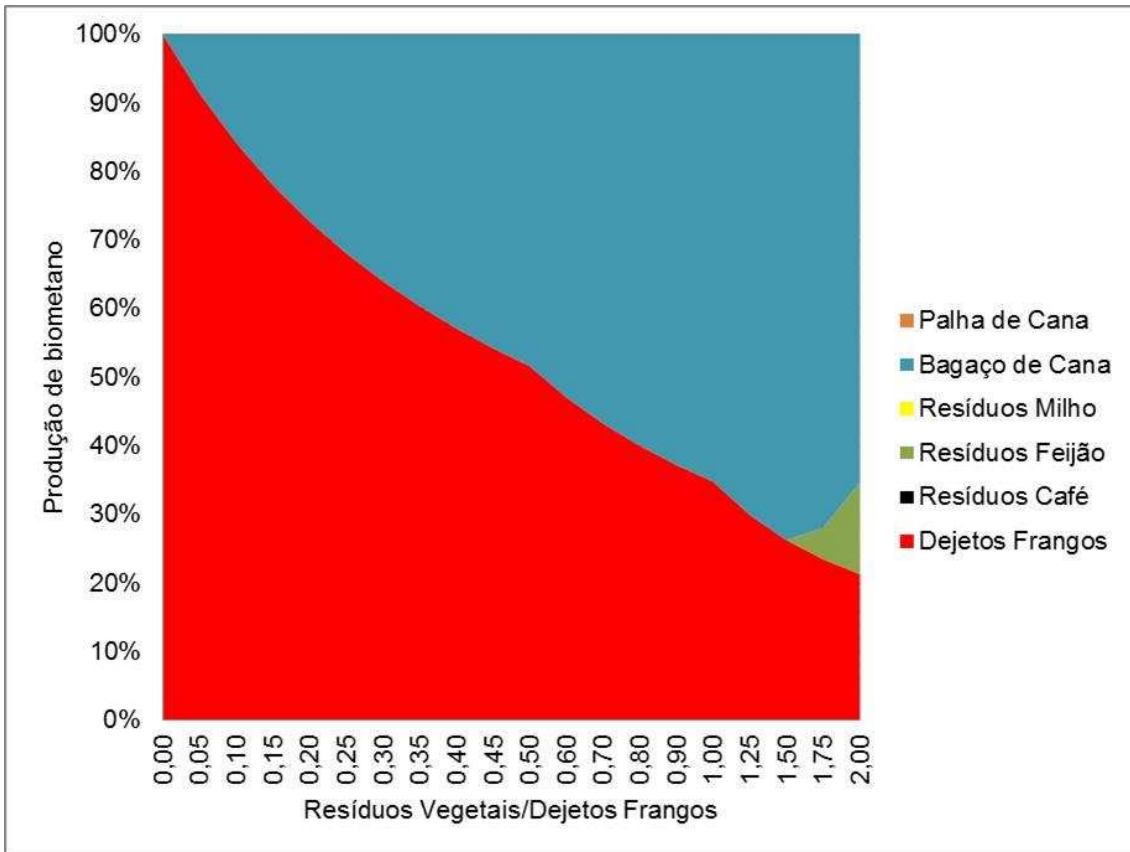


Figura 6.30 – Produção de metano por substrato para uma granja com 20.000 frangos no município de Juiz de Fora.

A produção de biometano por substrato é a mesma para os municípios de Miraf e São Pedro dos Ferros, sendo utilizado o bagaço de cana na codigestão com os dejetos de frangos. No município de Juiz de Fora para razões resíduos vegetais/dejetos de frangos maiores que 150% são empregados na codigestão além do bagaço de cana, também os resíduos de feijão.

As Figuras 6.31, 6.32 e 6.33 apresentam a produção de biometano por substrato para granjas com 30.000 frangos nos municípios de Miraf, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.

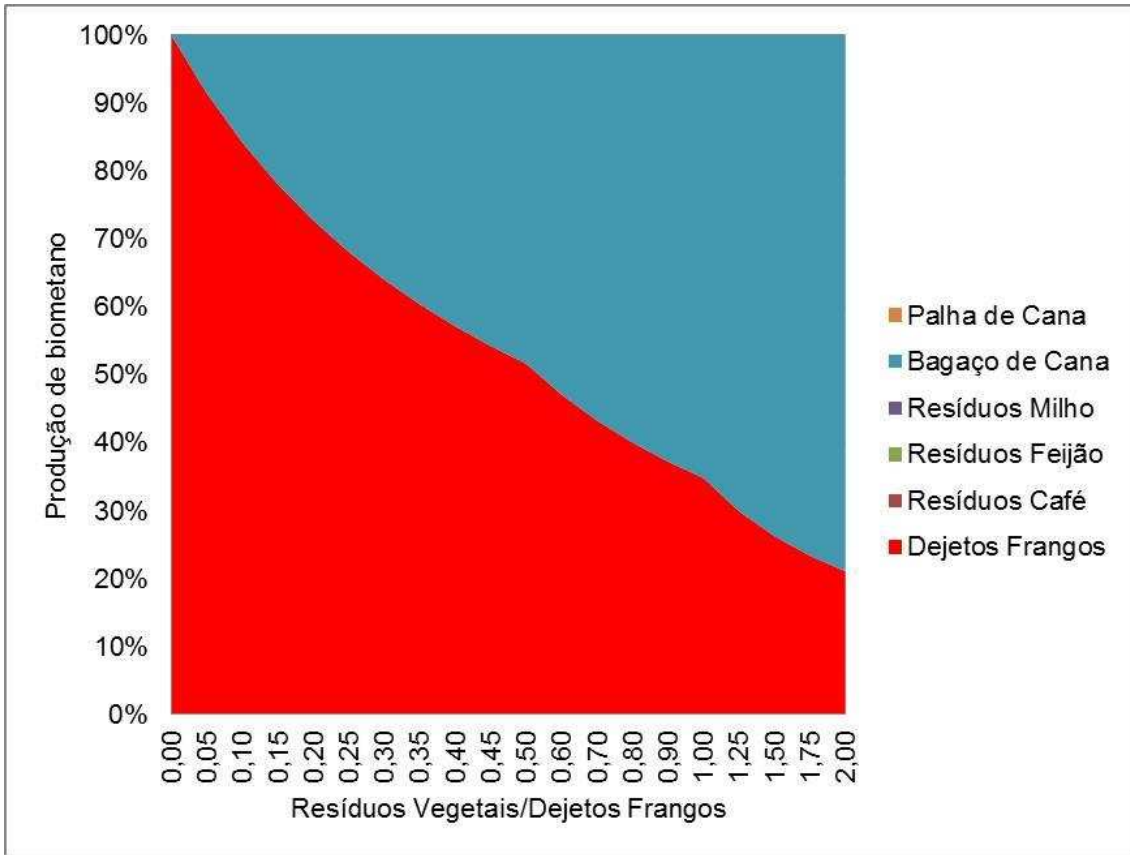


Figura 6.31 – Produção de metano por substrato para uma granja com 30.000 frangos no município de Mirai.

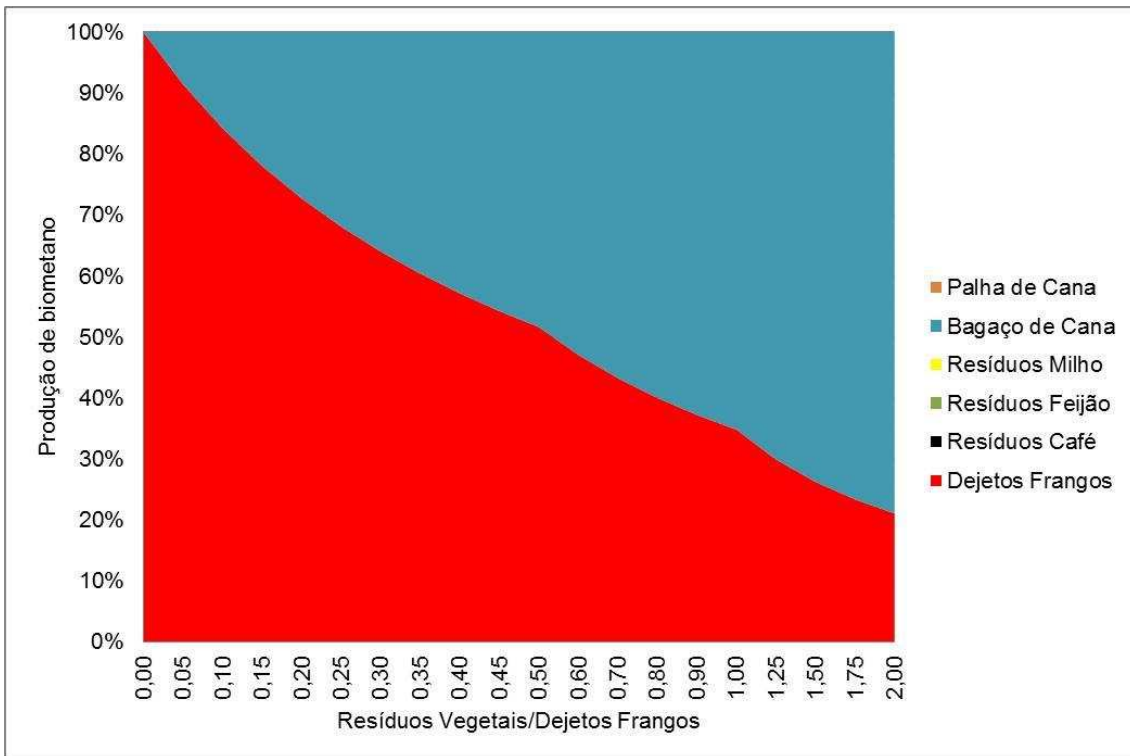


Figura 6.32 – Produção de metano por substrato para uma granja com 30.000 frangos no município de São Pedro dos Ferros.

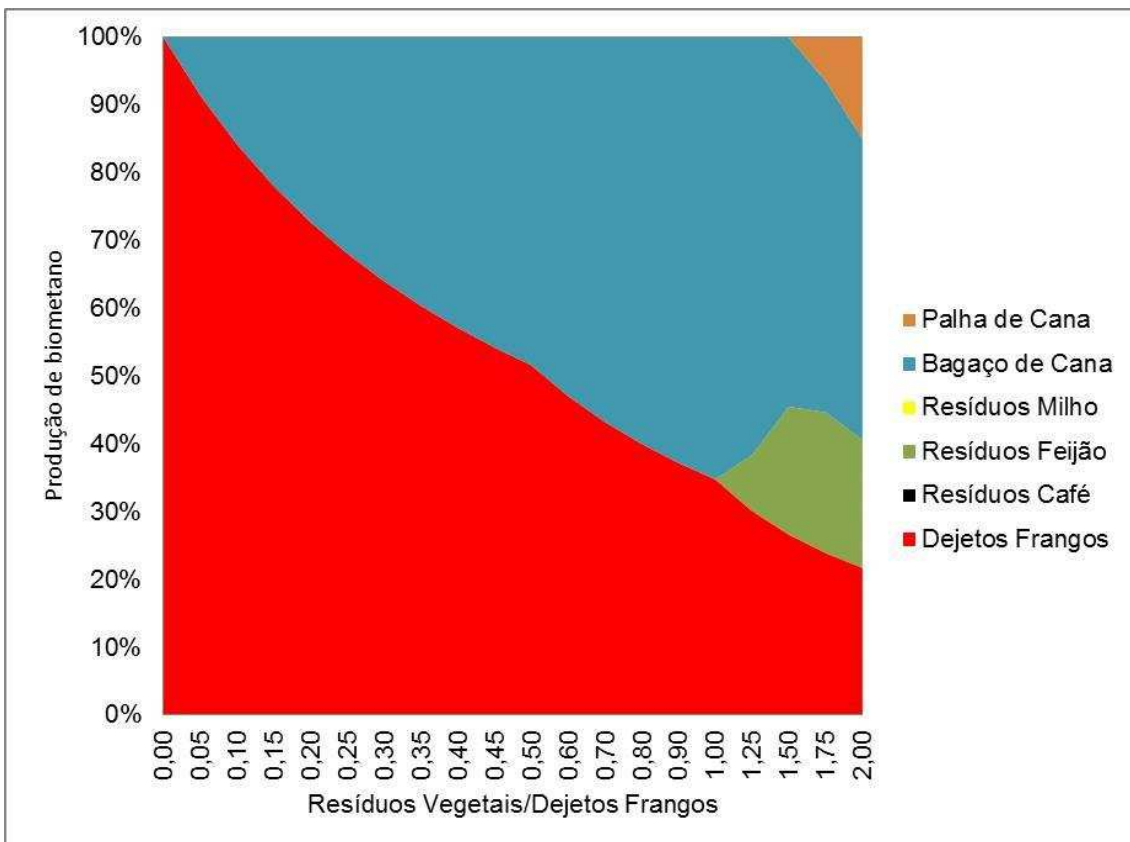


Figura 6.33 – Produção de metano por substrato para uma granja com 30.000 frangos no município de Juiz de Fora.

A produção de biometano por substrato é a mesma para os municípios de Mirai e São Pedro dos Ferros. No município de Juiz de Fora são empregados além do bagaço de cana, os resíduos de feijão para razões maiores que 125% e palha de cana para razões maiores que 150%.

## POTÊNCIA ELÉTRICA E PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O Quadro 6.12 apresenta o consumo de energia elétrica para a produção de frangos nas granjas.

Quadro 6.12 – Consumo de energia elétrica para a produção de frangos

Número de frangos	Consumo de energia elétrica (MWh.ano <sup>-1</sup> )
10.000	5,1
20.000	10,1
30.000	15,2
50.000	25,3
80.000	40,5
150.000	75,9

A Figura 6.34 apresenta a potência elétrica e a energia elétrica geradas a partir dos resíduos agropecuários em granjas com 10.000, 20.000, 30.000, 50.000, 80.000 e 150.000 frangos nos municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.

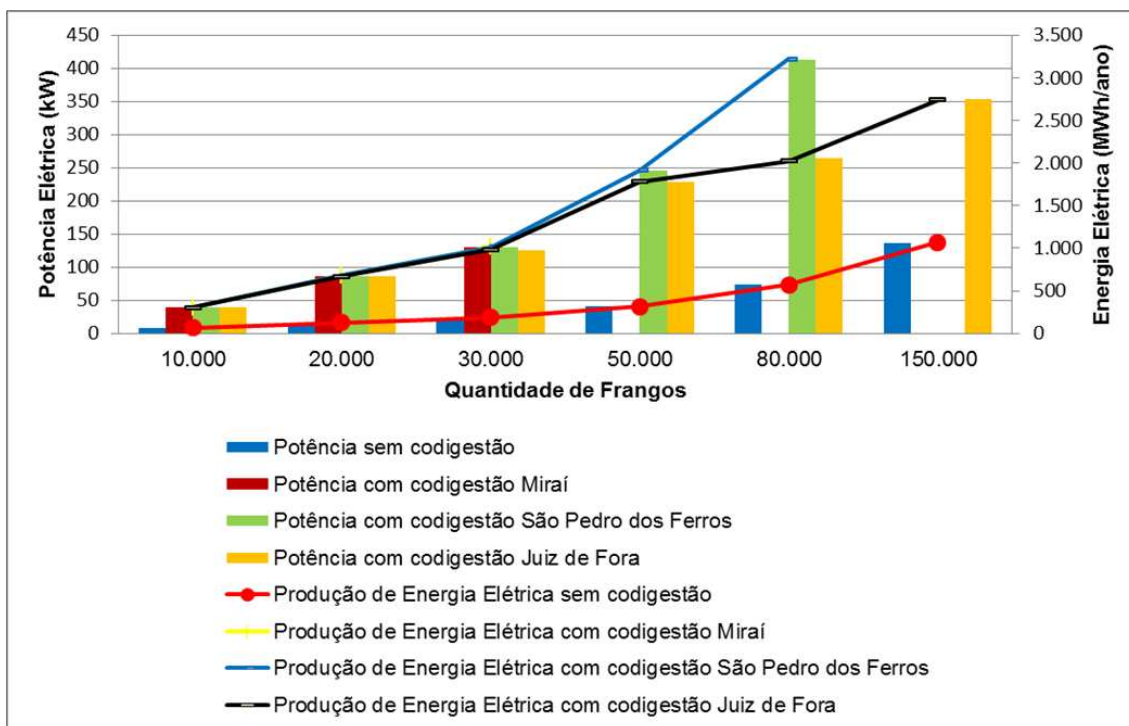


Figura 6.34 – Potência e energia elétrica gerada em granjas dos municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.

Apenas a granja com 150.000 frangos apresentou potência elétrica superior a 100 kW com o aproveitamento do biometano produzido exclusivamente com dejetos animais. Isso mostra a importância da codigestão para a viabilidade técnica da geração de energia elétrica em granjas de frango.

Somente as granjas com plantel superior a 30.000 frangos, realizando a codigestão, apresentaram potência elétrica maior que 100 kW. As potências variaram de 126 kW a 413 kW. É importante notar que a potência elétrica da granja de 80.000 frangos no município de São Pedro dos Ferros (413 kW) foi superior à da granja de 150.000 frangos localizada em Juiz de Fora (353 kW), isso se deve a disponibilidade de bagaço de cana, resíduo com maior poder metanogênico.

A eletricidade gerada é capaz de atender à demanda para a produção de frangos nas granjas havendo excedente.

## PRODUÇÃO DE BIOFERTILIZANTE

A Figura 6.35 apresenta a massa de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) contida no digestato dos resíduos agropecuários nos municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora com 10.000 frangos.

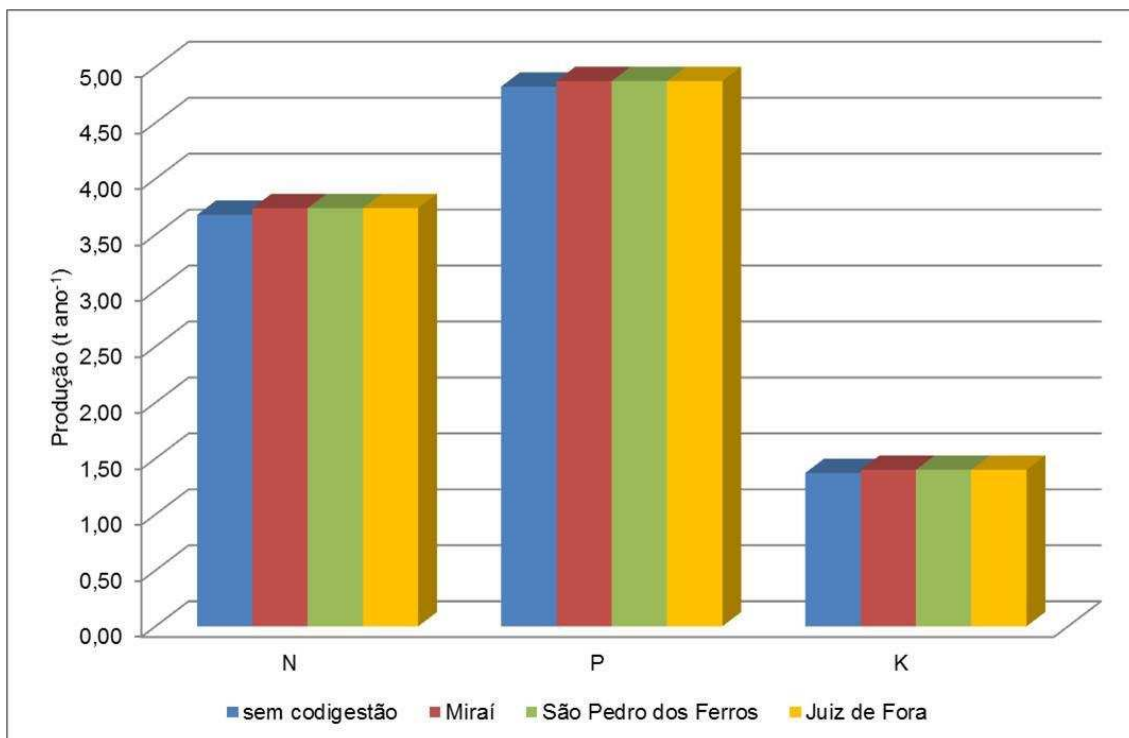


Figura 6.35 – Produção de biofertilizante em granja com 10.000 frangos nos municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.

Uma vez que os substratos utilizados na codigestão para granjas de 10.000 frangos são os mesmos nos três municípios, a produção dos nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) é a mesma. A produção de fósforo (P) é maior que os demais nutrientes.

A Figura 6.36 apresenta a massa de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) contida no digestato dos resíduos agropecuários nos municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora com 20.000 frangos.

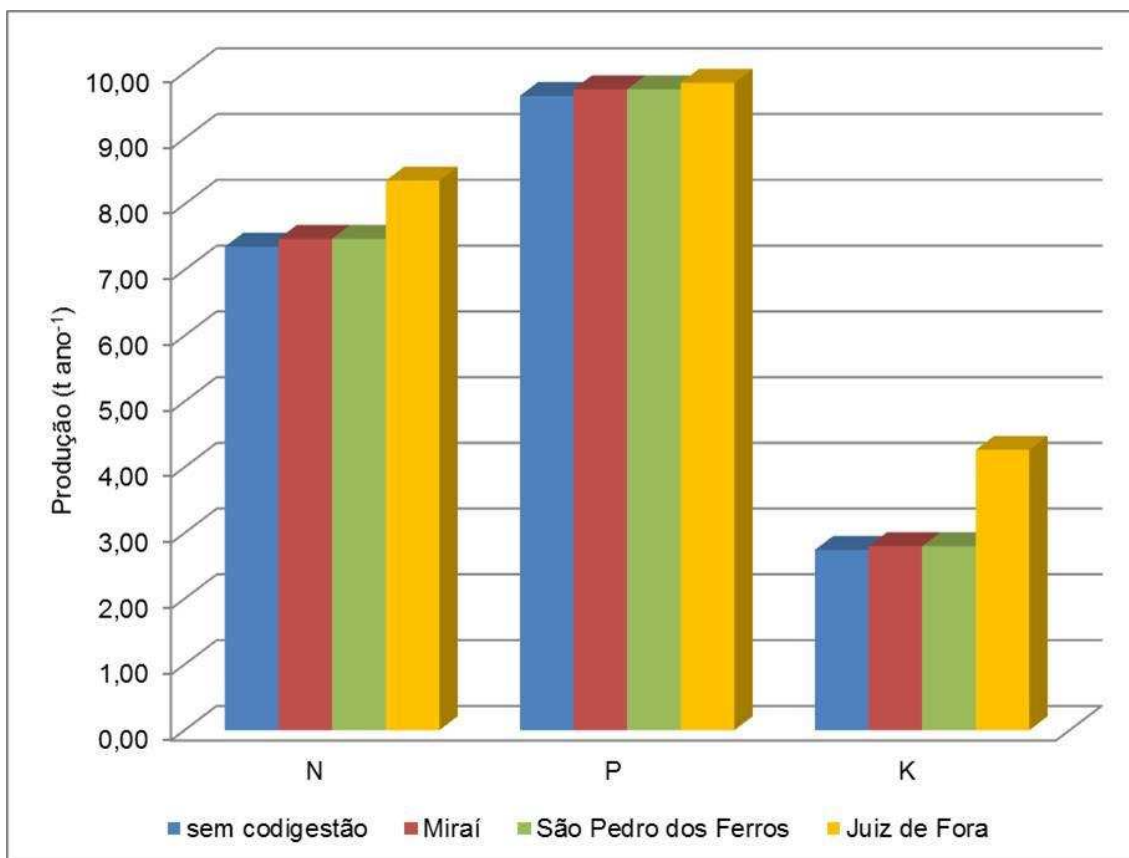


Figura 6.36 – Produção de biofertilizante em granja com 20.000 frangos nos municípios de Miraf, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.

A produção dos nutrientes N, P e K no município de Juiz de Fora é maior do que em Miraf e São Pedro dos Ferros. Essa diferença se deve ao fato dos resíduos de feijão serem utilizados na codigestão em granjas com 20.000 frangos neste município.

A Figura 6.37 apresenta a massa de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) contida no digestato dos resíduos agropecuários nos municípios de Miraf, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora com 30.000 frangos.

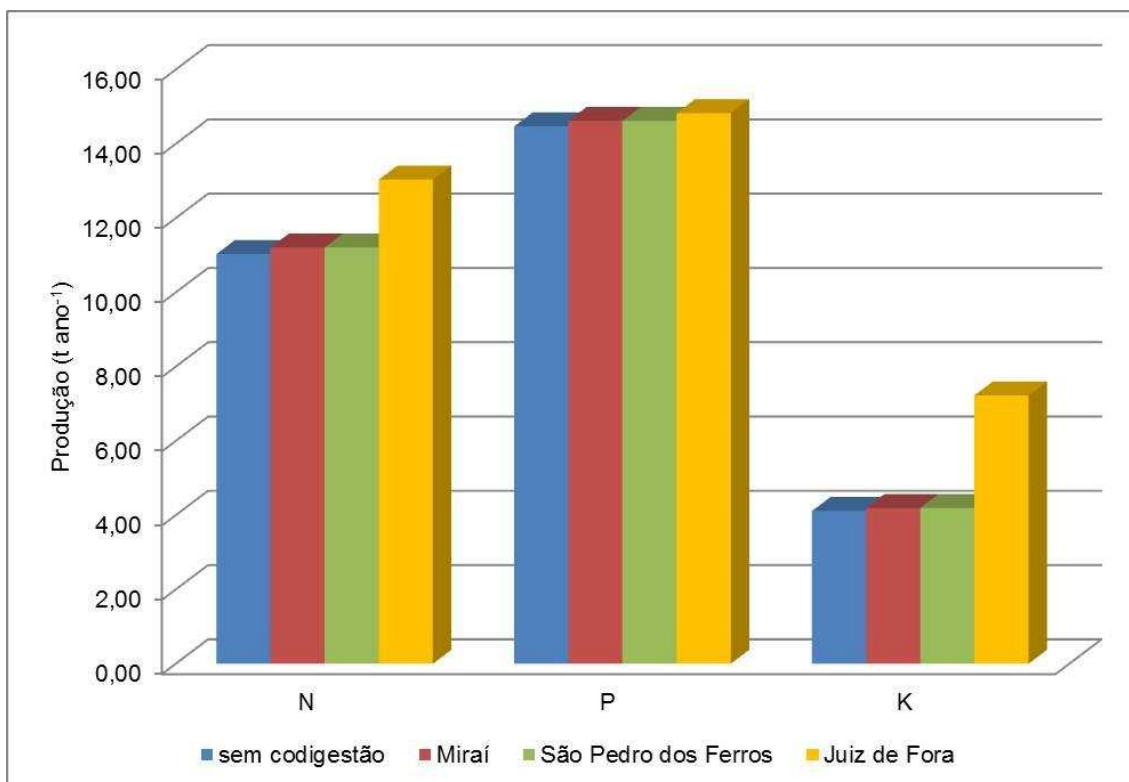


Figura 6.37 – Produção de biofertilizante em granja com 30.000 frangos nos municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.

A produção dos nutrientes N, P e K para granja com 30.000 frangos no município de Juiz de Fora é maior quando comparada aos municípios de Mirai e São Pedro dos Ferros devido a utilização dos resíduos de feijão e da palha de cana na codigestão.

## MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

A Figura 6.38 apresenta o potencial de toneladas de dióxido de carbono que podem ser mitigadas com a geração de energia elétrica a partir da codigestão dos resíduos agropecuários nas granjas de frangos dos municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.

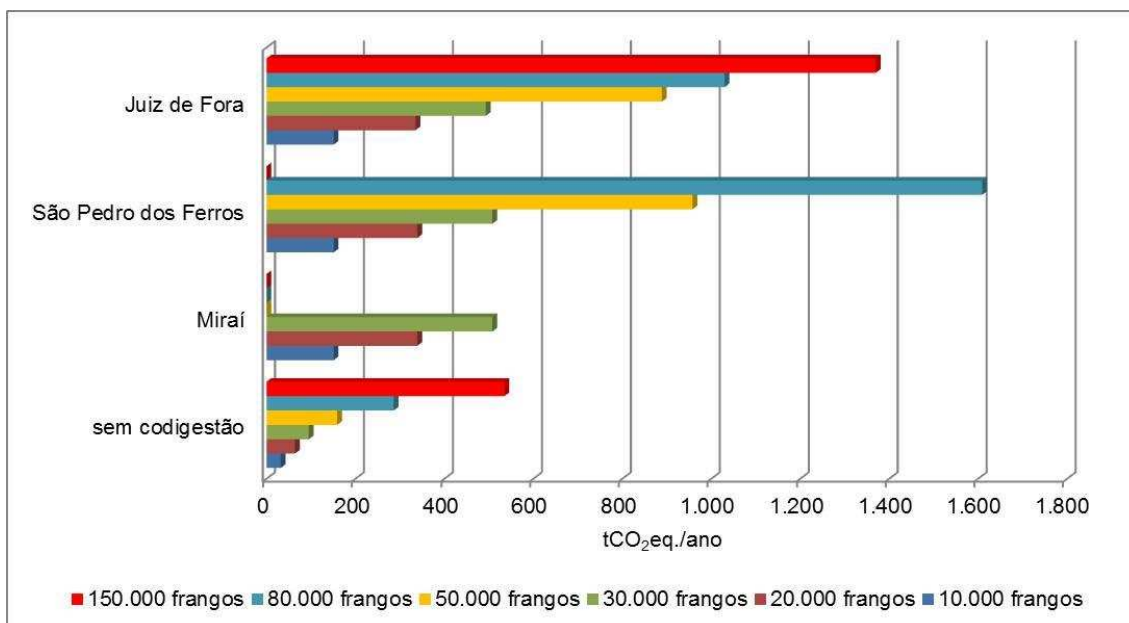


Figura 6.38 – Potencial de toneladas de dióxido de carbono para granjas de frangos nos municípios de Miraf, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.

O potencial de toneladas equivalente de dióxido de carbono ( $tCO_2eq.$ ) mitigadas é diretamente proporcional a geração de eletricidade e conseqüentemente ao poder metanogênico dos resíduos disponíveis nos municípios em que se encontram as granjas. Devido, e igual ao que se passou com a geração de energia elétrica, o potencial de toneladas equivalentes de dióxido de carbono ( $tCO_2eq.$ ) para a granja com 80.000 frangos em São Pedro dos Ferros é maior que o da granja de 150.000 frangos do município de Juiz de Fora.

A intensidade de emissão média de dióxido de carbono equivalente ( $CO_2eq.$ ) da carne de frango é de 5,4 kg de  $CO_2eq./Kg$  de carcaça, sendo que a produção de ração para os animais responde pela maior parte das emissões (MACLEOD, *et al.*, 2013). O peso médio da carcaça suína produzida em Minas Gerais no ano de 2012 foi de 2,0 kg (MINAS GERAIS, 2015b). O Quadro 13 apresenta as emissões totais para as granjas de frangos simuladas e a equivalente mitigação representada pelo aproveitamento dos resíduos agropecuários por meio da geração de energia elétrica.

Quadro 6.13 – Emissão e mitigação de CO<sub>2</sub>eq. com geração de eletricidade

Número de frangos	Emissão de CO <sub>2</sub> eq. (tCO <sub>2</sub> eq./ano)	Mitigação com geração de eletricidade (tCO <sub>2</sub> eq./ano)			
		Sem codigestão	Codigestão nas granjas		
			Miraí	S. Pedro dos Ferros	Juiz de Fora
10.000	659	32	151	151	151
20.000	1.318	64	339	339	335
30.000	1.976	95	508	508	493
50.000	3.294	159	0	958	889
80.000	5.270	286	0	1.609	1.030
150.000	9.882	535	0	0	1.370

A energia elétrica gerada a partir do biometano produzido apenas com os dejetos de frangos não é capaz de compensar as emissões de CO<sub>2</sub> em todo o ciclo de produção da carne de frango. O maior percentual de mitigação com aproveitamento dos dejetos animais, 5,43%, corresponde a granjas com plantel de 80.000 frangos o município de São Pedro dos Ferros. Não é possível mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> da produção de carne de frango com a eletricidade gerada a partir do biometano da codigestão em nenhum dos municípios simulados. O maior percentual de mitigação com codigestão de dejetos de frangos e resíduos vegetais (30,53%) ocorre para granja com 80.000 frangos no município de São Pedro dos Ferros. É importante observar que essa mitigação diz respeito a apenas ao aproveitamento energético dos resíduos. A cadeia produtiva da avicultura é formada por outros elos emissores de dióxido de carbono.

Devido o custo de transação de projetos de geração de créditos de carbono ser extremamente elevado a geração de receitas a partir dos Certificados de Emissões Reduzidas (CER) não foi considerada na análise econômica dos empreendimentos.

## ANÁLISE ECONÔMICA

A Figura 6.39 apresenta os custos de produção de energia elétrica sem e com codigestão em granjas com 10.000, 20.000, 30.000, 50.000, 80.000 e 150.000

frangos nos municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora comparados com o valor pago pela energia elétrica gerada a partir do biogás nos leilões de energia nova da ANEEL e as tarifas praticadas pelas concessionárias de energia na região da Zona da Mata de Minas Gerais.

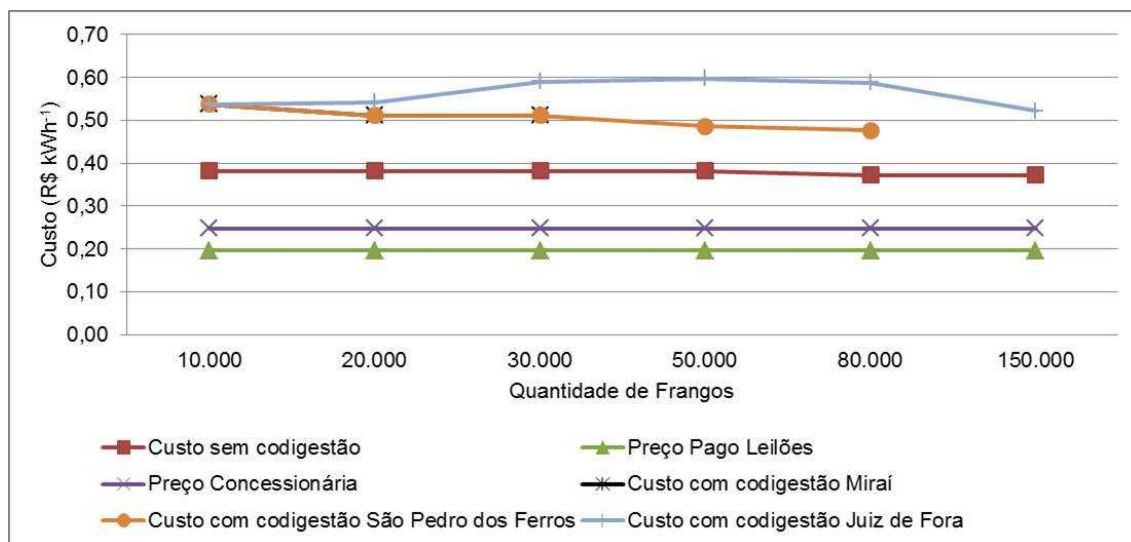


Figura 6.39 – Custo de produção de energia elétrica com codigestão de resíduos agropecuários em granjas com com 10.000, 20.000, 30.000, 50.000, 80.000 e 150.000 frangos nos municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.

Os custos de geração de energia elétrica são superiores ao valor pago nos leilões de energia nova da ANEEL e à tarifa praticada pelas concessionárias na região. A geração de eletricidade apenas com os dejetos de frangos apresenta custos menores uma vez que não existe gastos com o transporte e processamento de resíduos vegetais. Os custos de produção de energia elétrica com a codigestão são diretamente proporcionais à massa de resíduos vegetais utilizada e inversamente proporcionais ao poder metanogênico desses resíduos. As granjas com 10.000, 20.000 e 30.000 frangos localizadas nos municípios de Mirai e São Pedro dos Ferros apresentam o mesmo custo de geração. Isso se deve ao fato da quantidade e tipo de resíduos utilizados na codigestão serem as mesmas para as granjas nos dois municípios. No caso do município de Juiz de Fora, uma granja com 10.000 frangos possuem o mesmo custo de geração de eletricidade que granjas com igual plantel nos municípios de Mirai e São Pedro dos Ferros, no entanto para plantéis de 20.000, 30.000, 50.000, 80.000 frangos os custos são superiores. Para a codigestão nas granjas de Juiz de Fora com essas quantidades de frango são

utilizados resíduos de feijão, palha de cana-de-açúcar, resíduos de milho e resíduos de café que possuem poder metanogênico menor que os resíduos do bagaço de cana empregados na codigestão em granjas de Mirai e São Pedro dos Ferros. No município de Juiz de Fora o custo de geração de eletricidade em granja com 150.000 frangos é menor que para granja com 80.000 animais. Isso se justifica pela participação dos dejetos de frangos na geração do biometano que são iguais a 31,96% e 46,13% para granjas com 80.000 e 150.000 frangos, respectivamente. Essa maior participação dos dejetos de frangos na codigestão diminui os custos com o transporte e processamento dos resíduos vegetais.

### **VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)**

Foi calculado o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 1 a 8 dos empreendimentos de aproveitamento de dejetos de frangos (sem codigestão). Os resultados são válidos para os municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora pois a produção de energia elétrica, biofertilizante depende somente da quantidade de frangos.

A Figura 6.40 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para empreendimentos de aproveitamento de dejetos de frangos (sem codigestão) em granjas com 10.000, 20.000 e 30.000 animais. Foram simulados os cenários de 1 a 8.

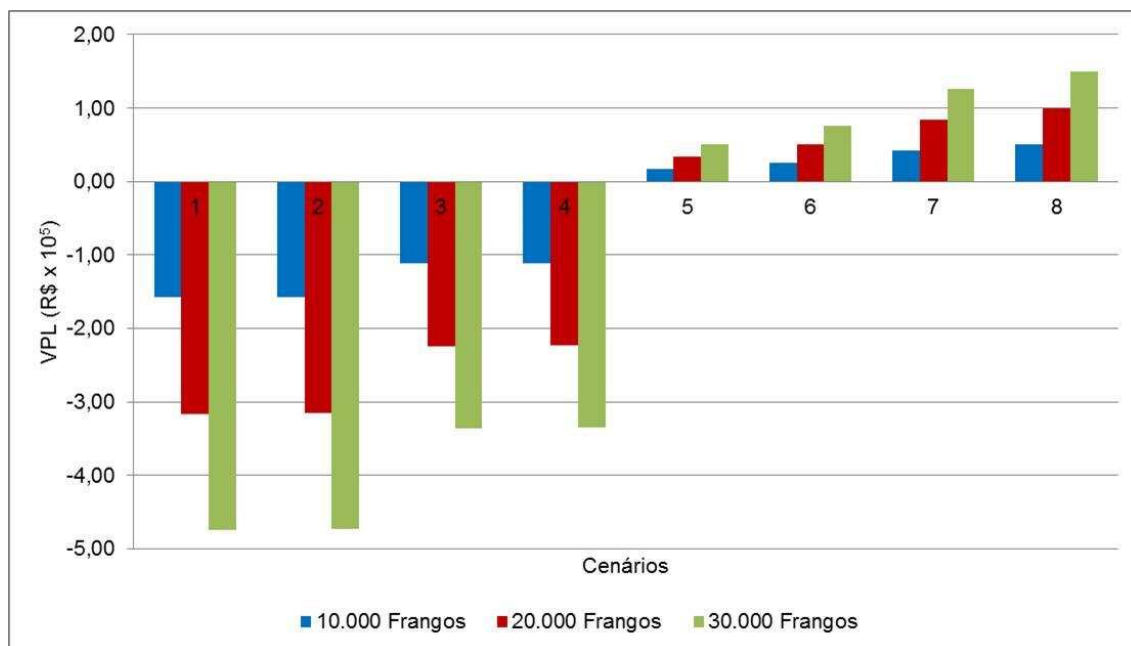


Figura 6.40 – VPL para os cenários sem codigestão em granjas com 10.000, 20.000 e 30.000 frangos.

Para os cenários 1, 2, 3 e 4 em que se comercializa apenas a energia elétrica gerada a partir do biometano a valores dos leilões de energia e da tarifa das concessionárias, com financiamento dos empreendimentos com recursos próprios e por meio de empréstimos não há viabilidade econômica, ou seja,  $VPL < 0$ .

Para os cenários 5, 6, 7 e 8 em que se comercializam a energia elétrica gerada a partir do biometano a valores dos leilões de energia e da tarifa das concessionárias e o biofertilizante, com financiamento dos empreendimentos com recursos próprios ou por meio de empréstimos existe viabilidade econômica, ou seja,  $VPL > 0$ . Quanto maior a quantidade de frangos nas granjas maior é o Valor Presente Líquido (VPL). A comercialização do biofertilizante é determinante para a viabilidade econômica dos empreendimentos de geração de energia elétrica sem codigestão.

Nos cenários 5 e 6, em que a energia elétrica é comercializada aos preços praticados nos leilões de energia nova, o biofertilizante responde por mais da metade (54,97%) da receita obtida com o empreendimento.

Nos cenários 7 e 8, em que a energia elétrica é comercializada aos valores das tarifas praticadas pelas concessionárias, o biofertilizante responde por 49,15% da receita obtida com o empreendimento.

A Figura 6.41 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para empreendimentos de aproveitamento de dejetos de suínos (sem codigestão) em granjas com 50.000, 80.00 e 150.000 animais. Foram simulados os cenários de 1 a 8.

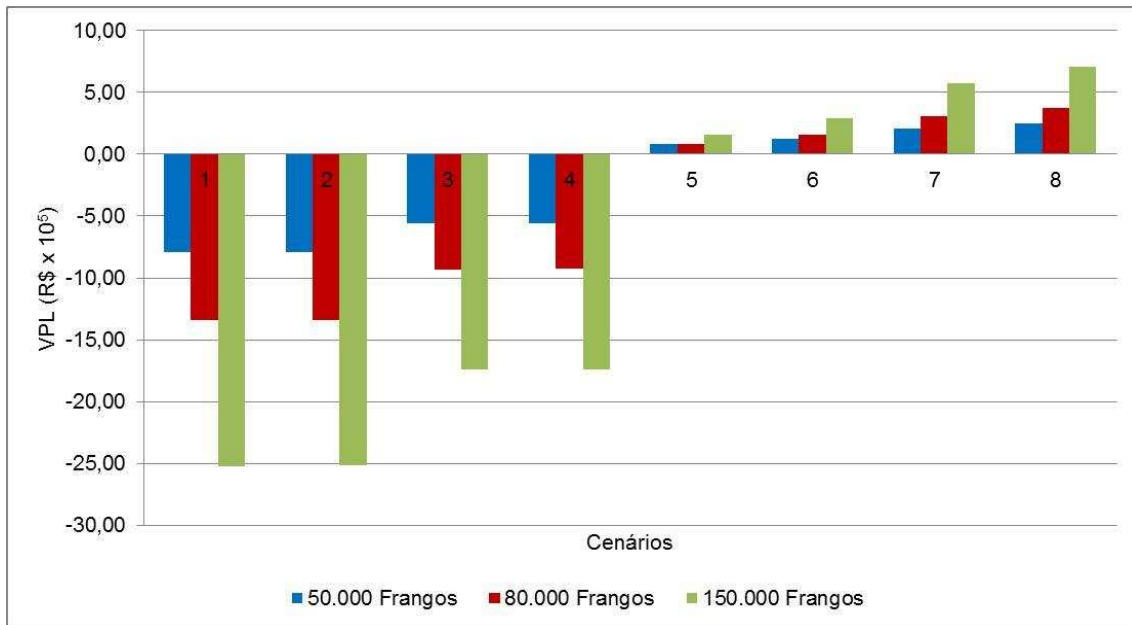


Figura 6.41 – VPL para os cenários sem codigestão em granjas com 50.000, 80.000 e 150.000 frangos.

Para os cenários 1, 2, 3 e 4 em que se comercializa apenas a energia elétrica gerada a partir do biometano a valores dos leilões de energia e da tarifa das concessionárias, com financiamento dos empreendimentos com recursos próprios e por meio de empréstimos não há viabilidade econômica, ou seja,  $VPL < 0$ .

Para os cenários 5, 6, 7 e 8 em que se comercializam a energia elétrica gerada a partir do biometano a valores dos leilões de energia e da tarifa das concessionárias e o biofertilizante, com financiamento dos empreendimentos com recursos próprios ou por meio de empréstimos existe viabilidade econômica, ou seja,  $VPL > 0$ . Quanto maior a quantidade de frangos nas granjas maior é o Valor Presente Líquido (VPL). A comercialização do biofertilizante é determinante para a viabilidade econômica dos empreendimentos de geração de energia elétrica sem codigestão.

Nos cenários 5 e 6, em que a energia elétrica é comercializada aos preços praticados nos leilões de energia nova, em granjas com 50.000 frangos o

biofertilizante responde por 54,97% da receita obtida com o empreendimento. Em granjas com 80.000 e 150.000 frangos a porcentagem da receita referente à comercialização do biofertilizante é igual a 52,06%.

Nos cenários 7 e 8, em que a energia elétrica é comercializada aos valores das tarifas praticadas pelas concessionárias, para granjas com 50.000, frangos o biofertilizante responde por 49,15% da receita obtida com o empreendimento. Nas granjas com 80.000 e 150.000 frangos o valor obtido com a comercialização do biofertilizante responde por 46,23% da receita.

A seguir são apresentados o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16 dos empreendimentos em que ocorre a codigestão de dejetos de frangos com resíduos vegetais.

As Figuras 6.42, 6.43, 6.44 e 6.45 apresentam o Valor Presente Líquido (VPL) para empreendimentos de codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos iguais a 5%, 10%, 15% e 20% em granjas com 10.000 animais dos municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora. Foram simulados os cenários de 9 a 16.

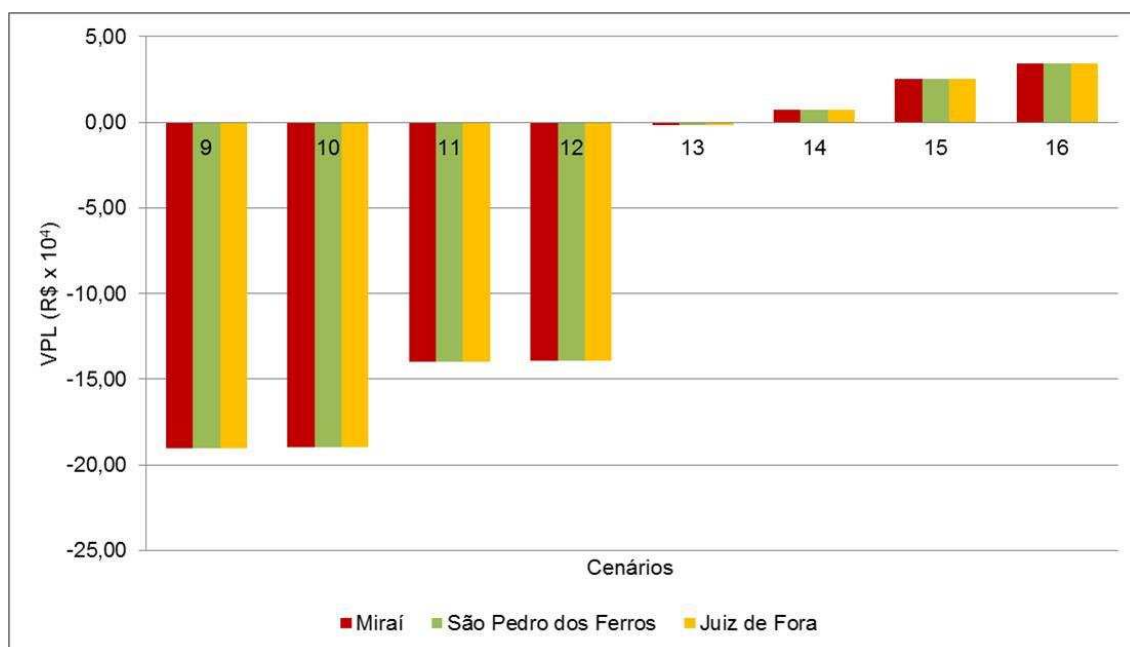


Figura 6.42 – VPL para os cenários com codigestão em granja com 10.000 frangos com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 5%.

Na simulação para granjas com 10.000 frangos e razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 5%, os cenários 9, 10, 11, 12 e 13 apresentam o mesmo VPL para os municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora. Isso se deve ao fato de que as variáveis utilizadas na análise econômica serem idênticas. Esses cenários são inviáveis economicamente nos três municípios simulados ( $VPL < 0$ ).

Os cenários 14, 15 e 16, apresentam  $VPL > 0$  implicando na viabilidade econômica dos empreendimentos. As variáveis utilizadas na simulação desses cenários para granjas com 10.000 frangos com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos de 5% são iguais, o VPL obtidos é idêntico nos três municípios simulados.



Figura 6.43 – VPL para os cenários com codigestão em granja com 10.000 frangos com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 10%.

Na simulação para granjas com 10.000 frangos e razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 10%, os cenários 9, 10, 11, 12, 13 e 14 apresentam o mesmo VPL para os municípios de Mirai, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora. Isso se deve ao fato de que as variáveis utilizadas na análise econômica serem idênticas. Esses cenários são inviáveis economicamente nos três municípios simulados ( $VPL < 0$ ).

Os cenários 15 e 16, apresentam  $VPL > 0$  implicando na viabilidade econômica dos empreendimentos. As variáveis utilizadas na simulação desses cenários para granjas com 10.000 frangos com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos de 10% são iguais, o VPL obtidos é idêntico nos três municípios simulados.

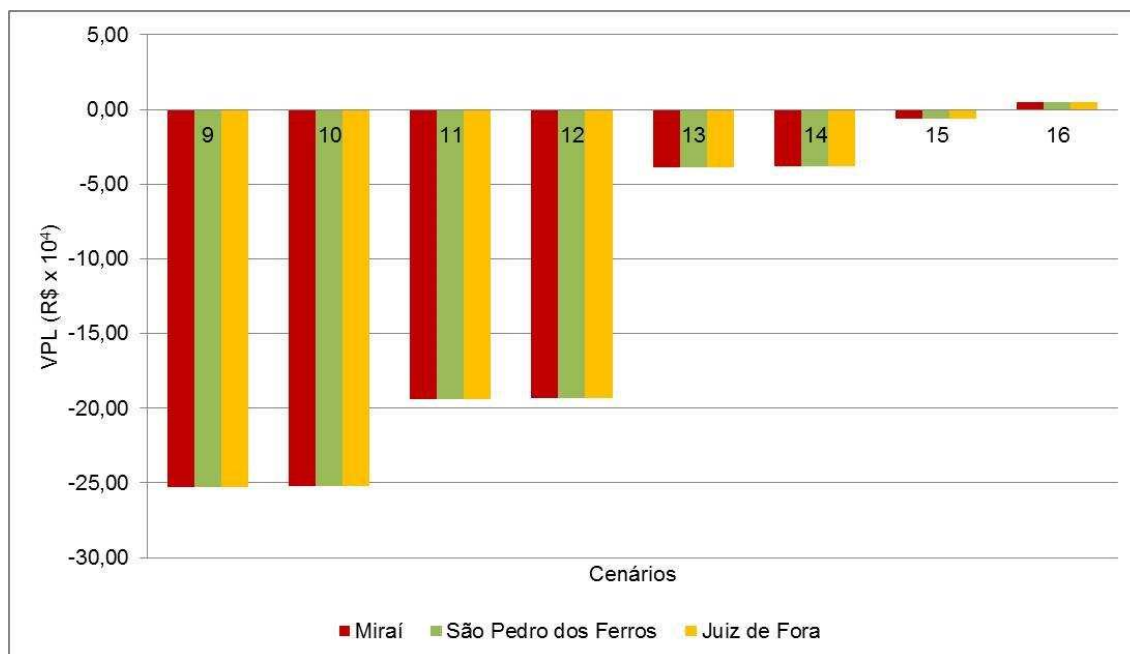


Figura 6.44 – VPL para os cenários com codigestão em granjas com 10.000 frangos com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 15%.

Na simulação para granjas com 10.000 frangos e razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 15%, os cenários 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15 apresentam o mesmo VPL para os municípios de Miraf, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora. Isso se deve ao fato de que as variáveis utilizadas na análise econômica serem idênticas. Esses cenários são inviáveis economicamente nos três municípios simulados ( $VPL < 0$ ).

Apenas o cenário 16 apresenta  $VPL > 0$  implicando na viabilidade econômica do empreendimento. As variáveis utilizadas na simulação desse cenário para granjas com 10.000 frangos com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos de 15% são iguais, o VPL obtido é idêntico nos três municípios simulados.

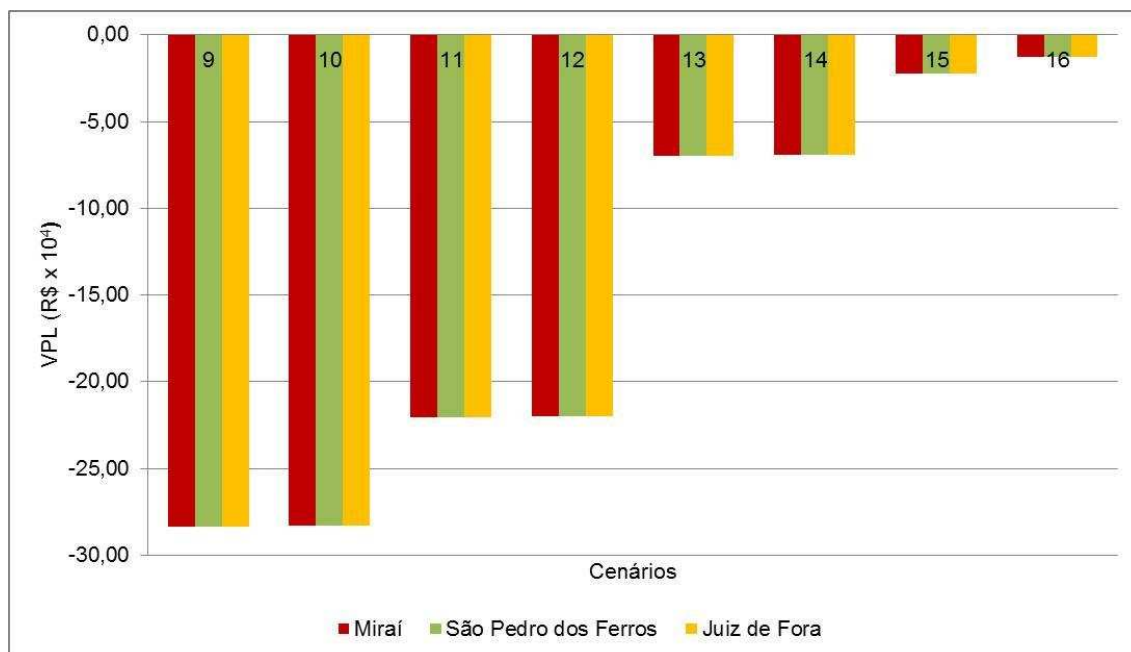


Figura 6.45 – VPL para os cenários com codigestão em granjas com 10.000 frangos com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 20%.

Na simulação para granjas com 10.000 frangos e razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 20%, todos cenários apresentam o mesmo VPL para os municípios de Miraf, São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora. Isso se deve ao fato de que as variáveis utilizadas na análise econômica serem idênticas. Todos os cenários são inviáveis economicamente nos três municípios simulados ( $VPL < 0$ ).

Para as granjas com 20.000 e 30.000 frangos nos três municípios simulados os resultados para o VPL são similares aos encontrados para granjas com 10.000 frangos e razões resíduos vegetais/dejetos de frangos iguais a 5%, 10%, 15% e 20%. O mesmo ocorre para granjas com 50.000 e 80.000 frangos nos municípios de São Pedro dos Ferros e Juiz de Fora.

Para granja com 150.000 frangos no município de Juiz de Fora, os cenários 15 e 16 são viáveis economicamente para razões resíduos vegetais/dejetos de frangos iguais a 5% e 10%. Para razões de 15% e 20% nenhum cenário é viável.

## 6.4. CONCLUSÕES

A codigestão de dejetos animais (suínos e frangos) com resíduos vegetais permite aumentar substancialmente o potencial de produção de biometano. Esse potencial está diretamente relacionado à disponibilidade de resíduos agropecuários e seu poder metanogênico. As granjas que apresentaram maior potencial de produção de biometano são aquelas localizadas nos municípios onde ocorre maior disponibilidade de bagaço de cana, resíduos de feijão e palha de cana.

A potência elétrica e a eletricidade são diretamente proporcionais ao biometano produzido com os resíduos agropecuários. A geração de energia elétrica estimada nas granjas de suínos e frangos é capaz de atender as demandas da produção. O excedente de eletricidade nas granjas de suínos é maior que nas granjas de frangos.

A produção de biofertilizante se apresenta como fator importante para viabilizar economicamente os projetos de aproveitamento de resíduos. De forma geral, a codigestão não contribui significativamente para aumentar a produção de biofertilizante. Exceção são os resíduos de café, que apesar de possuírem um baixo poder metanogênico, contribuem significativamente para a produção dos nutrientes nitrogênio (N) e potássio (K).

A geração de eletricidade a partir dos resíduos agropecuários contribui para a mitigação parcial e em alguns casos total das emissões de CO<sub>2</sub> da cadeia produtiva de carne suína e de frango. Foi avaliada a mitigação referente apenas ao aproveitamento energético dos resíduos sendo a cadeia produtiva da suinocultura e avicultura formada por outros elos emissores de dióxido de carbono.

A maximização da produção de biometano e energia elétrica com a codigestão dos dejetos animais (suínos e frangos) com resíduos vegetais não se reflete na viabilidade econômica dos empreendimentos. Os custos associados ao aproveitamento dos resíduos vegetais não são compensados pelo preço pago pela energia elétrica gerada e o biofertilizante produzido. Dessa forma, ocorreu a viabilidade econômica dos projetos nos cenários em que se simulou somente o aproveitamento dos dejetos de suínos e frangos com a comercialização de energia elétrica e biofertilizante. No caso da codigestão de dejetos suínos e resíduos

vegetais todos os cenários simulados foram inviáveis economicamente. A codigestão de dejetos de frangos apresenta viabilidade econômica em alguns cenários.

É fundamental que sejam desenvolvidos mecanismos de incentivo para o aproveitamento energético dos resíduos agropecuários para tornar esses empreendimentos viáveis economicamente.

## 6.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPECS – Associação Brasileira das Indústrias Produtoras e Exportadoras de Carne Suína. Relatório ABIPECS 2012. Disponível em: <http://www.abipecs.org.br/pt/relatorios.html>, (Consulta em: 05/2015).

AMARAL, A.L., MORES, N. (2008). Planejamento da produção de suínos em lotes com vazio sanitário. *Acta Scientiae Veterinariae*. 36 (Supl 1): 143-154.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. (2014). Disponível em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/corporativo/Paginas/tarifas201201.aspx> (Consulta em: 05/2015).

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Central de Informações de Aves e Suínos. Disponível em: <http://www.cnpsa.embrapa.br/cias/dados/custo.php>. (Consulta em: 05/2015).

FLEMING, R., FORD, M. 2001. Humans versus Animals - Comparison of Waste Properties. Disponível em: [http://www.ridgetownc.uoguelph.ca/research/documents/fleming\\_huvsanim0107.PDF](http://www.ridgetownc.uoguelph.ca/research/documents/fleming_huvsanim0107.PDF) . (Consulta em: 04/2015).

GARCIA, S.K., CARVALHO, J., OLIVEIRA, T.M.L. (2005) Suinocultura Mineira (I): Distribuição e tamanho dos plantéis nos polos regionais em 2004. In: CONGRESSO DA ABRAVES, 12., 2005, Fortaleza. Anais... Fortaleza: ABRAVES (CD-ROM).

IBGE, 2014a. Pesquisa Agrícola Municipal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pam/default.asp?o=28&i=P>, (Consulta em: 09/2014).

IBGE, 2014b. Pesquisa Pecuária Municipal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/ppm/default.asp?o=27&i=P>, (Consulta em: 09/2014).

IMA - Instituto Mineiro de Agropecuária (IMA), Cadastro de Suinocultores 2013a.

IMA - Instituto Mineiro de Agropecuária (IMA), Cadastro de Avicultores 2013b.

IMA – Instituto Mineiro de Agropecuária, Geo DSA, 2011/2012. [www.ima.mg.gov.br](http://www.ima.mg.gov.br).

MACLEOD, M., GERBER, P., MOTTET, A., TEMPIO, G., FALCUCCI, A., OPIO, C., VELLINGA, T., HENDERSON, B., STEINFELD, H. (2013). Greenhouse gas emissions from pig and chicken supply chains – A global life cycle assessment. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.

MATA-ALVAREZ, J., MACE, S. LLABRES, P. (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technol.*, 74, 3 –16.

MINAS GERAIS, Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Relatórios da Pecuária: Suinocultura 2015. Disponível em: [http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq\\_Relatorios/Pecuaria/2015/abr/suinocultura\\_abr\\_2015.pdf](http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq_Relatorios/Pecuaria/2015/abr/suinocultura_abr_2015.pdf). (Consulta em:05/2015a).

MINAS GERAIS, Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Relatórios da Pecuária: Avicultura de Corte 2015. Disponível em: [http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq\\_Relatorios/Pecuaria/2015/mar/avicultur\\_a\\_corte\\_mar\\_2015.pdf](http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq_Relatorios/Pecuaria/2015/mar/avicultur_a_corte_mar_2015.pdf). (Consulta em: 05/2015b).

MOURA, A. D., JUNQUEIRA, B. A., ROCHA, D. T., SILVA Jr., A. G. (2004). Relatório complementar de caracterização do arranjo produtivo da suinocultura de Ponte Nova (MG) e região. SEBRAE – MG, 16 p.

RICHETTI, A.; SANTOS, A.C. (2000). O sistema integrado de produção de frango de corte em minas gerais: uma análise sob a ótica da ECT. *Organizações Rurais e Agroindustriais – Revista Eletrônica de Administração*, v.2, n.2.

UBABEF, União Brasileira de Avicultura, Relatório Anual 2013. Disponível em: <http://www.ubabef.com.br/files/publicacoes/732e67e684103de4a2117dda9ddd280a.pdf>. (Consulta em: 05/2015).

## **CAPÍTULO 7**

### **CONDOMÍNIOS DE AGROENERGIA NA ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS**

**RESUMO:**

Os condomínios de agroenergia se definem como a área territorial onde se encontram as cadeias agroenergéticas, dispendo de tecnologia e organização para produzir e utilizar a energia oriunda da atividade agropecuária local e regional. O aproveitamento energético de resíduos da produção agropecuária por meio da codigestão anaeróbia pode se tornar uma fonte de renda capaz de cobrir as despesas referentes aos serviços ambientais dessas atividades. O biometano, resultante da codigestão, pode ser explorado com a associação de granjas. Os objetivos deste trabalho foram avaliar o aproveitamento energético dos resíduos agropecuários por meio da codigestão anaeróbia de dejetos de suínos e frangos de corte com resíduos de cultivos vegetais em condomínios de agroenergia na região. O dimensionamento energético e a análise da viabilidade econômica foram realizados com a ferramenta computacional SAUDADE. O potencial de energia elétrica gerada a partir do biometano nos condomínios de agroenergia simulados atenderam totalmente ou parcialmente a demanda dos municípios.

**Palavras-Chave:** suinocultura, avicultura, biometano.

## 7.1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento energético de resíduos da produção agropecuária por meio da codigestão anaeróbia pode se tornar uma fonte de renda capaz de cobrir as despesas referentes aos serviços ambientais dessas atividades. O biometano, resultante da codigestão, pode ser explorado com a associação de granjas em condomínios de agroenergia. A energia produzida por meio desse tipo de associação oferece economia em escala aumentando a viabilidade dos empreendimentos. A geração de energia elétrica e térmica do condomínio ocorre em uma central termelétrica (BLEY JÚNIOR, *et al.*, 2009).

### 7.1.1. Condomínios de agroenergia

Os primeiros projetos de condomínios de agroenergia surgiram na Europa no início de 1980. A central de geração de energia deve estar localizada de forma a beneficiar ao maior número de produtores rurais (RAVEN e GREGERSEN, 2007). Um condomínio de agroenergia pode contribuir de forma significativa para a sustentabilidade social e ambiental da atividade agropecuária. A grande disponibilidade dos resíduos agropecuários e os processos de conversão existentes podem torná-los fontes importantes de energia. As vantagens da agroenergia em relação aos combustíveis fósseis podem ser observadas em vários aspectos, por exemplo: (i) segurança alimentar; (ii) desenvolvimento rural; (iii) auto-suficiência energética local; (iv) gestão agropecuária sustentável; (v) conservação da biodiversidade e mitigação das mudanças climáticas; e (vi) melhoria do abastecimento e segurança energéticas (BEST, 2003).

Para a efetivação de sistemas agroenergéticos é fundamental que se considere questões referentes às prioridades de desenvolvimento, impactos ambientais, eficiência da tecnologia de conversão e custos de matérias-primas. No que diz respeito à questão econômica é de extrema importância a criação de incentivos para que a geração de energia a partir de resíduos agropecuários possa competir com os sistemas convencionais, principalmente os combustíveis fósseis.

O aproveitamento energético dos resíduos agropecuários constitui uma nova cadeia produtiva que se caracteriza principalmente por: (i) produção dos resíduos; (ii) transporte e logística; e (iii) tecnologia de conversão da biomassa. Dessa forma,

cadeia de agroenergia pode ser definida como conjunto de processos necessários para produzir, coletar, transportar e converter a biomassa residual da agropecuária em energia.

Os condomínios de agroenergia se definem como a área territorial onde se encontram as cadeias agroenergéticas, dispendo de tecnologia e organização para produzir e utilizar a energia oriunda da atividade agropecuária local e regional. Dentre os benefícios dos condomínios de agroenergia se destacam: (i) apropriação local da energia; (ii) criação de empregos; (iii) redução dos impactos ambientais (MANGOYANA e SMITH, 2011).

Os objetivos deste trabalho foram avaliar para condomínios de agroenergia formados por granjas de suínos e frangos de corte localizados em distintos municípios da região da Zona da Mata: (i) o potencial de produção de biometano a partir dos dejetos animais (suínos e frangos) e da codigestão de dejetos de animais com os resíduos vegetais disponíveis; (ii) o potencial de geração de energia elétrica a partir do biometano; (iii) o potencial de geração de biofertilizante; (iv) o potencial de geração de Certificados de Emissões Reduzidas (CER) de CO<sub>2</sub>; e (v) a viabilidade econômica dos condomínios de agroenergia considerando o transporte de resíduos por dutos ou estradas e o transporte do biometano por gasodutos.

## 7.2. MATERIAL E MÉTODOS

Para a avaliação do potencial de geração de energia elétrica, biofertilizante, certificados de emissões reduzidas, dimensionamento dos condomínios de agroenergia bem como da viabilidade econômica dos empreendimentos foi utilizada a ferramenta computacional SAUDADE (Sistema de Avaliação do Uso da Digestão Anaeróbia para o Dimensionamento Energético).

### 7.2.1. CONDOMÍNIO DE SUÍNOS

Foram dimensionados condomínios de pequeno, médio e grande porte considerando o rebanho de suínos para os municípios de Faria Lemos, Piranga e Jequeri, respectivamente.

O Quadro 7.1 apresenta informações referentes ao rebanho efetivo e a quantidade de suínos na maior granja dos municípios supracitados.

Quadro 7.1 – Quantidade de granjas e rebanho efetivo do município

Município	Quantidade de granjas	Rebanho de suínos
Faria Lemos	3	13.466
Piranga	9	33.167
Jequeri	17	143.151

Fonte: (IMA, 2013a)

O Quadro 7.2 apresenta os dados referentes à área plantada e à produção dos cultivos de café, feijão, milho e cana-de-açúcar para os municípios de Faria Lemos, Piranga e Jequeri referentes ao ano de 2012.

Quadro 7.2 – Área plantada e produção de café, feijão, milho e cana-de-açúcar

Município	Cultivo							
	Café		Feijão		Milho		Cana	
	Área Plantada (ha)	Produção (t)	Área Plantada (ha)	Produção (t)	Área Plantada (ha)	Produção (t)	Área Plantada (ha)	Produção (t)
Faria Lemos	930	837	55	39	70	108	41	3.485
Piranga	212	191	1.200	890	3.000	10.800	150	10.500
Jequeri	3.000	5.400	200	100	1.000	3.500	1.000	60.000

Fonte: (IBGE, 2014).

### 7.2.2. CONDOMÍNIO DE FRANGOS

Foram dimensionados condomínios de pequeno, médio e grande porte considerando o rebanho de frangos para os municípios de Leopoldina, Piraúba e São Miguel do Anta, respectivamente.

O Quadro 7.3 apresenta informações referentes ao rebanho efetivo e a quantidade de frangos na maior granja dos municípios supracitados.

Quadro 7.3 – Quantidade de granjas e rebanho efetivo do município

Município	Número de granjas	Quantidade de Frangos
Leopoldina	4	120.000
Piraúba	18	406.000
São Miguel do Anta	51	1.185.769

Fonte: (IMA, 2013b)

O Quadro 7.4 apresenta os dados referentes à área plantada e à produção dos cultivos de café, feijão, milho e cana-de-açúcar para os municípios de Leopoldina, Piraúba e São Miguel do Anta referente ao ano de 2012.

Quadro 7.4 – Área plantada e produção de café, feijão, milho e cana-de-açúcar

Município	Cultivo							
	Café		Feijão		Milho		Cana	
	Área Plantada (ha)	Produção (t)	Área Plantada (ha)	Produção (t)	Área Plantada (ha)	Produção (t)	Área Plantada (ha)	Produção (t)
Leopoldina	30	36	170	201	1.100	4.950	400	32.000
Piraúba	0	0	110	51	300	1.050	20	1.400
S. Miguel Anta	1.400	1.680	1.100	602	1.250	5.000	50	2.100

Fonte: (IBGE, 2014).

### 7.2.3. CENÁRIOS:

Os cenários simulados na ferramenta computacional SAUDADE para dimensionar o aproveitamento de resíduos agropecuários em granjas de suínos considerou: (i) o processo de conversão dos resíduos em metano (sem codigestão e com codigestão); (ii) as fontes de financiamento (recursos próprios ou empréstimo);

e (iii) a forma de comercialização (preço da energia elétrica nos leilões ou preço da energia elétrica praticados pelas concessionárias da região). O Quadro 7.5 mostra os cenários que foram simulados:

Quadro 7.5 – Cenários simulados

<b>SEM CODIGESTÃO</b>		
CENÁRIO	FINANCIAMENTO	COMERCIALIZAÇÃO
1	Recursos Próprios	Energia Elétrica Leilões
2	Empréstimo	Energia Elétrica Leilões
3	Recursos Próprios	Energia Elétrica Concessionária
4	Empréstimo	Energia Elétrica Concessionária
5	Recursos Próprios	Energia Elétrica Leilões+Biofertilizante
6	Empréstimo	Energia Elétrica Leilões+Biofertilizante
7	Recursos Próprios	Energia Elétrica Concessionária+Biofertilizante
8	Empréstimo	Energia Elétrica Concessionária+Biofertilizante
<b>COM CODIGESTÃO</b>		
CENÁRIO	FINANCIAMENTO	COMERCIALIZAÇÃO
9	Recursos Próprios	Energia Elétrica Leilões
10	Empréstimo	Energia Elétrica Leilões
11	Recursos Próprios	Energia Elétrica Concessionária
12	Empréstimo	Energia Elétrica Concessionária
13	Recursos Próprios	Energia Elétrica Leilões+Biofertilizante
14	Empréstimo	Energia Elétrica Leilões+Biofertilizante
15	Recursos Próprios	Energia Elétrica Concessionária+Biofertilizante
16	Empréstimo	Energia Elétrica Concessionária+Biofertilizante

### 7.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados e realizada a discussão sobre os condomínios de agroenergia dimensionados.

#### 7.3.1. CONDOMÍNIO FARIA LEMOS

O município de Faria Lemos se localiza no nordeste da região da Zona da Mata de Minas Gerais. Possui uma população de 3.603 habitantes distribuídos em uma área de 165,654 km<sup>2</sup>.

A Figura 7.1 mostra a localização do município de Faria Lemos na Zona da Mata de Minas Gerais.

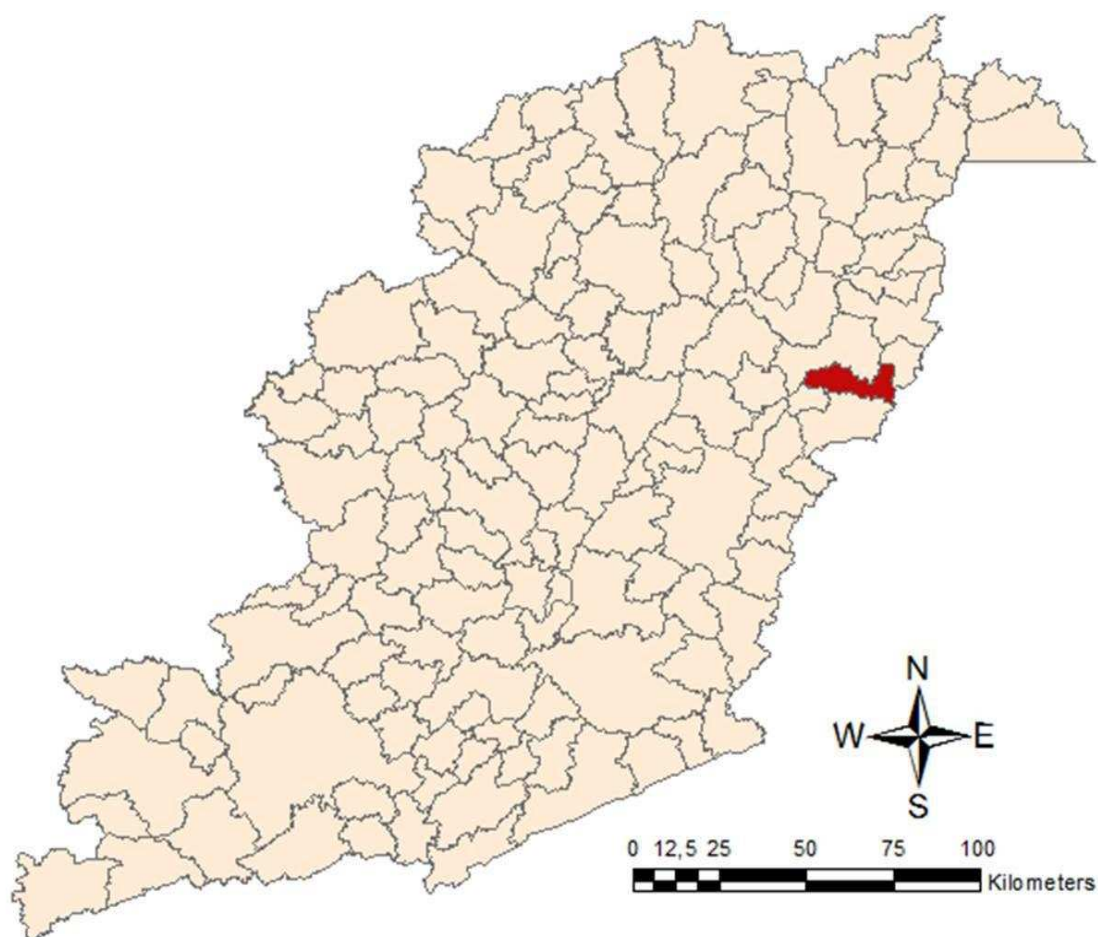


Figura 7.1 – Localização de Faria Lemos na Zona da Mata de Minas Gerais.

O Quadro 7.6 apresenta as granjas do município de Faria Lemos e suas respectivas quantidades de suínos e produção de dejetos.

Quadro 7.6 – Granjas e suas respectivas quantidades de suínos e produção de dejetos no município de Faria Lemos

Granja	Quantidade de suínos	Dejetos (t ano <sup>-1</sup> )
FL-1	9.324	24.358,83
FL-2	3.500	9.143,71
FL-3	642	1.677,22
Total	13.466	35.179,76

Fonte: (IMA, 2013a).

A carga poluidora dos dejetos de suínos produzidos nas granjas de Faria Lemos equivale a produzida por uma cidade de aproximadamente 43.091 habitantes (FLEMING e FORD, 2001).

A Figura 7.2 apresenta a localização das granjas no município de Faria Lemos.

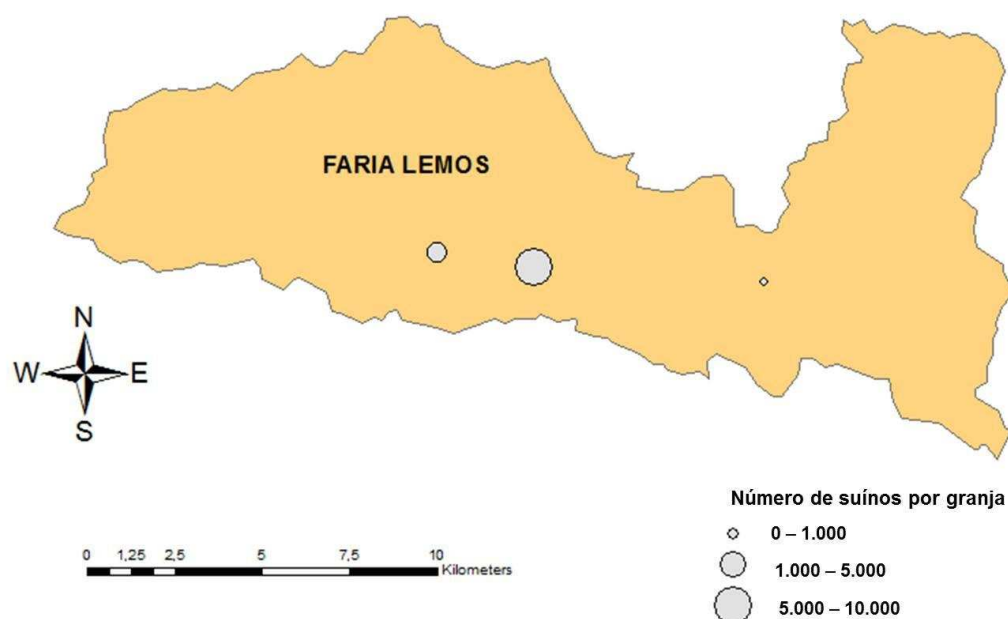


Figura 7.2 – Localização das granjas de suínos no município de Faria Lemos.

O Quadro 7.7 apresenta a massa de resíduos vegetais disponível no município de Faria Lemos.

Quadro 7.7 – Resíduos de cultivos vegetais disponíveis no município de Faria Lemos

Município	café (t ano <sup>-1</sup> )	feijão (t ano <sup>-1</sup> )	milho (t ano <sup>-1</sup> )	bagaço de cana (t ano <sup>-1</sup> )	palha de cana (t ano <sup>-1</sup> )
Faria Lemos	502,2	55,1	17,0	167,3	244,0

A Figura 7.3 apresenta a produção de biometano por substrato, considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos suínos para o Condomínio de Agroenergia de Faria Lemos.

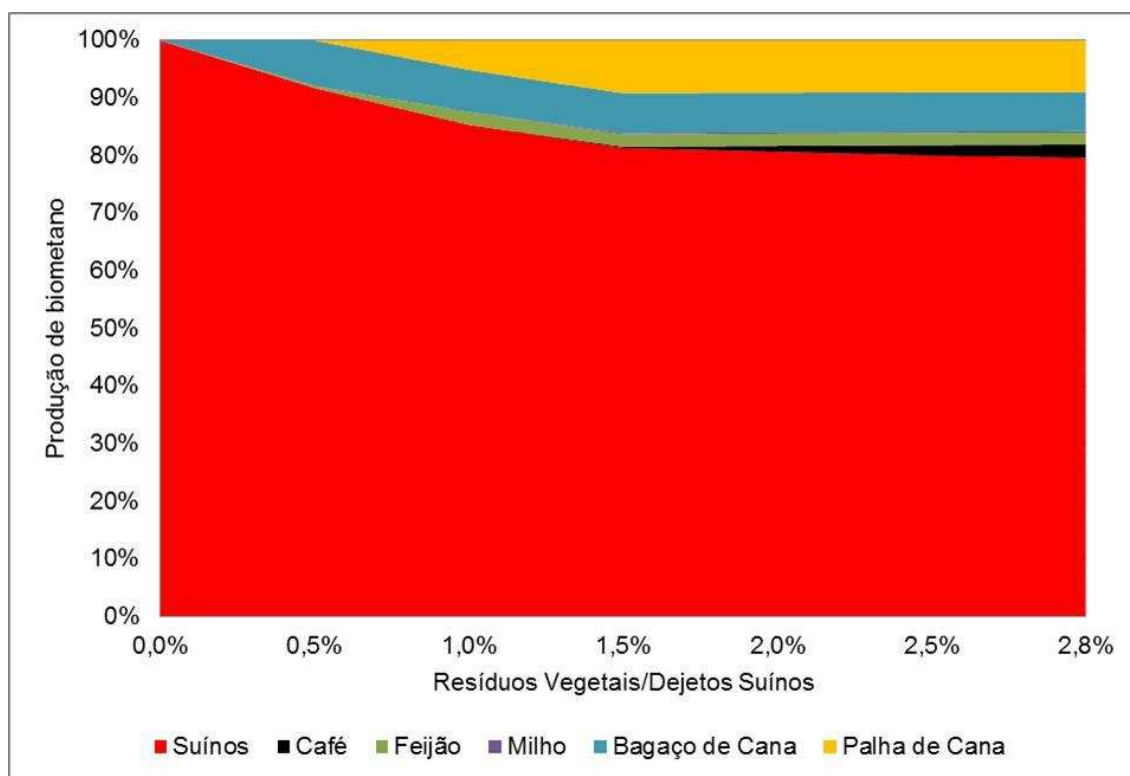


Figura 7.3 – Produção de biometano por substrato.

Os dejetos de suínos respondem pela maior parcela do biometano produzido. Dada a disponibilidade de resíduos vegetais, a contribuição máxima dos mesmos é de 20,36% da produção de biometano.

A Figura 7.4 apresenta a produção de biometano e a respectiva potência elétrica gerada.

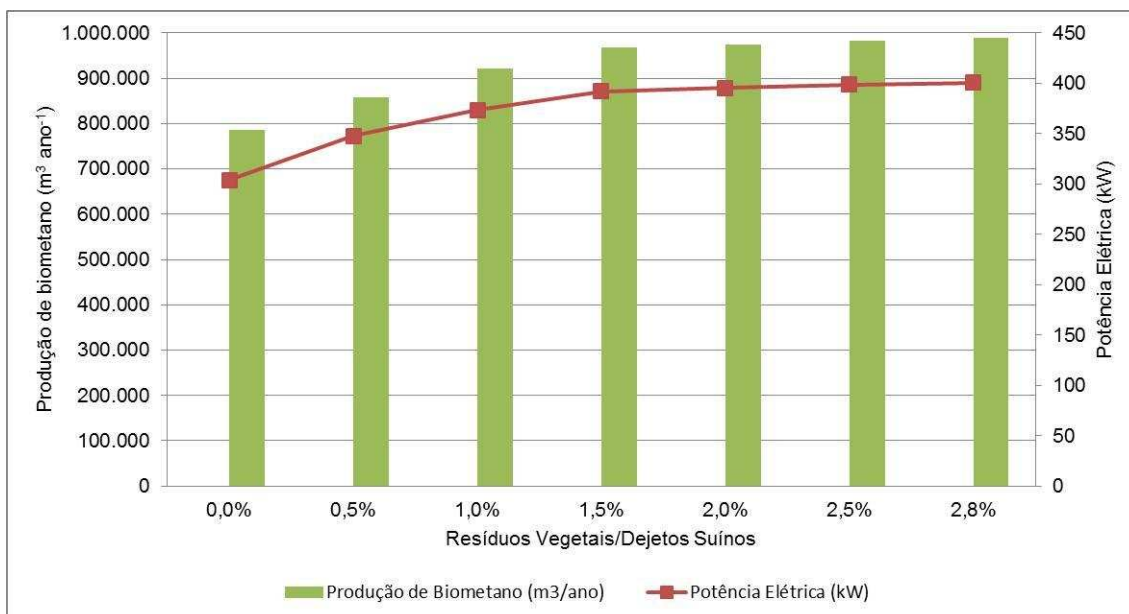


Figura 7.4 – Produção de biometano e potência elétrica.

A produção de biometano a partir dos resíduos agropecuários disponíveis chega a 988.207 m³/ano e a potência elétrica disponível é de 400 kW.

A Figura 7.5 apresenta a energia elétrica produzida considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos suínos para o Condomínio de Agroenergia de Faria Lemos.

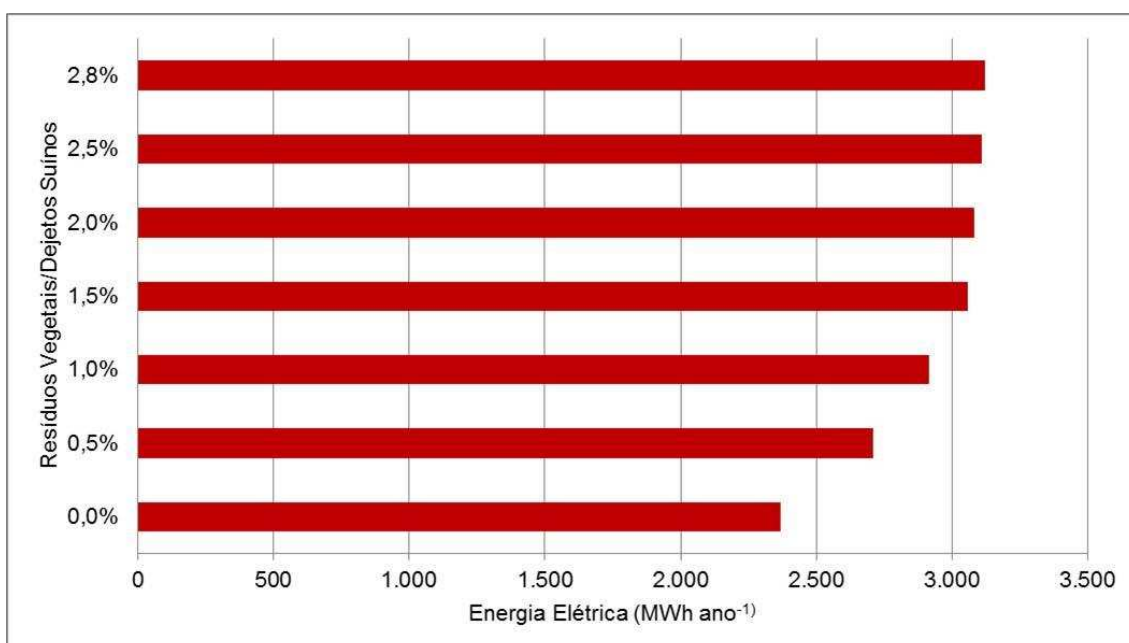


Figura 7.5 – Energia elétrica produzida.

O consumo total de energia elétrica no município de Faria Lemos no ano de 2012 foi de 1.447,90 MWh (CEMIG, 2013). A eletricidade gerada com o biometano

obtido dos dejetos de suínos e resíduos vegetais possibilitaria atender a demanda ocorrendo um excedente de 1.675,78 MWh.

### Produção de biofertilizante

A Figura 7.6 apresenta a massa de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) contida no digestato dos resíduos agropecuários no Condomínio de Agroenergia de Faria Lemos.

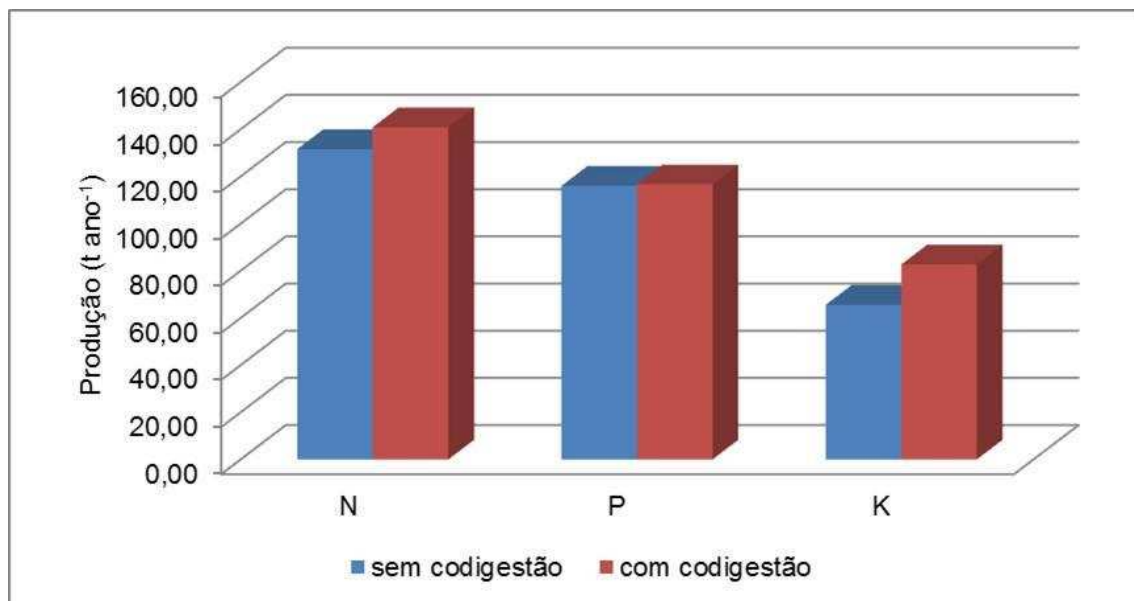


Figura 7.6 – Produção de biofertilizante no Condomínio de Agroenergia de Faria Lemos.

O aumento na produção de Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) com a codigestão dos dejetos de suínos e resíduos vegetais é de 7,06%, 0,58% e 16,10%, respectivamente.

O Quadro 7.8 apresenta a intensidade de uso de fertilizantes das culturas do café, feijão, milho e cana-de-açúcar no município de Faria Lemos.

## Quadro 7.8 – Intensidade do uso de fertilizantes por culturas no município de Faria Lemos

Cultura	Consumo (t.ha <sup>-1</sup> )	Área Plantada (ha)	Massa utilizada (t)
Café	0,54	930	502,20
Feijão	0,15	55	8,25
Milho	0,31	70	21,70
Cana-de-açúcar	0,46	41	18,86

Fonte: (DONZELLI, 2005)

É necessária a realização da análise de solo a definição da quantidade de nutriente a ser aplicada no solo do município.

### Mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>

A Figura 7.7 apresenta o potencial de toneladas de dióxido de carbono que podem ser mitigadas com a geração de energia elétrica a partir da codigestão dos resíduos agropecuários no Condomínio de Agroenergia de Faria Lemos.

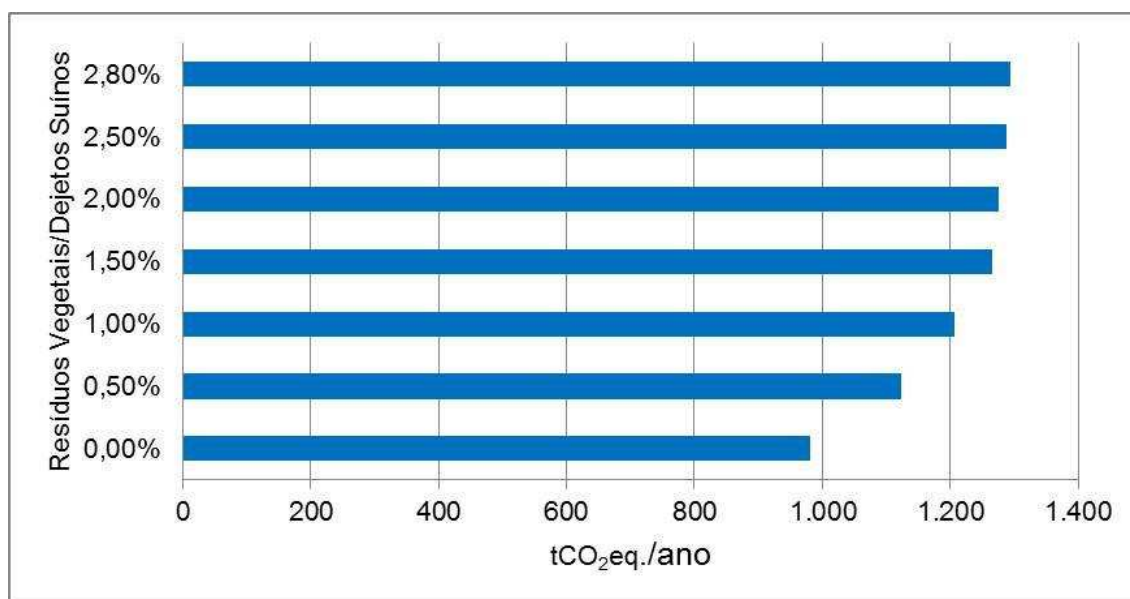


Figura 7.7 – Potencial de mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>.

Considerando-se que a intensidade de emissão média de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>eq.) da carne suína é de 6,1 kg de CO<sub>2</sub>eq./Kg de carcaça, sendo a produção de ração para os animais e a gestão dos dejetos respondendo pela maior parte das emissões (MACLEOD, *et al.*, 2013). O peso médio da carcaça suína produzida em Minas Gerais no ano de 2012 foi de 88,1 kg (MINAS GERAIS, 2015a).

Tem-se que a emissão de CO<sub>2</sub>eq. para a produção de suínos no condomínio de Faria Lemos é de 14.473,5 tCO<sub>2</sub>eq./ano. A geração de eletricidade a partir dos resíduos agropecuários é capaz de compensar 8,93% do total de emissões. É importante observar que essa mitigação diz respeito apenas ao aproveitamento energético dos resíduos. A cadeia produtiva da suinocultura é formada por outros elos emissores de dióxido de carbono.

## TRANSPORTE DE BIOMETANO E DE RESÍDUOS

### GASODUTO/RESIDUODUTO

O comprimento total do duto para conectar as 3 granjas de suínos do Condomínio Faria Lemos é de 11.286 metros. O Quadro 9 apresenta o comprimento de cada um dos dutos dimensionados para o condomínio.

Quadro 7.9 – Comprimento dos dutos dimensionados para o Condomínio de Agroenergia de Jequeri

Duto	Comprimento (m)
1	9.749
2	1.536
Total	11.286

A Figura 7.8 apresenta a rotas traçada pelos dutos no território do município de Faria Lemos.

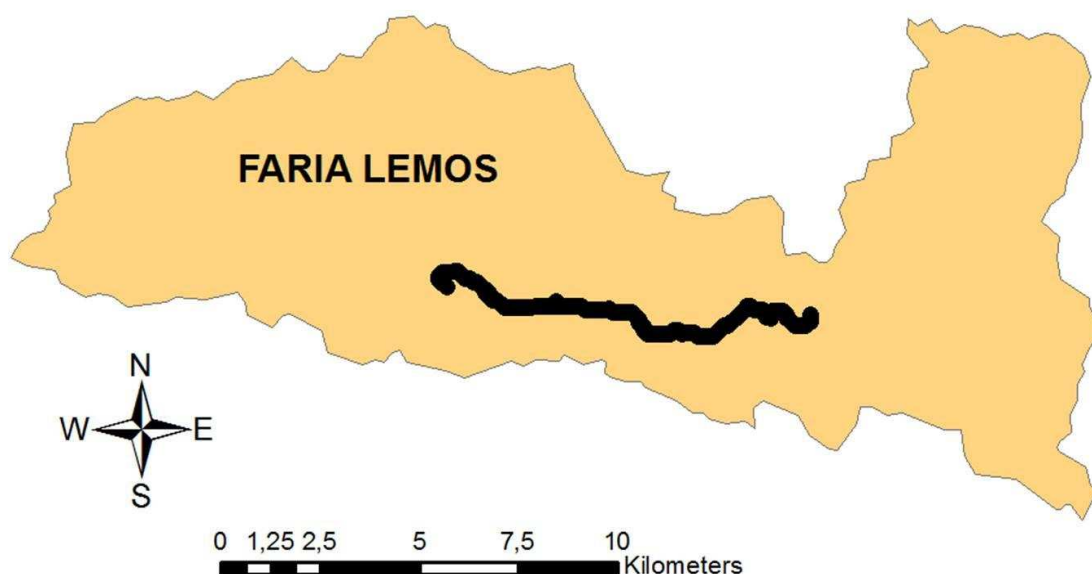


Figura 7.8 – Traçado dos dutos no município de Jequeri.

#### Estradas

O comprimento das rotas de transporte dos resíduos suínos por estradas (desde as granjas até a central de geração de energia) no município de Faria Lemos é mostrado no Quadro 7.10.

Quadro 7.10 – Comprimento das rotas de transporte dos resíduos de suínos por estradas

Rota	Distância (km)
1	8,5
2	4,9
Total	13,4

#### ANÁLISE ECONÔMICA

A Figura 7.9 apresenta os custos de produção de energia elétrica considerando: (i) transporte do biometano por gasoduto; (ii) o transporte dos resíduos por residuoduto; e (iii) o transporte dos resíduos por estradas comparados com o valor pago nos leilões de eletricidade da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e os preços de comercialização da energia praticados pelas concessionárias da região.

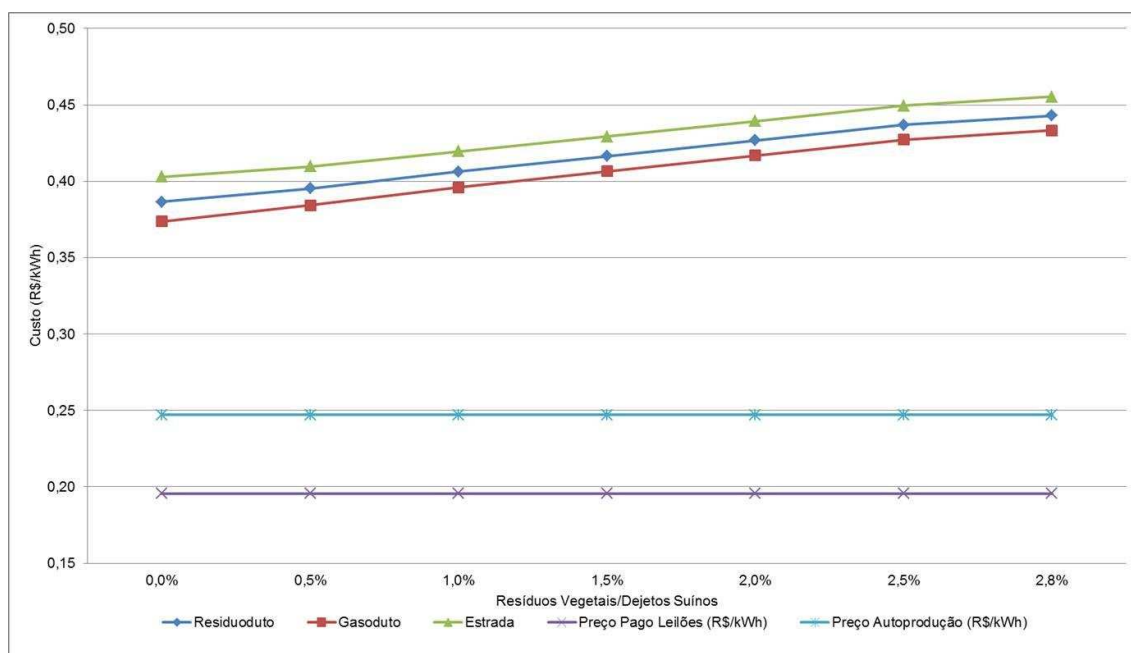


Figura 7.9 – Custo de produção de energia elétrica para diferentes modais de transporte no Condomínio de Agroenergia de Faria Lemos.

O custo da produção de energia elétrica com a codigestão aumenta de acordo com a adição de resíduos vegetais no substrato. O preço pago pela energia gerada a partir do biometano de resíduos agropecuários nos leilões e os praticados pelas concessionárias na região são menores que os custos de produção dos três modais de transporte (residuoduto, gasoduto e estrada). O custo de produção no modal gasoduto é menor que o dos modais residuoduto e estrada.

Na Alemanha, país em que a capacidade instalada a partir do biogás é de 4 GW, o valor pago pelo MWh gerado é de R\$ 467,41 (EEG, 2014).

### VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)

A Figura 7.10 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 1 a 8 em que ocorre o aproveitamento apenas de dejetos de suínos (sem codigestão).

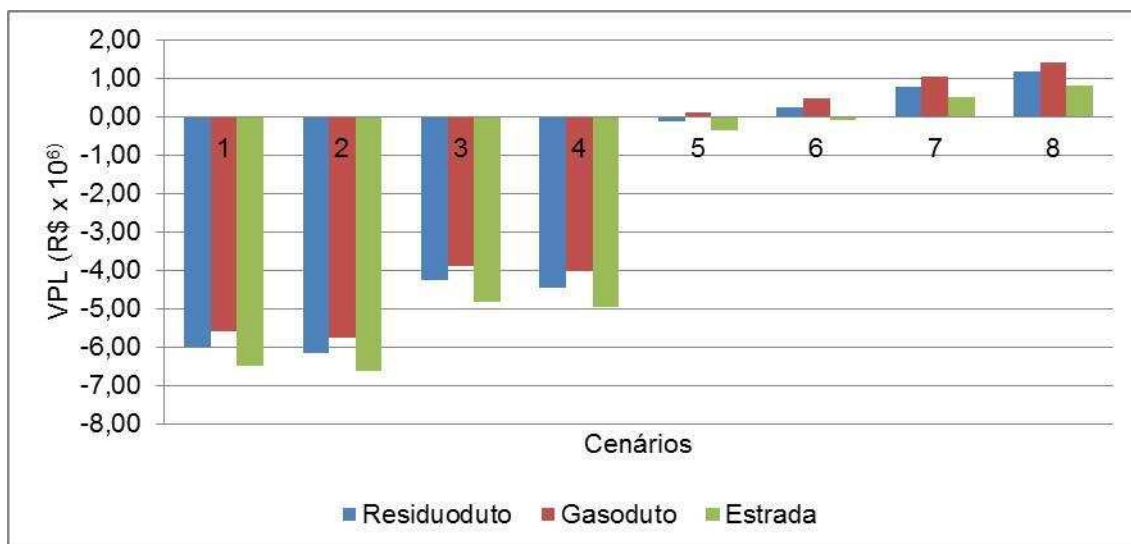


Figura 7.10 – VPL para os cenários sem codigestão.

Para os cenários 1, 2, 3 e 4 em que se comercializa apenas a energia elétrica gerada a partir do biometano a valores dos leilões de energia e da tarifa das concessionárias, com financiamento dos empreendimentos com recursos próprios e por meio de empréstimos não há viabilidade econômica, ou seja,  $VPL < 0$ .

Para os cenários 5, 6, 7 e 8 em que se comercializam a energia elétrica gerada a partir do biometano a valores dos leilões de energia e da tarifa das concessionárias e o biofertilizante, com financiamento dos empreendimentos com recursos próprios ou por meio de empréstimos, a viabilidade econômica ( $VPL > 0$ ) existe no cenário 5 apenas para o transporte do biometano por meio de gasodutos. O cenário 6 é viável economicamente apenas para os modais de transporte residuoduto e gasoduto. Já os cenários 7 e 8 apresentam viabilidade econômica para os três modais de transporte de resíduos e biometano. A comercialização do biofertilizante é determinante para a viabilidade econômica dos empreendimentos de geração de energia elétrica sem codigestão.

Nos cenários 5 e 6, em que a energia elétrica é comercializada aos preços praticados nos leilões de energia nova, o biofertilizante responde por mais da metade da receita obtida. Nos cenários 7 e 8, em que a energia elétrica é comercializada aos valores das tarifas praticadas pelas concessionárias, o biofertilizante responde por 45,37% da receita obtida pelo empreendimento.

A Figura 7.11 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 0,5%.

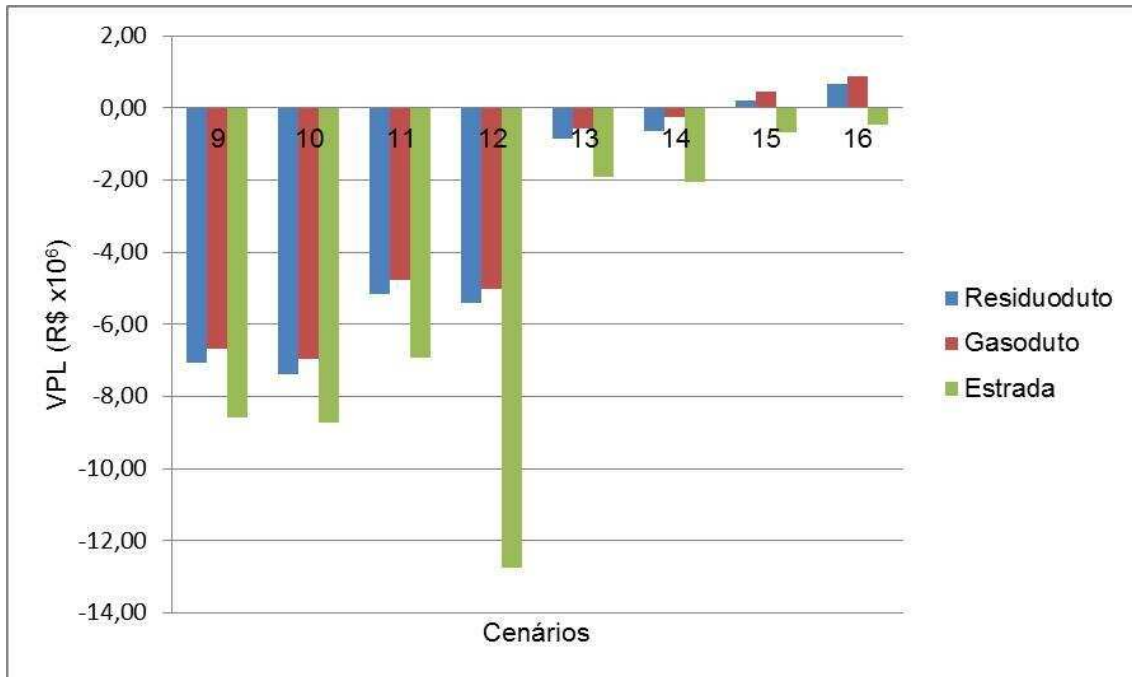


Figura 7.11 – VPL para os cenários de codigestão com 0,5% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 0,5% implica na utilização de uma massa total igual a 175,9 t ano<sup>-1</sup> de resíduos dos cultivos agrícolas de café, feijão, milho e cana-de-açúcar. Os cenários 15 e 16 apresentam viabilidade econômica para os transporte de resíduos e biometano por meio de dutos. Nestes cenários a comercialização da energia elétrica gerada responde por mais da metade da receita obtida pelo empreendimento. Isso se deve à maior contribuição dos resíduos vegetais empregados na codigestão para a produção de biometano do que de biofertilizante.

A Figura 7.12 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 1,0%.

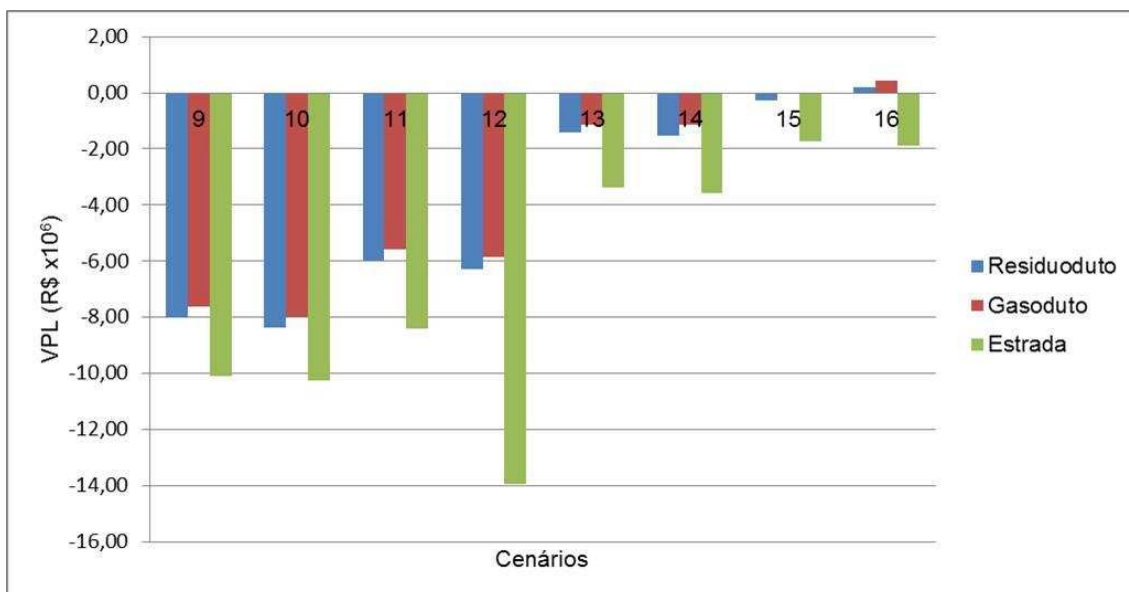


Figura 7.12 – VPL para os cenários de codigestão com 1,0% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 1,0% implica na utilização de uma massa total igual a 351,8 t ano<sup>-1</sup> de resíduos dos cultivos agrícolas de café, feijão, milho e cana-de-açúcar. O cenário 16 é o único que apresenta viabilidade econômica para o transporte de resíduos e biometano por meio de dutos. Neste cenário a comercialização da energia elétrica gerada responde por mais da metade da receita obtida pelo empreendimento. Isso se deve à maior contribuição dos resíduos vegetais empregados na codigestão para a produção de biometano do que de biofertilizante.

A Figura 7.13 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 1,5%.

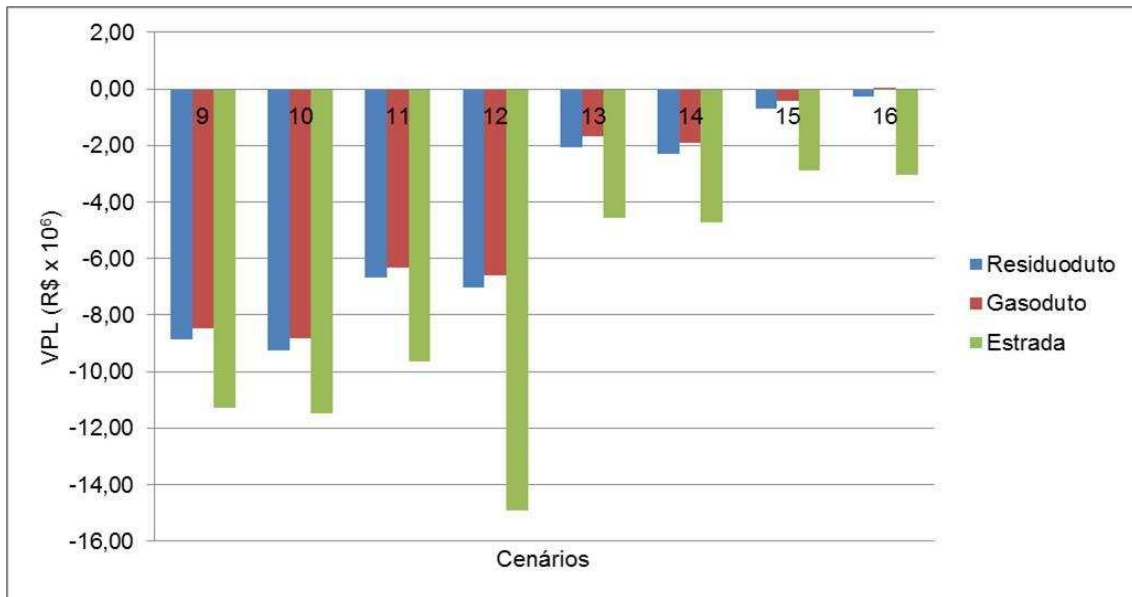


Figura 7.13 – VPL para os cenários de codigestão com 1,5% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 1,5% implica na utilização de uma massa total igual a 527,7 t ano<sup>-1</sup> de resíduos dos cultivos agrícolas de café, feijão, milho e cana-de-açúcar. O cenário 16 é o único que apresenta viabilidade econômica somente para o transporte de biometano por meio de gasodutos. Neste cenário a comercialização da energia elétrica gerada responde por mais da metade da receita obtida pelo empreendimento. Isso se deve à maior contribuição dos resíduos vegetais empregados na codigestão para a produção de biometano do que de biofertilizante.

A Figura 7.14 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 2,0%.

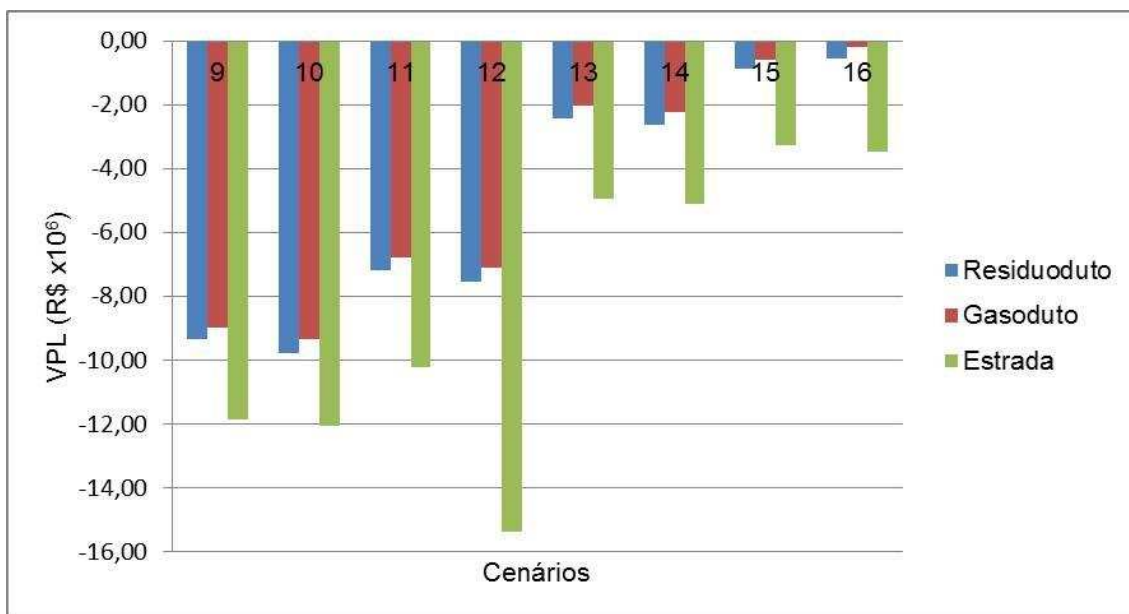


Figura 7.14 – VPL para os cenários de codigestão com 2,0% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 2,0% não apresenta viabilidade econômica em nenhum dos cenários simulados.

A Figura 7.15 apresenta o aumento na produção de biometano com a codigestão considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos suínos para o Condomínio de Agroenergia de Faria Lemos.

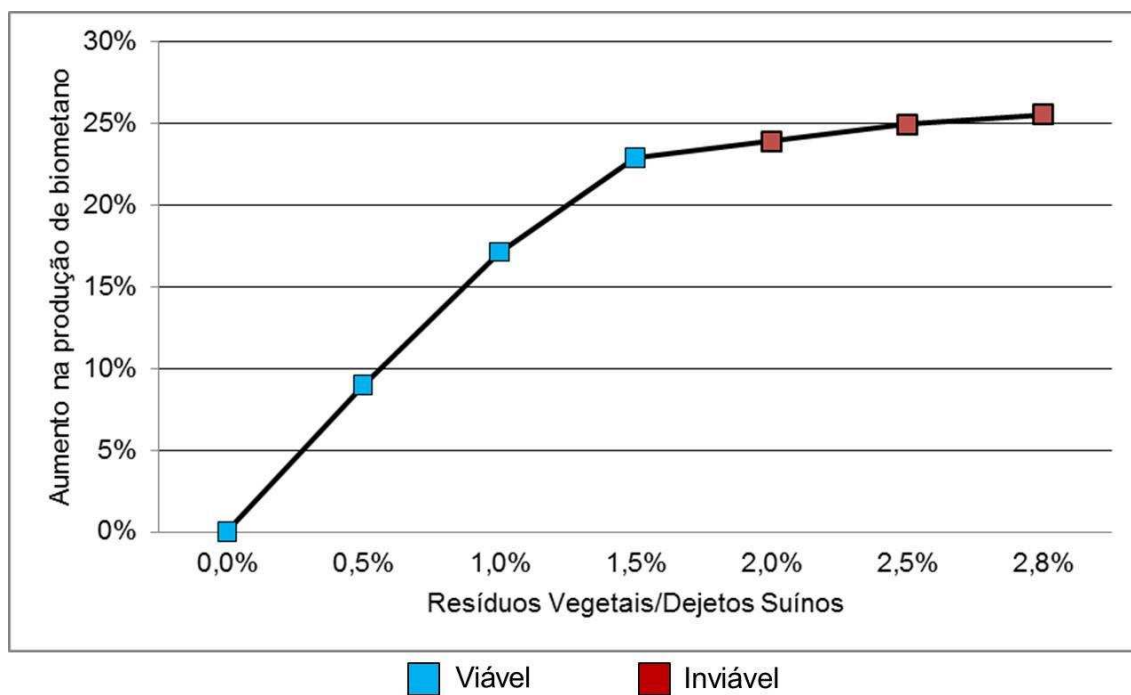


Figura 7.15 – Aumento na produção de biometano com a codigestão.

O aumento percentual da produção de biometano com a codigestão chega a 26%. No entanto a codigestão só é viável para cenários com razões resíduos vegetais/dejetos suínos de 0,5%, 1,0% e 1,5%. Para as demais razões resíduos vegetais/dejetos suínos simuladas, todos os cenários são inviáveis economicamente.

### 7.3.2. CONDOMÍNIO PIRANGA

O município de Piranga se localiza no noroeste da região da Zona da Mata de Minas Gerais. Possui uma população de 17.232 habitantes distribuídos em uma área de 658,812 km<sup>2</sup>.

A Figura 7.16 mostra a localização do município de Piranga na Zona da Mata de Minas Gerais.

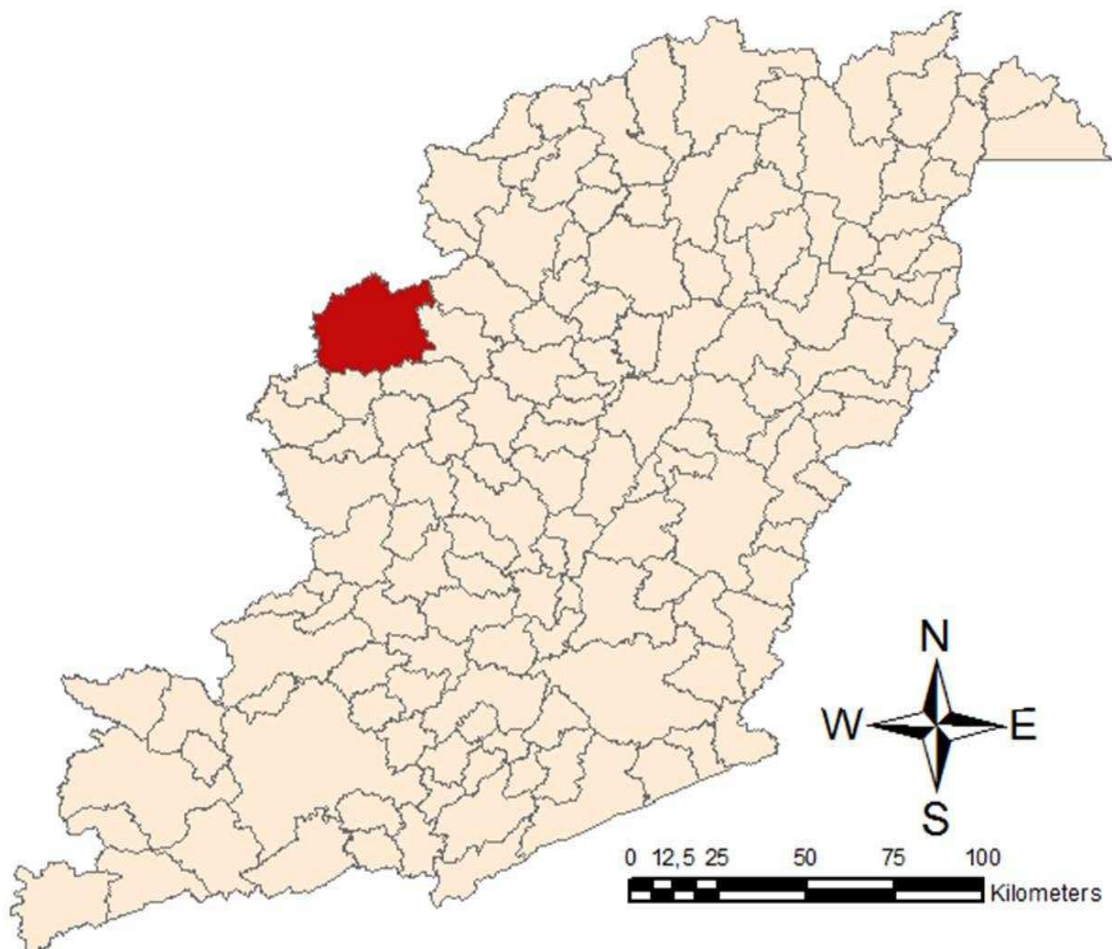


Figura 7.16 – Localização de Piranga na Zona da Mata de Minas Gerais.

O Quadro 7.11 apresenta as granjas do município de Piranga e suas respectivas quantidades de suínos e produção de dejetos.

Quadro 7.11 – Granjas e suas respectivas quantidades de suínos e produção de dejetos no município de Piranga

Granja	Quantidade de suínos	Dejetos (t ano <sup>-1</sup> )
PG-1	8.550	22.336,77
PG-2	4.033	10.536,16
PG-3	3.500	9.143,71
PG-4	3.500	9.143,71
PG-5	3.057	7.986,37
PG-6	3.000	7.837,46
PG-7	3.000	7.837,46
PG-8	2.965	7.746,03
PG-9	1.562	4.080,71
Total	33.167	86.648,38

Fonte: (IMA, 2013a).

A carga poluidora dos dejetos de suínos produzidos nas granjas de Faria Lemos equivale a produzida por uma cidade de aproximadamente 106.134 habitantes (FLEMING e FORD, 2001).

A Figura 7.17 apresenta a localização das granjas no município de Piranga.

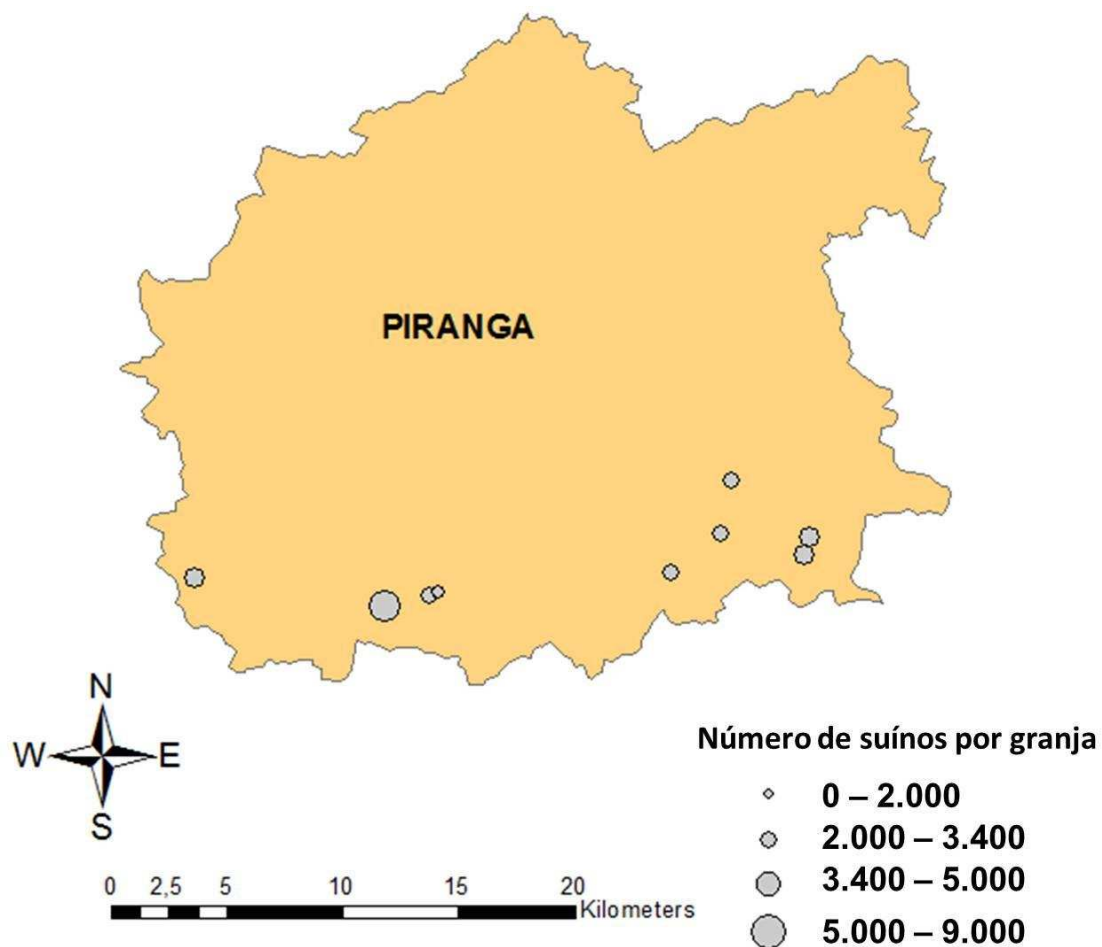


Figura 7.17 – Localização das granjas de suínos no município de Piranga.

O Quadro 12 apresenta a massa de resíduos vegetais disponível no município de Piranga.

Quadro 7.12 – Resíduos de cultivos vegetais disponíveis no município de Piranga

Município	café (t ano <sup>-1</sup> )	feijão (t ano <sup>-1</sup> )	milho (t ano <sup>-1</sup> )	bagaço de cana (t ano <sup>-1</sup> )	palha de cana (t ano <sup>-1</sup> )
Piranga	113,4	1.101,0	1.278,0	504,0	735,0

A Figura 7.18 apresenta a produção de biometano por substrato, considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos suínos para o Condomínio de Agroenergia de Piranga.

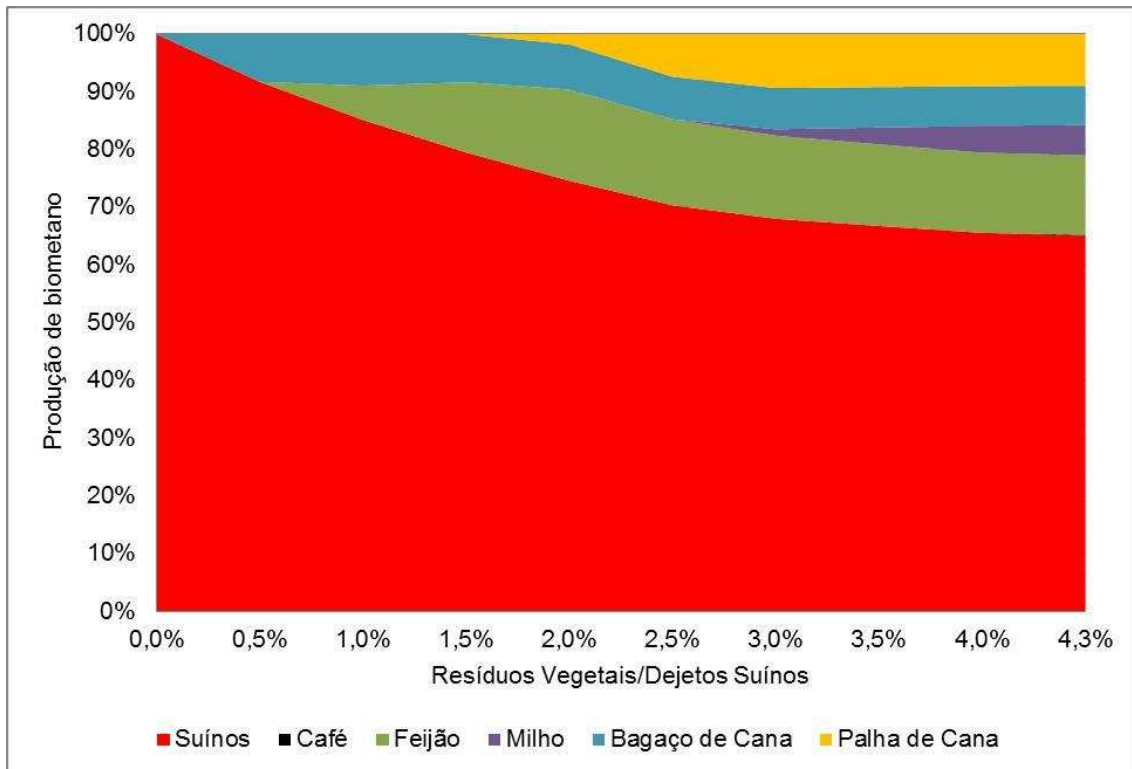


Figura 7.18 – Produção de biometano por substrato.

Os dejetos de suínos respondem pela maior parcela do biometano produzido. Dada a disponibilidade de resíduos vegetais, a contribuição máxima dos mesmos é de 34,95% da produção de biometano.

A Figura 7.19 apresenta a produção de biometano e a respectiva potência elétrica gerada.

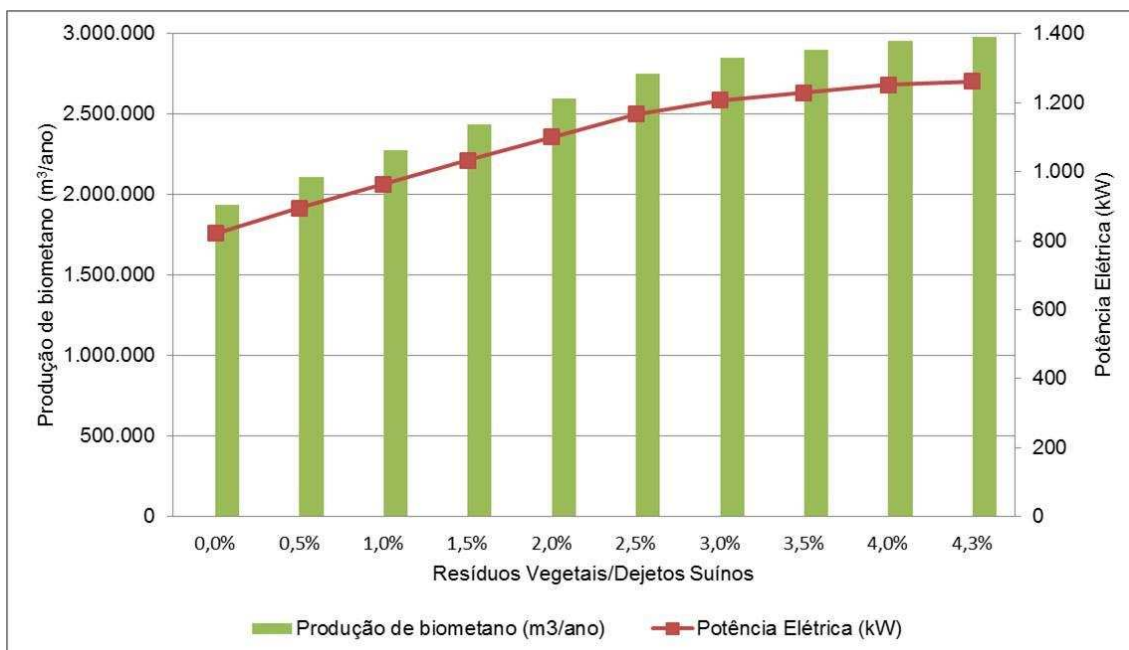


Figura 7.19 – Produção de biometano e potência elétrica.

O potencial de produção de biometano a partir dos resíduos agropecuários disponíveis chega a 2.979.922 m³/ano e a potência elétrica disponível é de 1,26 MW.

A Figura 7.20 apresenta a energia elétrica produzida considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos suínos para o Condomínio de Agroenergia de Piranga.

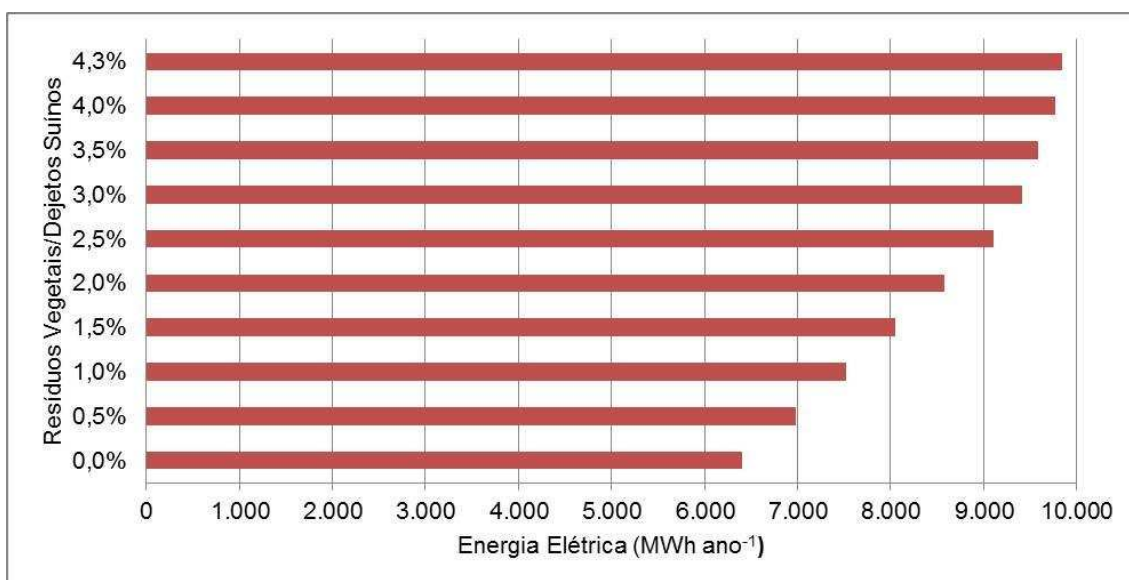


Figura 7.20 – Energia elétrica produzida.

O consumo total de energia elétrica no município de Piranga no ano de 2012 foi de 5.468,01 MWh (CEMIG, 2013). A eletricidade gerada com o biometano obtido

dos dejetos de suínos e resíduos vegetais possibilitaria atender a demanda ocorrendo um excedente de 4.375,93 MWh.

## PRODUÇÃO DE BIOFERTILIZANTE

A Figura 7.21 apresenta a massa de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) contida no digestato dos resíduos agropecuários no Condomínio de Agroenergia de Piranga.

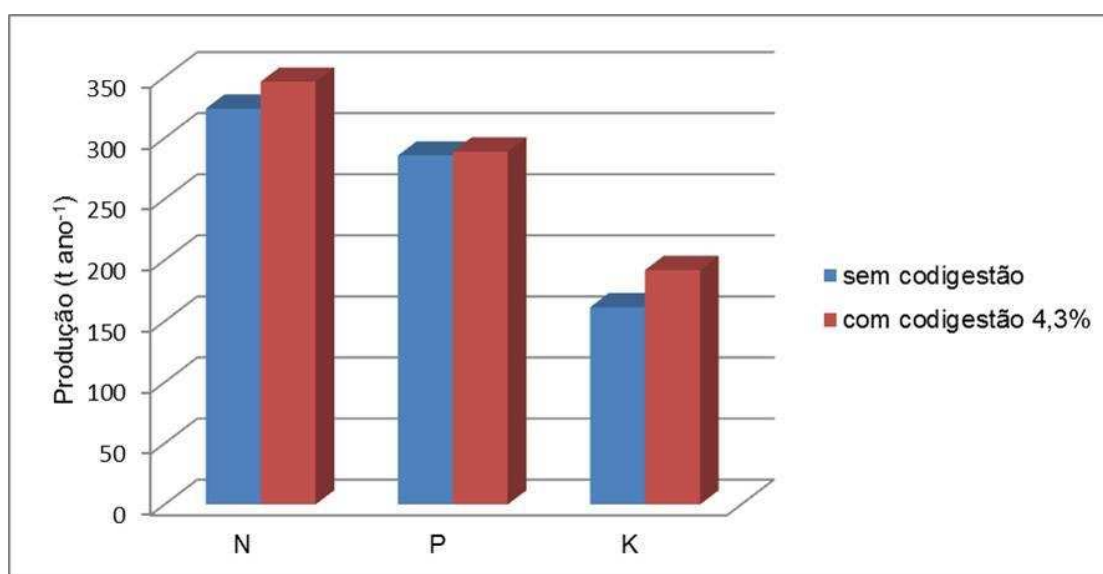


Figura 7.21 – Produção de biofertilizante no Condomínio de Agroenergia de Piranga.

O aumento na produção de Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) com a codigestão dos dejetos de suínos e resíduos vegetais é de 6,81%, 1,12% e 18,87%, respectivamente.

O Quadro 7.13 apresenta a intensidade de uso de fertilizantes das culturas do café, feijão, milho e cana-de-açúcar no município de Piranga.

Quadro 7.13 – Intensidade de uso fertilizantes por culturas no município de Piranga

Cultura	Consumo (t.ha <sup>-1</sup> )	Área Plantada (ha)	Massa utilizada (t)
Café	0,54	212	114,48
Feijão	0,15	1.200	180,00
Milho	0,31	3.000	930,00
Cana-de-açúcar	0,46	150	69,00

Fonte: (DONZELLI, 2005)

É necessário que se realize a análise de solo a definição da quantidade de nutriente a ser aplicada no solo do município.

## MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

A Figura 7.22 apresenta o potencial de toneladas de dióxido de carbono que podem ser mitigadas com a geração de energia elétrica a partir da codigestão dos resíduos agropecuários no Condomínio de Agroenergia de Piranga.

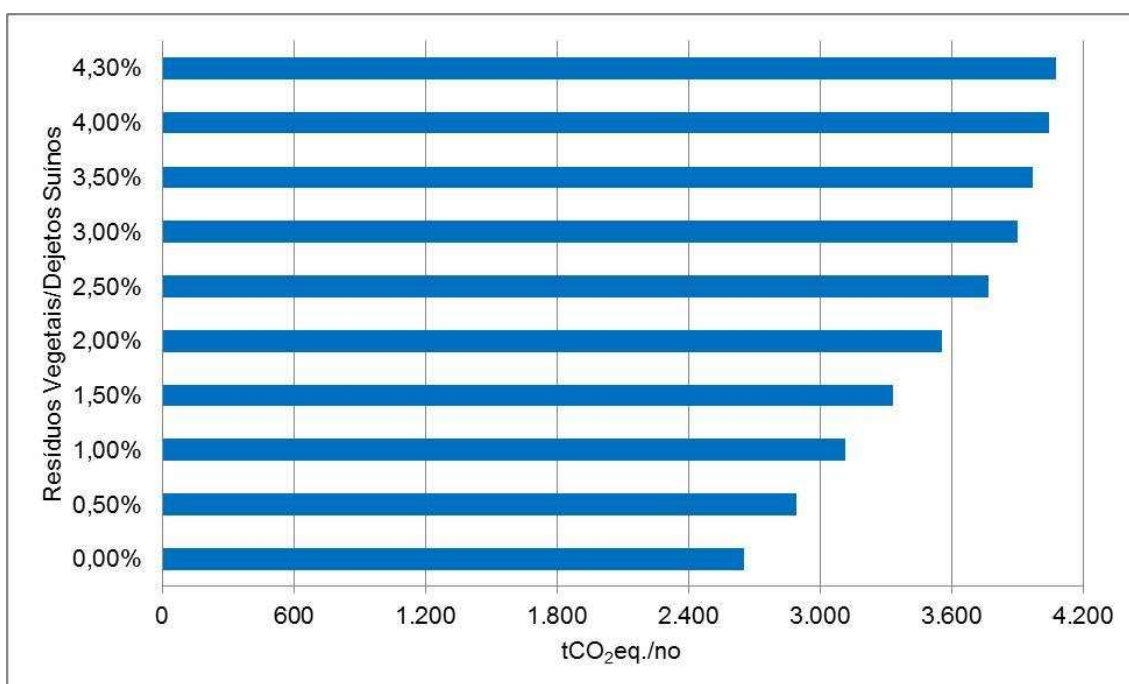


Figura 7.22 – Potencial de mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>.

Considerando-se que a intensidade de emissão média de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>eq.) da carne suína é de 6,1 kg de CO<sub>2</sub>eq./Kg de carcaça, sendo a produção de ração para os animais e a gestão dos dejetos respondendo pela maior parte das emissões (MACLEOD, *et al.*, 2013). O peso médio da carcaça suína produzida em Minas Gerais no ano de 2012 foi de 88,1 kg (MINAS GERAIS, 2015a). Tem-se que a emissão de CO<sub>2</sub>eq. para a produção de suínos no condomínio de Piranga é de 35.648,6 tCO<sub>2</sub>eq./ano. A geração de eletricidade a partir dos resíduos agropecuários é capaz de compensar 11,43% do total de emissões. É importante observar que essa mitigação diz respeito apenas ao aproveitamento energético dos

resíduos. A cadeia produtiva da suinocultura é formada por outros elos emissores de dióxido de carbono.

## TRANSPORTE DE BIOMETANO E DE RESÍDUOS

### GASODUTO/RESIDUODUTO

O Quadro 7.14 apresenta o comprimento de cada um dos dutos dimensionados para o condomínio.

Quadro 7.14 – Comprimento dos dutos dimensionados para o Condomínio de Agroenergia de Piranga

Duto	Comprimento (m)
1	10.967
2	2.194
3	494
4	15.750
5	3.029
6	2.703
7	4.481
8	880
Total	40.498

A Figura 7.23 apresenta a rotas traçada pelos dutos no território do município de Piranga.

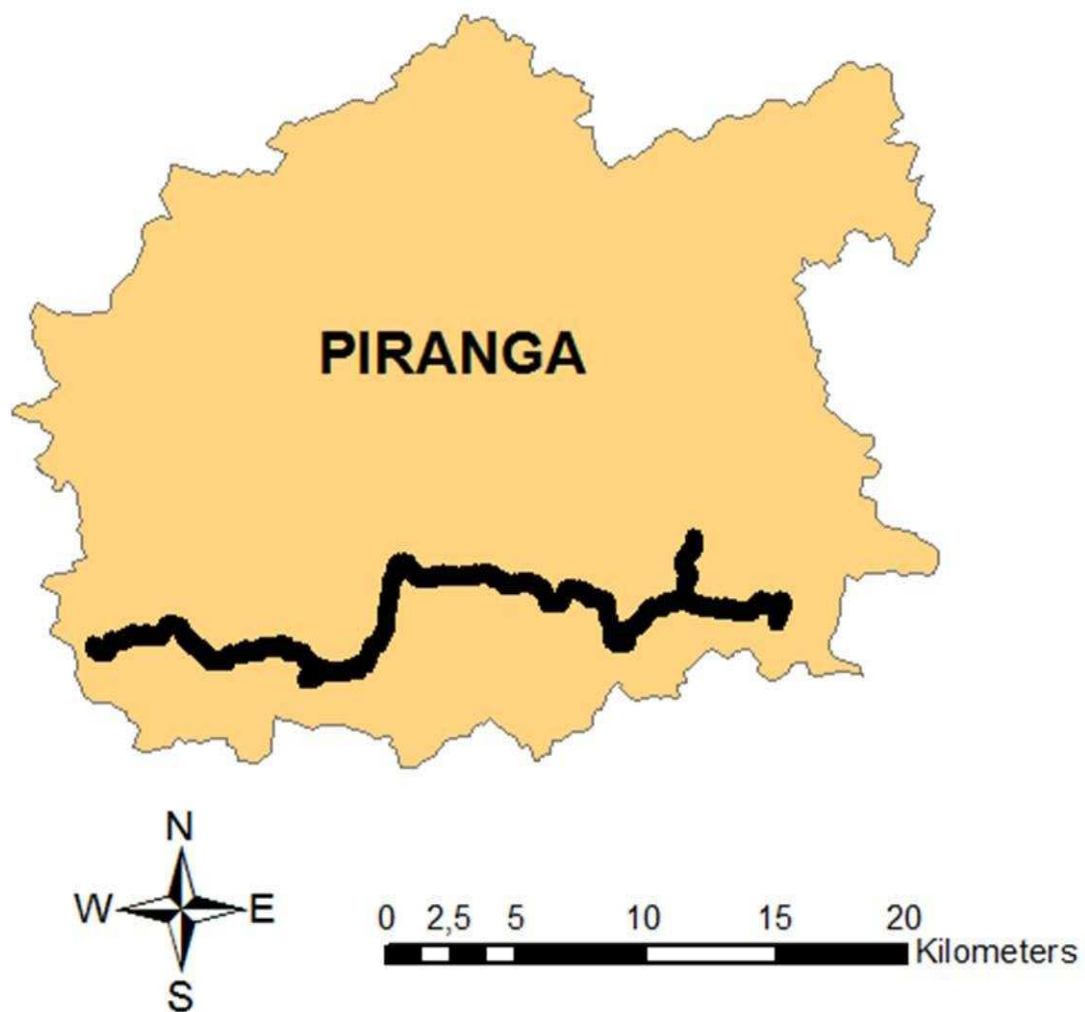


Figura 7.23 – Traçado dos dutos no município de Piranga.

#### Estradas

O comprimento das rotas de transporte dos resíduos suínos por estradas (desde as granjas até a central de geração de energia) no município de Piranga é mostrado no Quadro 7.15.

Quadro 7.15 – Comprimento das rotas de transporte dos resíduos de suínos por estradas

Rota	Distância (km)
1	20
2	2,4
3	26,6
4	14,1
5	3,1
6	26,6
7	18,8
8	21,5
Total	133,1

## ANÁLISE ECONÔMICA

A Figura 7.24 apresenta os custos de produção de energia elétrica considerando: (i) transporte do biometano por gasoduto; (ii) o transporte dos resíduos por residuoduto; e (iii) o transporte dos resíduos por estradas comparados com o valor pago nos leilões de eletricidade da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e os preços de comercialização da energia praticados pelas concessionárias da região.

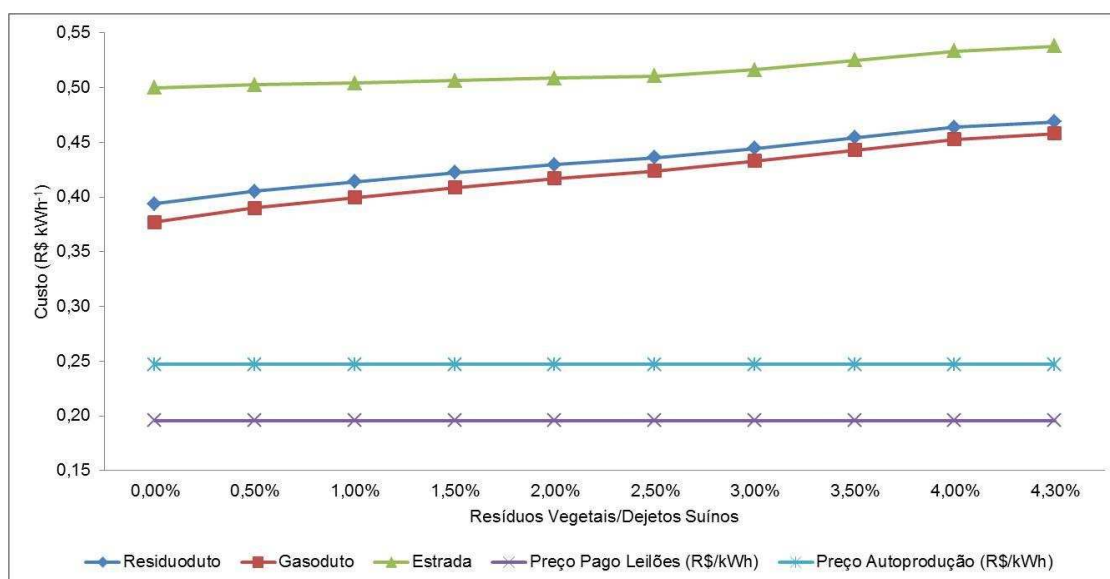


Figura 7.24 – Custo de produção de energia elétrica para diferentes modais de transporte no Condomínio de Agroenergia de Piranga.

O custo da produção de energia elétrica com a codigestão aumenta de acordo com a adição de resíduos vegetais no substrato. O preço pago pela energia gerada a partir do biometano de resíduos agropecuários nos leilões e os praticados pelas concessionárias na região são menores que os custos de produção dos três modais de transporte (residuoduto, gasoduto e estrada). O custo de produção com o transporte dos dejetos de suínos por estradas é maior que no transporte por duto. O menor custo de produção de energia elétrica a partir dos resíduos agropecuários é pelo modal de transporte de biometano por gasoduto.

### VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)

A Figura 7.25 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 1 a 8 em que ocorre o aproveitamento apenas de dejetos de suínos (sem codigestão).

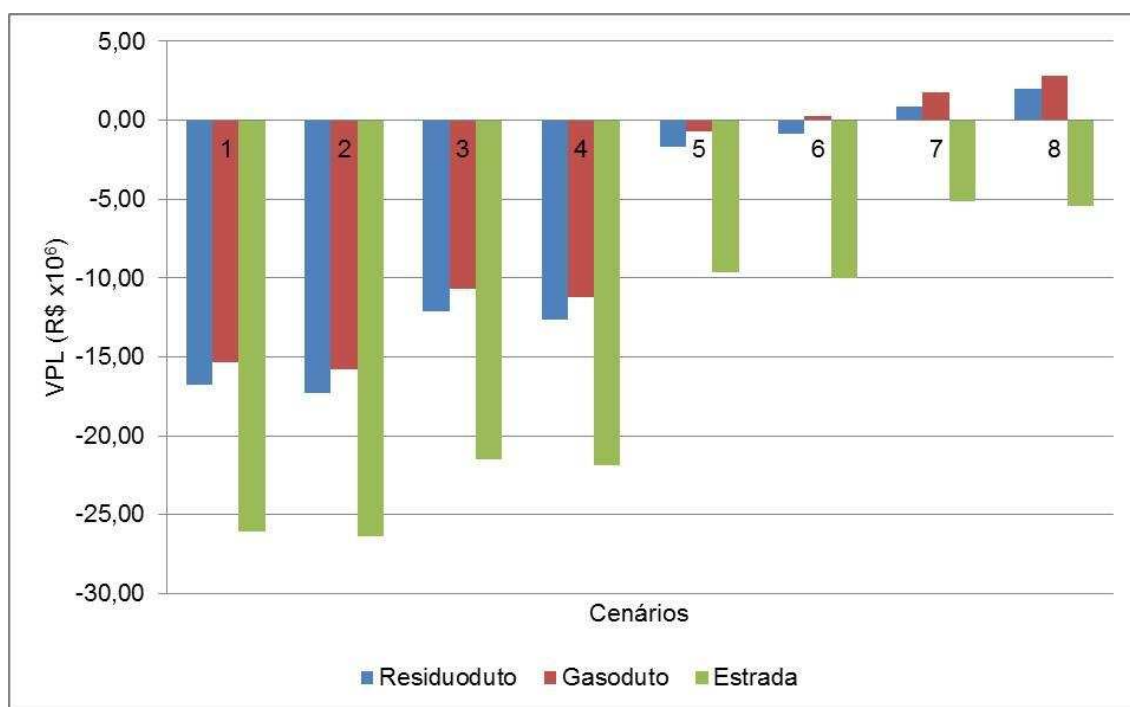


Figura 7.25 – VPL para os cenários sem codigestão.

Para os cenários 1, 2, 3, 4 e 5 em que se comercializa apenas a energia elétrica gerada a partir do biometano a valores dos leilões de energia e da tarifa das concessionárias, com financiamento dos empreendimentos com recursos próprios e por meio de empréstimos não há viabilidade econômica, ou seja,  $VPL < 0$ .

No cenário 6 existe a viabilidade econômica apenas para o transporte do biometano por meio de gasodutos. Nos cenários 7 e 8, há viabilidade econômica para o transporte de resíduos e biometano por dutos existe viabilidade econômica (VPL > 0). Nestes cenários são comercializados a energia elétrica gerada a partir do biometano a valores dos leilões de energia e da tarifa das concessionárias e o biofertilizante, com financiamento dos empreendimentos com recursos próprios ou por meio de empréstimos.

Nos cenários 6, em que a energia elétrica é comercializada aos preços praticados nos leilões de energia nova, o biofertilizante responde por 48,87% da receita obtida. Nos cenários 7 e 8, em que a energia elétrica é comercializada aos valores das tarifas praticadas pelas concessionárias, o biofertilizante responde por 43,07% da receita obtida pelo empreendimento. A comercialização do biofertilizante é determinante para a viabilidade econômica dos empreendimentos de geração de energia elétrica sem codigestão.

A Figura 7.26 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 0,5%.

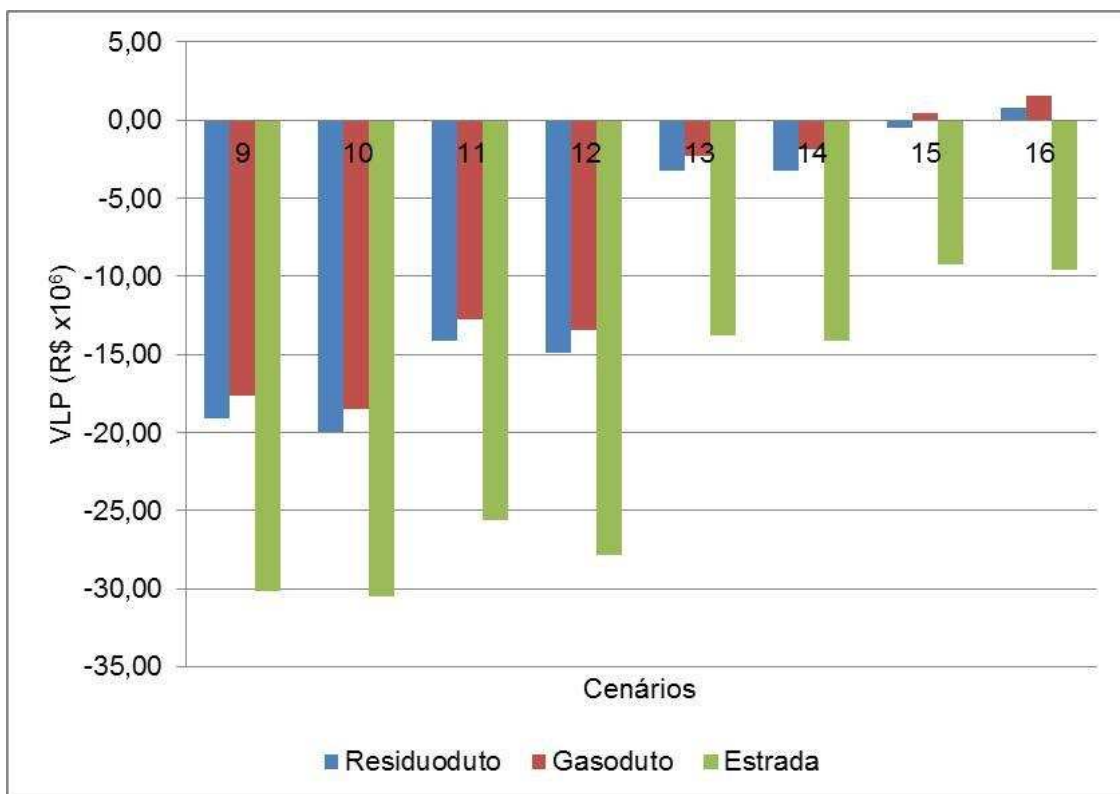


Figura 7.26 – VPL para os cenários de codigestão com 0,5% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 0,5% implica na utilização de uma massa total igual a 433,2 t ano<sup>-1</sup> de resíduos dos cultivos agrícolas de café, feijão, milho e cana-de-açúcar. O cenário 15 apresenta viabilidade econômica apenas para o transporte de biometano por meio de gasoduto. O cenário 16 apresenta viabilidade econômica para o transporte de resíduos e biometano por meio de dutos. Nestes cenários a comercialização da energia elétrica gerada responde por mais da metade da receita obtida pelo empreendimento. Isso se deve à maior contribuição dos resíduos vegetais empregados na codigestão para a produção de biometano do que de biofertilizante. Os demais cenários são inviáveis economicamente.

A Figura 7.27 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 1,0%.

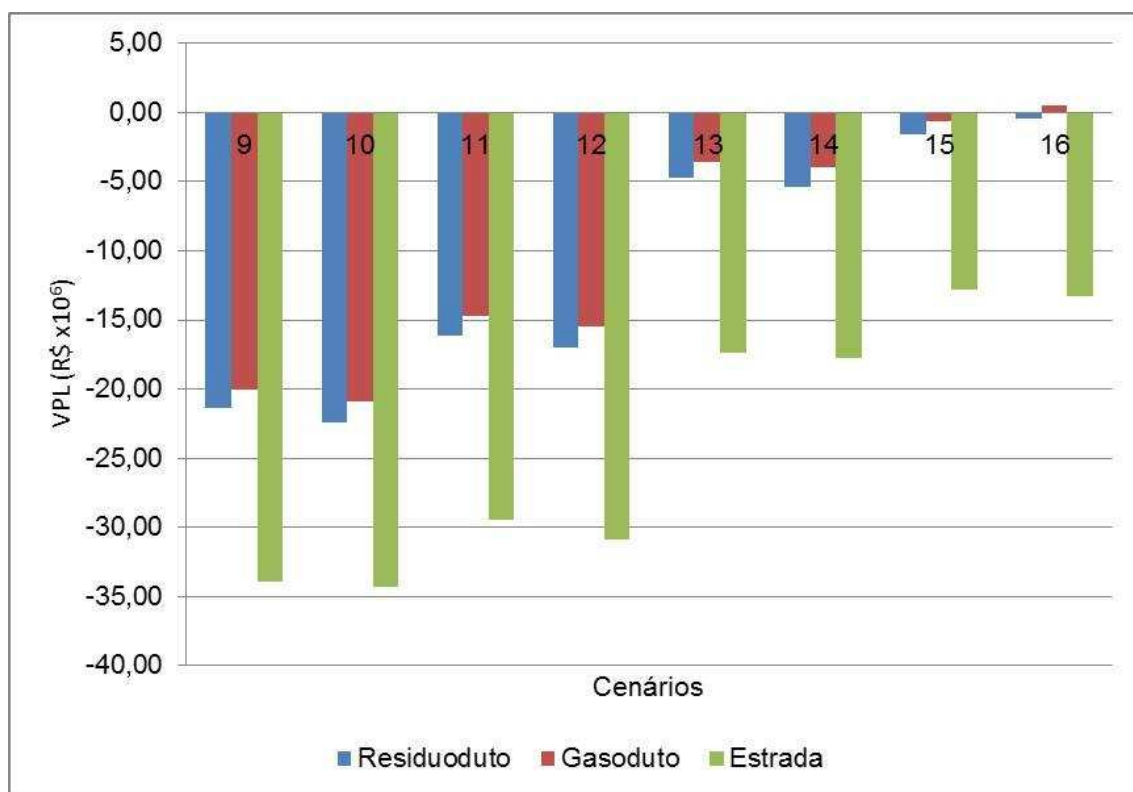


Figura 7.27 – VPL para os cenários de codigestão com 1,0% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 1,0% implica na utilização de uma massa total igual a 866,5 t ano<sup>-1</sup> de resíduos dos cultivos agrícolas de café, feijão, milho e cana-de-açúcar. O cenário 16 é o único que

apresenta viabilidade econômica e somente para o transporte de biometano por meio de gasodutos. Neste cenário a comercialização da energia elétrica gerada responde por mais da metade da receita obtida pelo empreendimento. Isso se deve à maior contribuição dos resíduos vegetais empregados na codigestão para a produção de biometano do que de biofertilizante. Os demais cenários são inviáveis economicamente.

A Figura 7.28 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 1,5%.

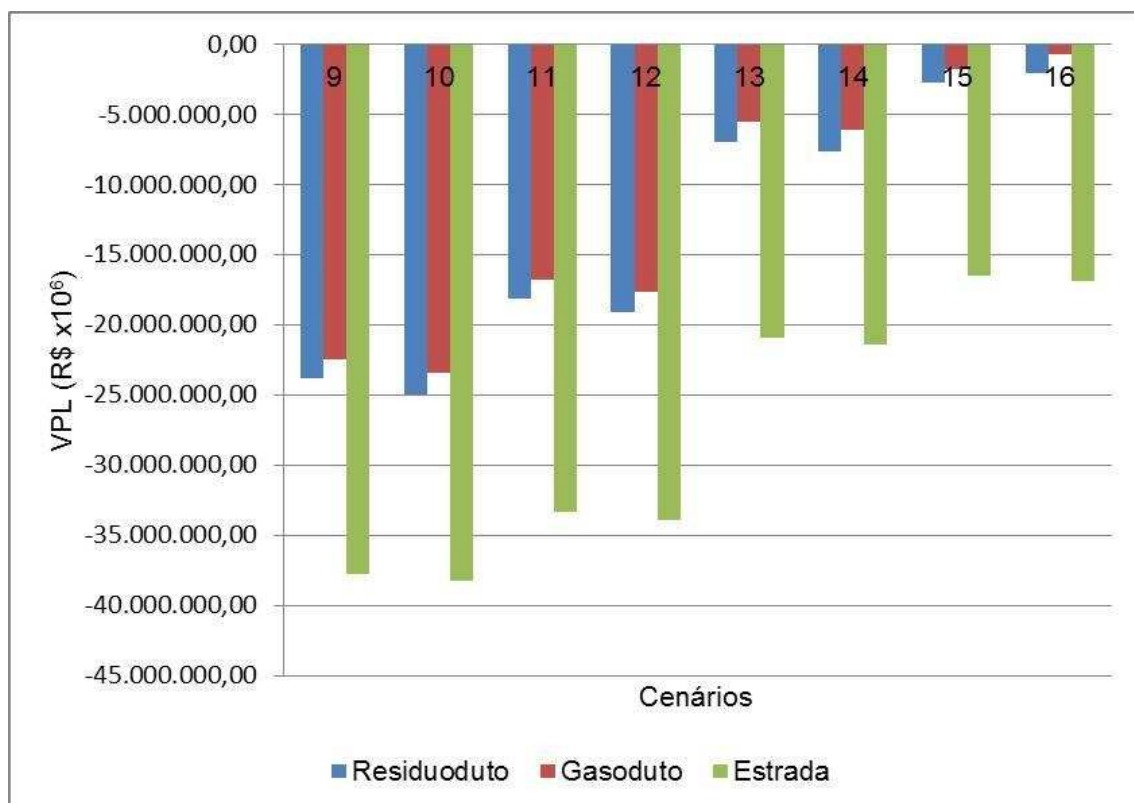


Figura 7.28 – VPL para os cenários de codigestão com 1,5% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 1,5% não apresenta viabilidade econômica em nenhum dos cenários simulados.

A Figura 7.29 apresenta o aumento na produção de biometano com a codigestão considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos suínos para o Condomínio de Agroenergia de Piranga.

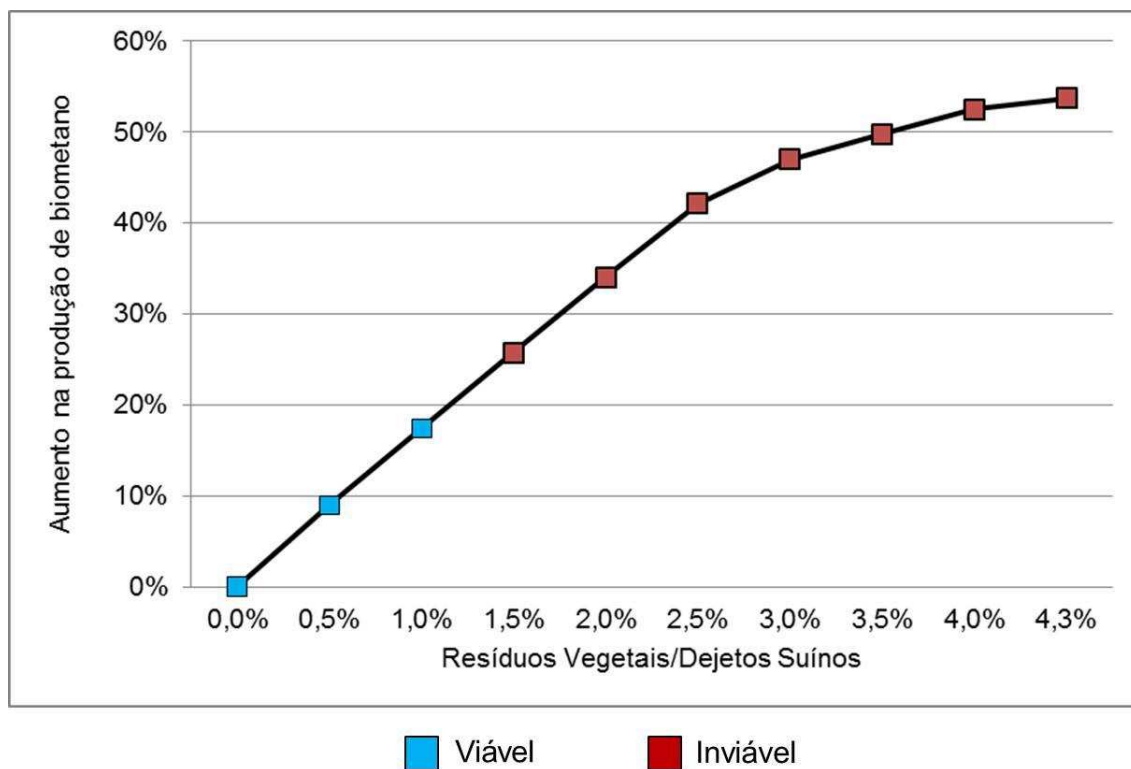


Figura 7.29 – Aumento na produção de biometano com a codigestão.

O aumento percentual da produção de biometano com a codigestão pode chegar a 54%. No entanto a codigestão só é viável para cenários com razões resíduos vegetais/dejetos suínos de 0,5% e 1,0%. Para as demais razões resíduos vegetais/dejetos suínos simuladas, todos os cenários são inviáveis economicamente.

### 7.3.3. CONDOMÍNIO JEQUERI

O município de Jequeri se localiza no norte da região da Zona da Mata de Minas Gerais. Possui uma população de 12.845 habitantes distribuídos em uma área de 547,817 km<sup>2</sup>.

A Figura 7.30 mostra a localização do município de Jequeri na Zona da Mata de Minas Gerais.

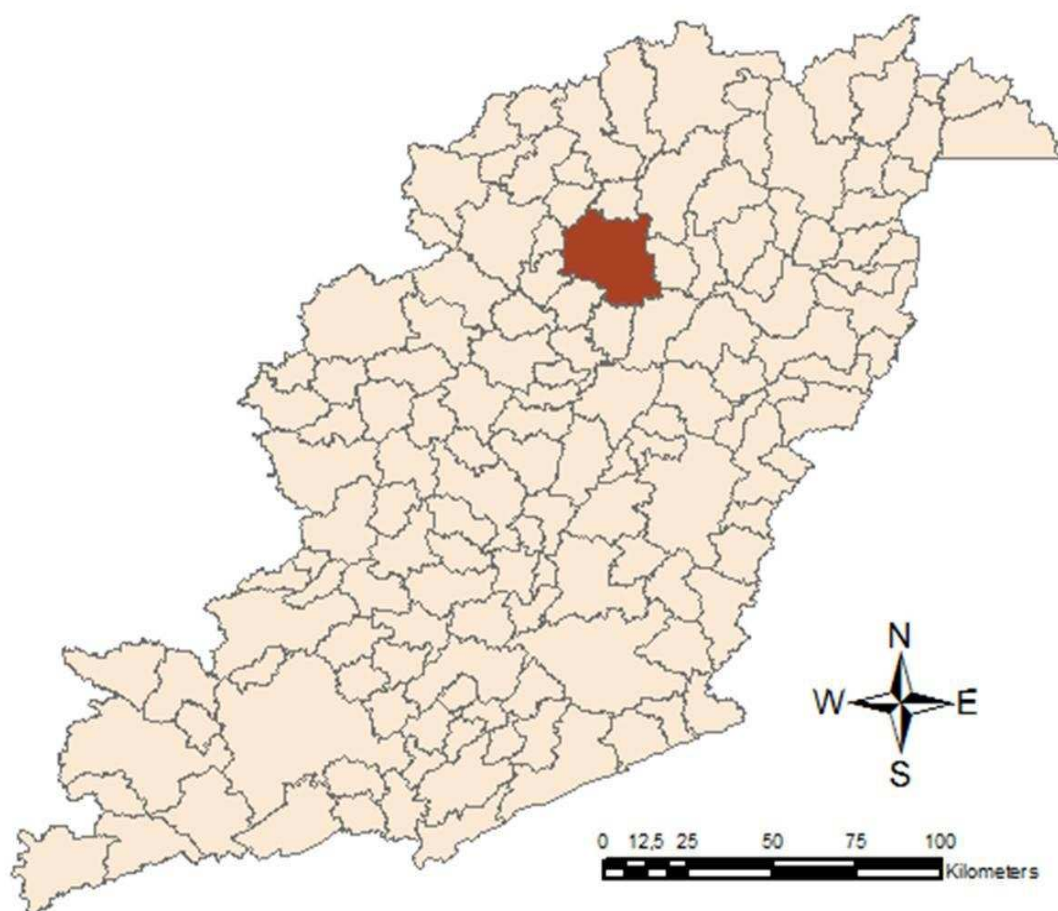


Figura 7.30 – Localização de Jequeri na Zona da Mata de Minas Gerais.

O Quadro 16 apresenta as granjas do município de Jequeri e suas respectivas quantidades de suínos e produção de dejetos.

Quadro 7.16 – Granjas de suínos e suas respectivas quantidades de suínos e produção de dejetos no município de Jequeri

Granja	Quantidade de suínos	Dejetos (t ano <sup>-1</sup> )
J-1	62.456	163.165,52
J-2	18.917	49.420,43
J-3	11.907	31.106,89
J-4	10.959	28.630,25
J-5	7.702	20.121,38
J-6	6.648	17.367,82
J-7	5.622	14.687,40
J-8	4.955	12.944,88
J-9	4.172	10.899,30
J-10	2.864	7.482,16

J-11	2.404	6.280,42
J-12	1.122	2.931,21
J-13	1.033	2.698,70
J-14	800	2.089,99
J-15	772	2.016,84
J-16	556	1.452,54
J-17	262	684,47
<b>Total</b>	<b>143.151</b>	<b>373.980,20</b>

Fonte: (IMA, 2013a).

A carga poluidora dos dejetos de suínos produzidos nas granjas de Jequeri equivale a produzida por uma cidade de aproximadamente 458.083 habitantes (FLEMING e FORD, 2001).

A Figura 7.31 apresenta a localização das granjas no município de Jequeri.

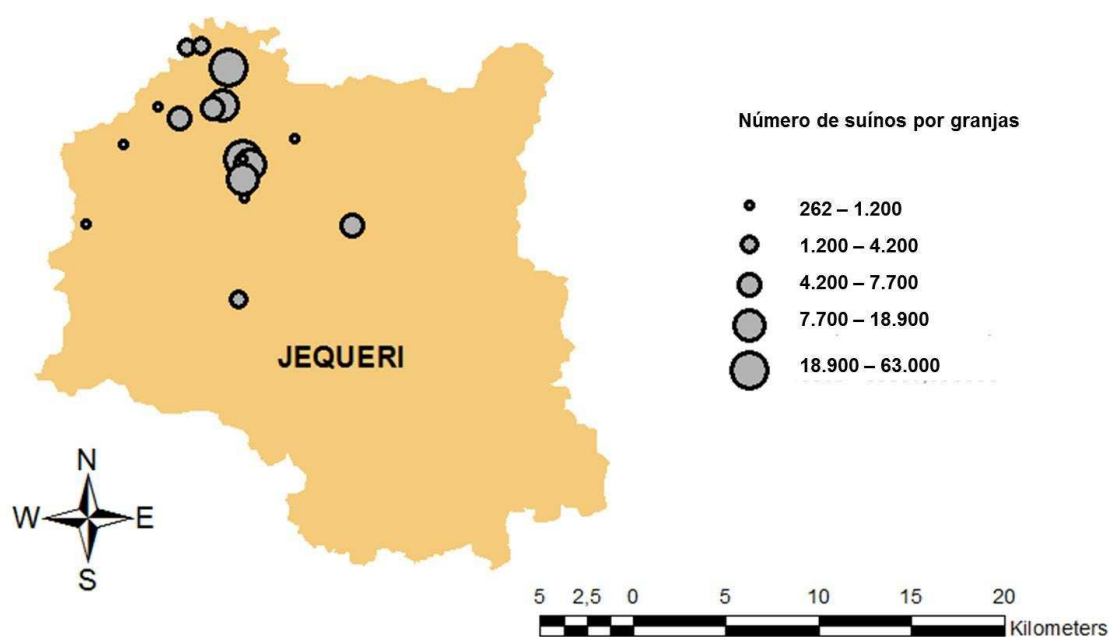


Figura 7.31 – Localização das granjas de suínos no município de Jequeri.

O Quadro 7.17 apresenta a massa de resíduos vegetais disponível no município de Jequeri.

Quadro 7.17 – Resíduos de cultivos vegetais disponíveis no município de Jequeri

Município	café (t ano <sup>-1</sup> )	feijão (t ano <sup>-1</sup> )	milho (t ano <sup>-1</sup> )	bagaço de cana (t ano <sup>-1</sup> )	palha de cana (t ano <sup>-1</sup> )
Jequeri	2.430,0	220,2	426,0	2.880,0	4.200,0

A Figura 7.32 apresenta a produção de biometano por substrato, considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos suínos para o Condomínio de Agroenergia de Jequeri.

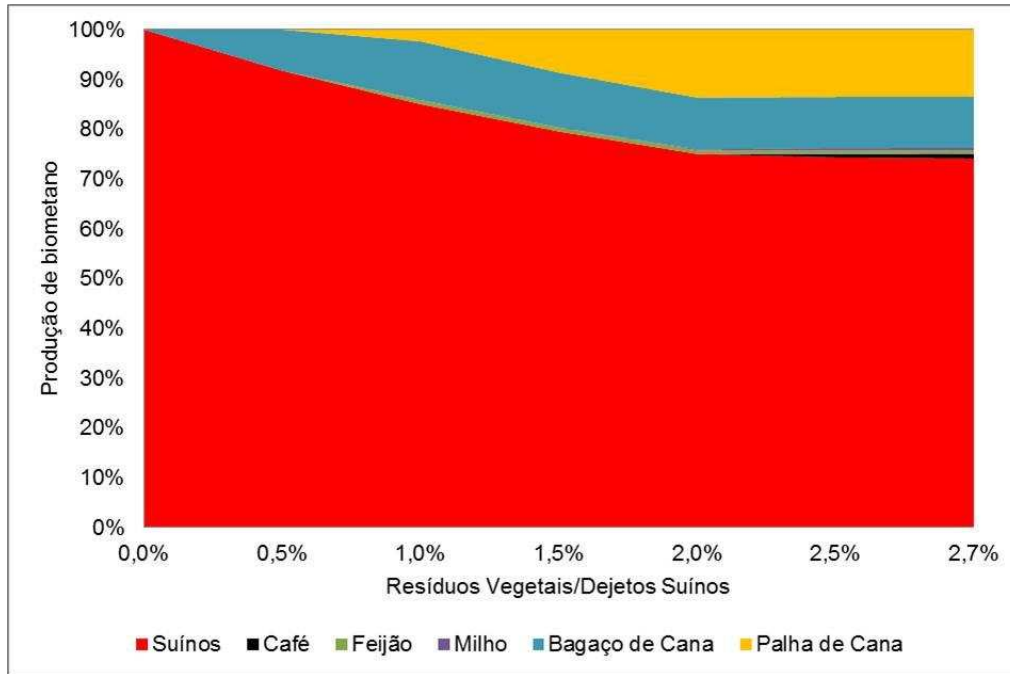


Figura 7.32 – Produção de biometano por substrato.

Os dejetos de suínos respondem pela maior parcela do biometano produzido. Dada a disponibilidade de resíduos vegetais, a contribuição máxima dos mesmos é de 25,90% da produção de biometano.

A Figura 7.33 apresenta a produção de biometano e a respectiva potência elétrica gerada.

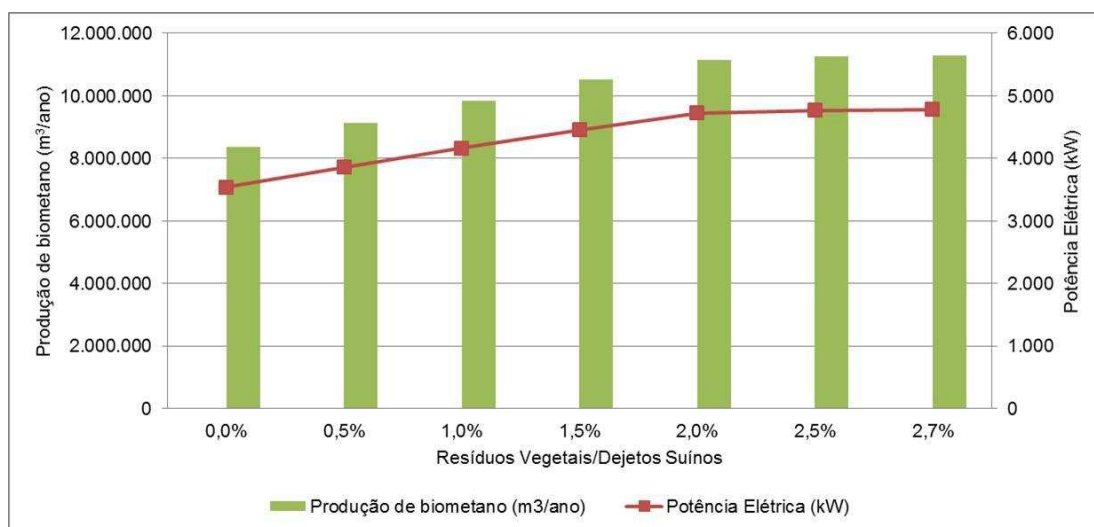


Figura 7.33 – Produção de biometano e potência elétrica.

A produção de biometano a partir dos resíduos agropecuários disponíveis chega a 11.290.756 m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> e a potência elétrica disponível é de 4,78 MW.

A Figura 7.34 apresenta a energia elétrica produzida considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos suínos para o Condomínio de Agroenergia de Jequeri.

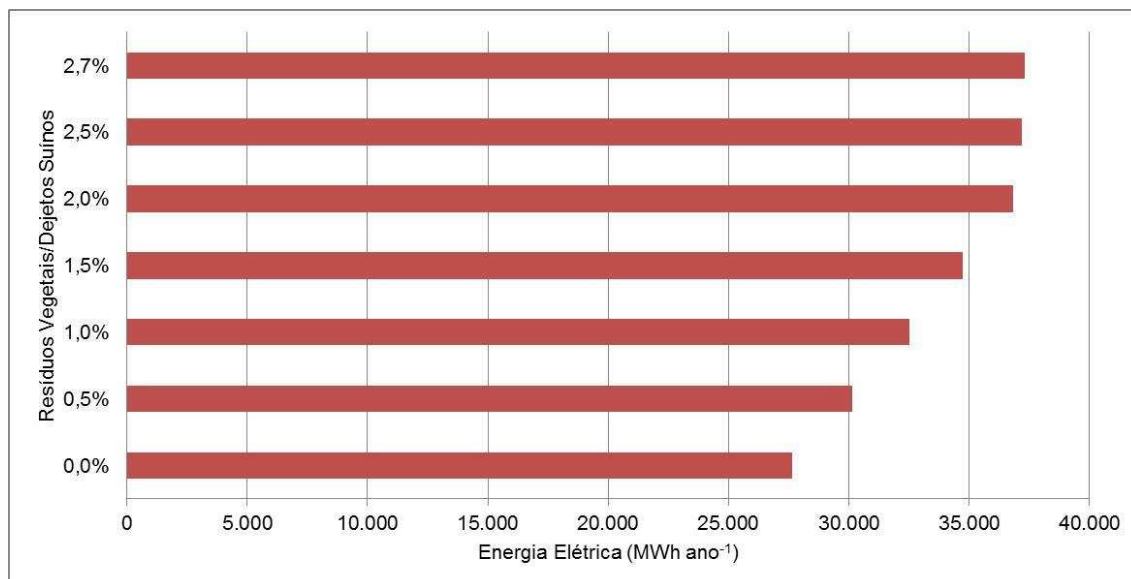


Figura 7.34 – Energia elétrica produzida.

O consumo total de energia elétrica no município de Jequeri no ano de 2012 foi de 3.924,14 MWh (CEMIG, 2013). A eletricidade gerada com o biometano obtido dos dejetos de suínos e resíduos vegetais possibilitaria atender a demanda ocorrendo um excedente de 33.374,02 MWh.

## PRODUÇÃO DE BIOFERTILIZANTE

A Figura 7.35 apresenta a massa de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) contida no digestato dos resíduos agropecuários no Condomínio de Agroenergia de Jequeri.

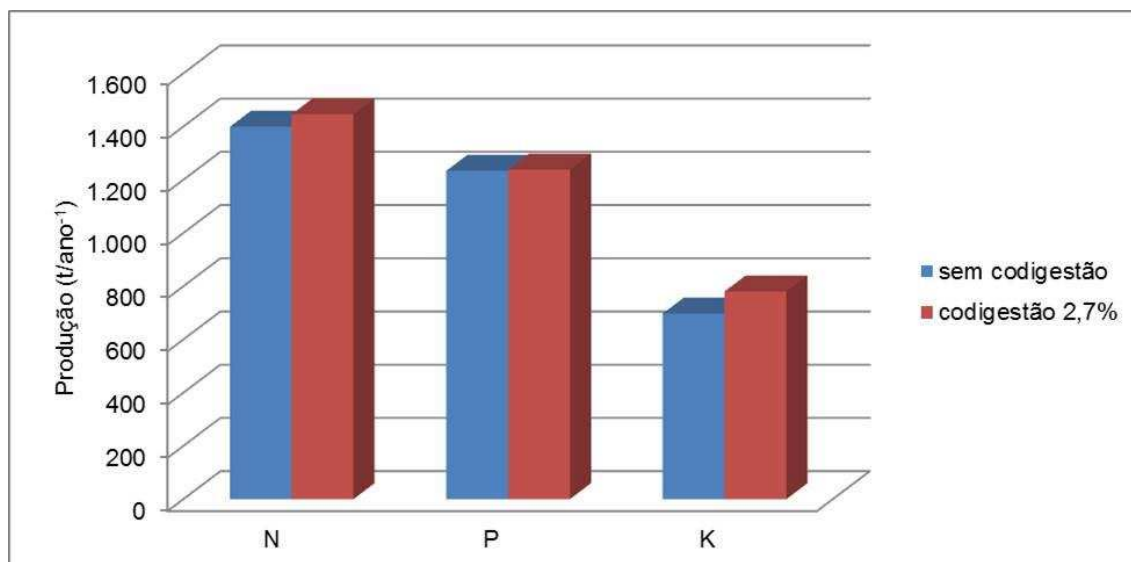


Figura 7.35 – Produção de biofertilizante no Condomínio de Agroenergia de Jequeri.

O aumento na produção de Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) com a codigestão dos dejetos de suínos e resíduos vegetais é de 3,37%, 0,37% e 11,94%, respectivamente.

O Quadro 7.18 apresenta a intensidade de uso de fertilizantes das culturas do café, feijão, milho e cana-de-açúcar no município de Jequeri.

Quadro 7.18 – Intensidade de uso fertilizantes por culturas no município de Jequeri

Cultura	Consumo (t.ha <sup>-1</sup> )	Área Plantada (ha)	Massa utilizada (t)
Café	0,54	3.000	1.620,00
Feijão	0,15	200	30,00
Milho	0,31	1.000	310,00
Cana-de-açúcar	0,46	1.000	460,00

Fonte: (DONZELLI, 2005)

É necessário que se realize a análise de solo a definição da quantidade de nutriente a ser aplicada no solo do município.

## MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

A Figura 7.36 apresenta o potencial de toneladas de dióxido de carbono que podem ser mitigadas com a geração de energia elétrica a partir da codigestão dos resíduos agropecuários no Condomínio de Agroenergia de Jequeri.

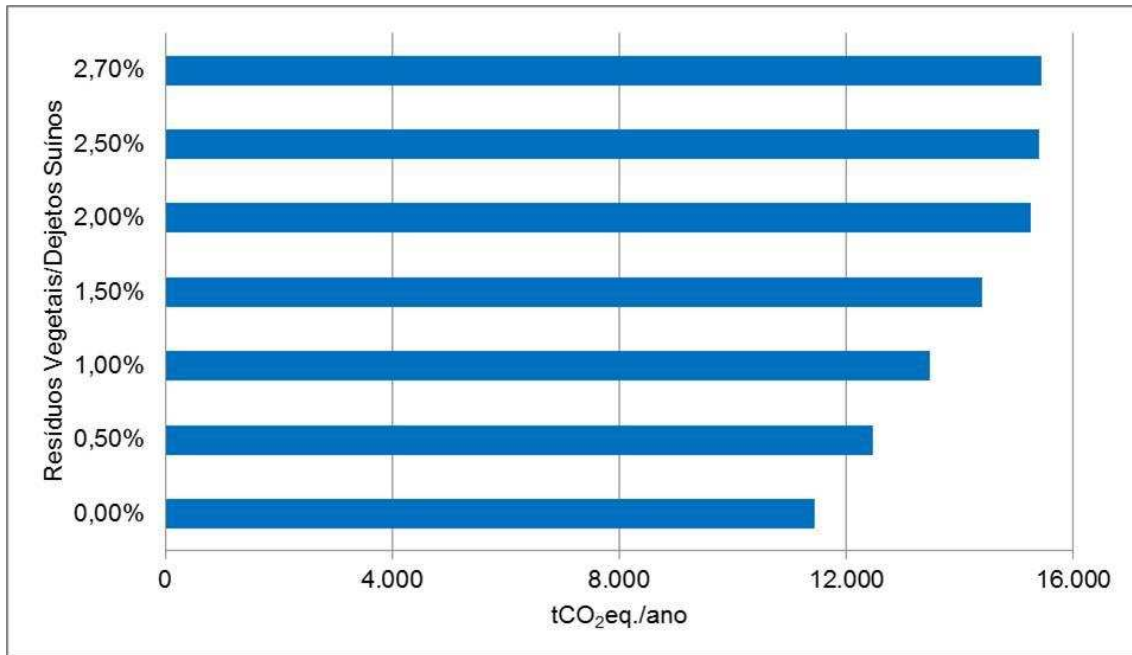


Figura 7.36 – Potencial de mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>.

Considerando-se que a intensidade de emissão média de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>eq.) da carne suína é de 6,1 kg de CO<sub>2</sub>eq./Kg de carcaça, sendo a produção de ração para os animais e a gestão dos dejetos respondendo pela maior parte das emissões (MACLEOD, *et al.*, 2013). O peso médio da carcaça suína produzida em Minas Gerais no ano de 2012 foi de 88,1 kg (MINAS GERAIS, 2015a). Tem-se que a emissão de CO<sub>2</sub>eq. para a produção de suínos no condomínio de Jequeri é de 153.861,6 tCO<sub>2</sub>eq./ano. A geração de eletricidade a partir dos resíduos agropecuários é capaz de compensar 10,04% do total de emissões. É importante observar que essa mitigação diz respeito apenas ao aproveitamento energético dos resíduos. A cadeia produtiva da suinocultura é formada por outros elos emissores de dióxido de carbono.

## TRANSPORTE DE BIOMETANO E DE RESÍDUOS

### GASODUTO/RESIDUODUTO

O comprimento total do duto para conectar as 17 granjas de suínos do Condomínio Jequeri é de 43.484 metros. O Quadro 7.19 apresenta o comprimento

de cada um dos dutos dimensionados para o Condomínio de Agroenergia de Jequeri.

Quadro 7.19 – Comprimento dos dutos dimensionados para o Condomínio de Agroenergia de Jequeri

Duto	Comprimento (m)
1	2.086
2	835
3	515
4	1.985
5	2.250
6	4.936
7	3.214
8	5.669
9	1.258
10	979
11	470
12	6.596
13	6.869
14	3.287
15	2.536
Total	43.484

A Figura 7.37 apresenta a rotas traçada pelos dutos no território do município de Jequeri.

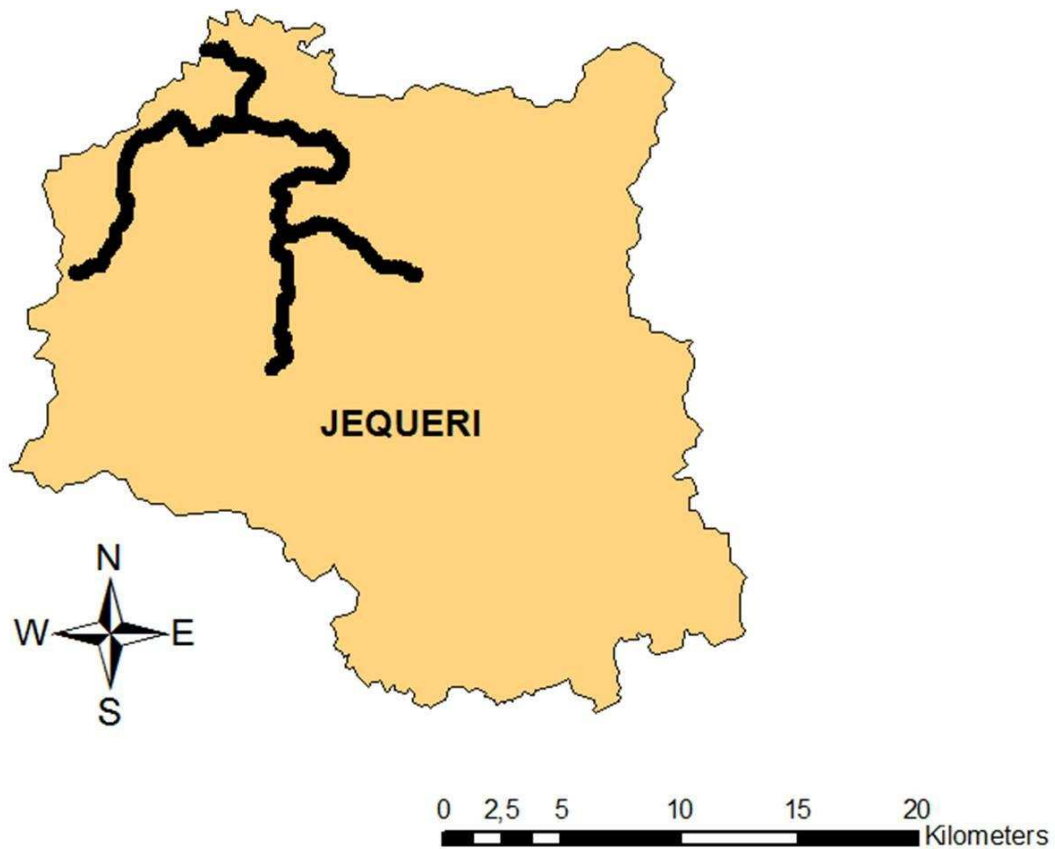


Figura 7.37 – Traçado dos dutos no município de Jequeri.

### Estradas

O comprimento das rotas de transporte dos resíduos suínos por estradas (desde as granjas até a central de geração de energia) no município de Jequeri são mostrados no Quadro 7.20.

Quadro 7.20 – Comprimento das rotas de transporte dos resíduos de suínos por estradas

Rota	Distância (km)
1	6,5
2	7,3
3	4
4	8,5
5	6,6
6	4,3
7	25,1

8	20,6
9	6,8
10	3,8
11	10,9
12	8,8
13	20,5
14	12
15	22
16	6,9
<hr/>	
Total	174,6

## ANÁLISE ECONÔMICA

A Figura 7.38 apresenta os custos de produção de energia elétrica considerando: (i) transporte do biometano por gasoduto; (ii) o transporte dos resíduos por residuoduto; e (iii) o transporte dos resíduos por estradas comparados com o valor pago nos leilões de eletricidade da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e os preços de comercialização da energia praticados pelas concessionárias da região.

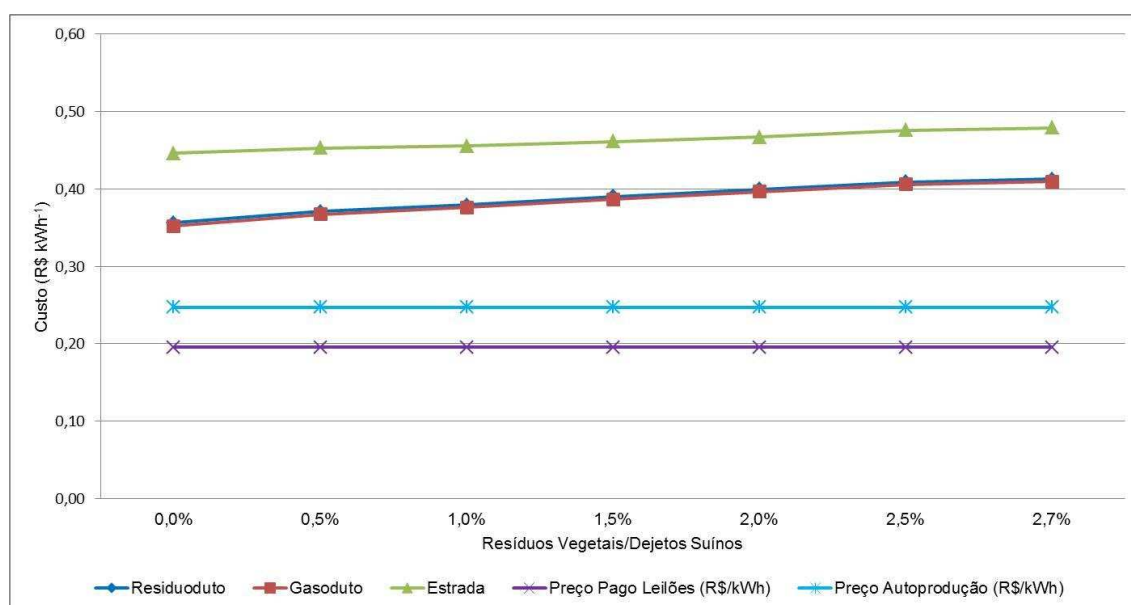


Figura 7.38 – Custo de produção de energia elétrica para diferentes modais de transporte no Condomínio de Agroenergia de Jequeri.

O custo da produção de energia elétrica com a codigestão aumenta de acordo com a adição de resíduos vegetais no substrato. O preço pago pela energia gerada a partir do biometano de resíduos agropecuários nos leilões e os praticados pelas concessionárias na região são menores que os custos de produção dos três modais de transporte (residuoduto, gasoduto e estrada). O custo de produção com o transporte dos dejetos de suínos por estradas é maior que no transporte por duto. Os custos do transporte dos resíduos por dutos é ligeiramente maior que os custos do transporte do biometano por dutos.

### VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)

A Figura 7.39 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 1 a 8 em que ocorre o aproveitamento apenas de dejetos de suínos (sem codigestão).

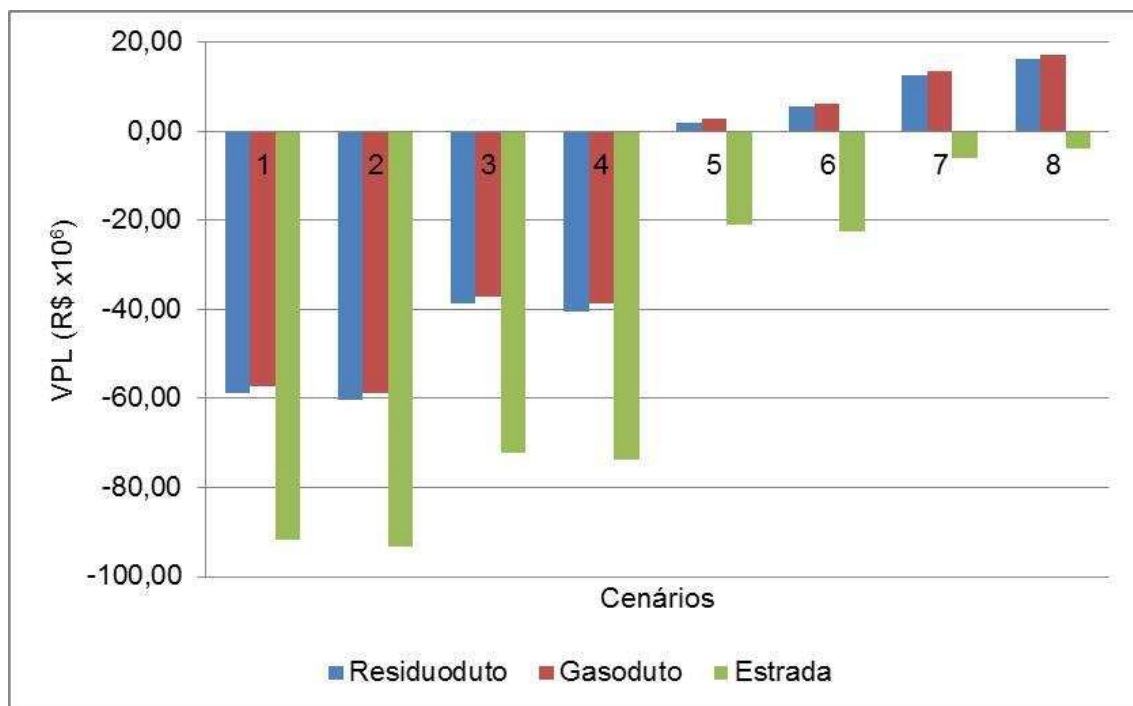


Figura 7.39 – VPL para os cenários sem codigestão.

Para os cenários 1, 2, 3, 4 em que se comercializa apenas a energia elétrica gerada a partir do biometano a valores dos leilões de energia e da tarifa das concessionárias, com financiamento dos empreendimentos com recursos próprios e por meio de empréstimos não há viabilidade econômica, ou seja,  $VPL < 0$ .

Nos cenários 5, 6, 7 e 8 existe a viabilidade econômica apenas para o transporte dos dejetos de suínos por meio de dutos e para o transporte de biometano por meio de gasodutos. Nestes cenários são comercializados a energia elétrica gerada a partir do biometano a valores dos leilões de energia e da tarifa das concessionárias e o biofertilizante, com financiamento dos empreendimentos com recursos próprios ou por meio de empréstimos.

Nos cenários 5 e 6 em que a energia elétrica é comercializada aos preços praticados nos leilões de energia nova, o biofertilizante responde por 48,87% da receita obtida. Nos cenários 7 e 8, em que a energia elétrica é comercializada aos valores das tarifas praticadas pelas concessionárias, o biofertilizante responde por 43,07% da receita obtida pelo empreendimento. A comercialização do biofertilizante é determinante para a viabilidade econômica dos empreendimentos de geração de energia elétrica sem codigestão.

A Figura 7.40 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 0,5%.

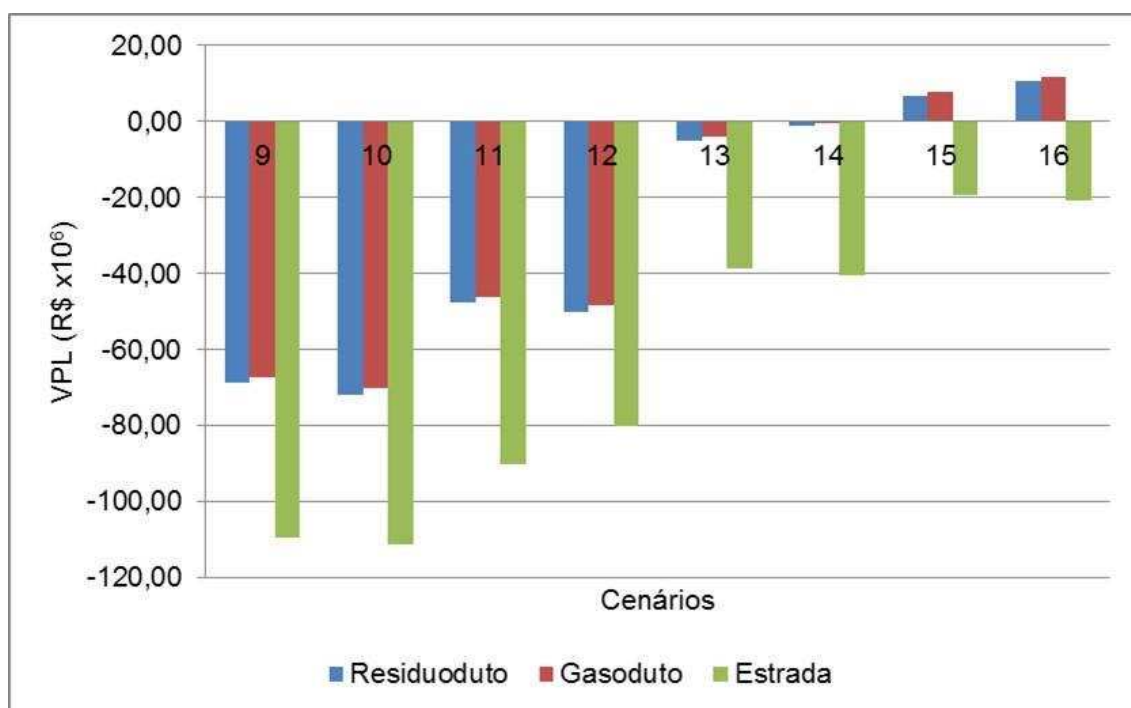


Figura 7.40 – VPL para os cenários de codigestão com 0,5% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 0,5% implica na utilização de uma massa total igual a 1.869,9 t ano<sup>-1</sup> de resíduos dos

cultivos agrícolas de café, feijão, milho e cana-de-açúcar. Os cenários 15 e 16 apresentam viabilidade econômica para o transporte de resíduos por meio de duto e de biometano por meio de gasoduto. Nestes cenários a comercialização da energia elétrica gerada responde por mais da metade da receita obtida pelo empreendimento. Isso se deve à maior contribuição dos resíduos vegetais empregados na codigestão para a produção de biometano do que de biofertilizante. Os demais cenários são inviáveis economicamente.

A Figura 7.41 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 1,0%.

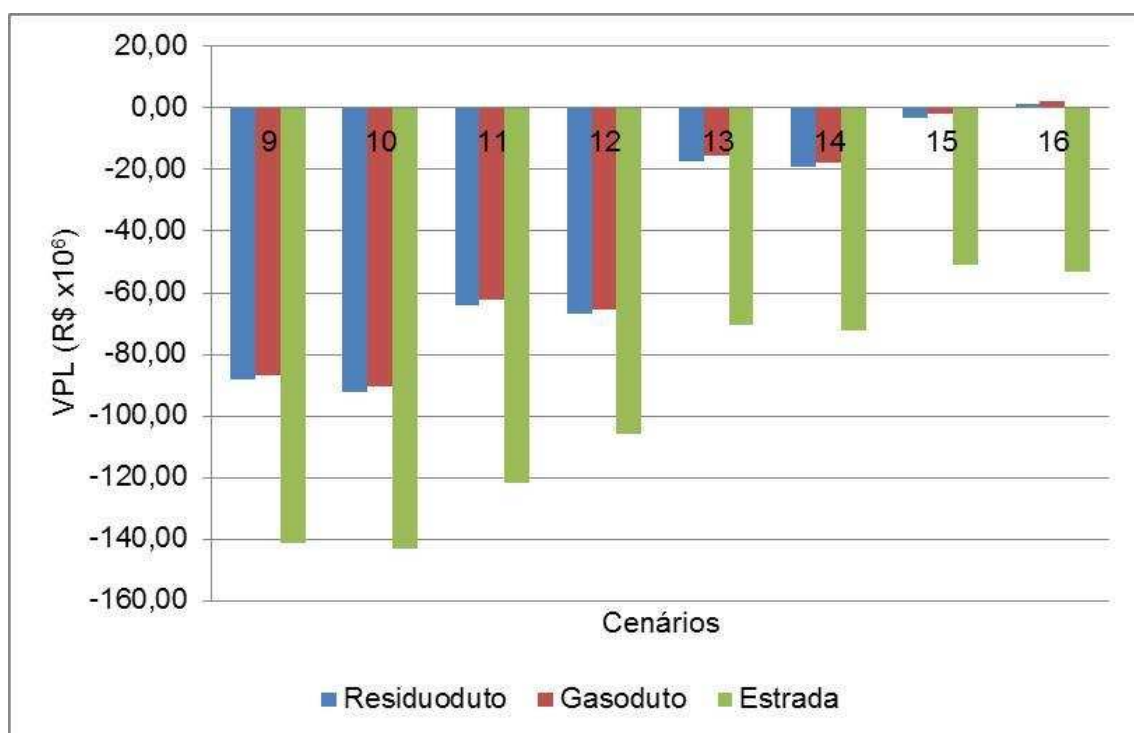


Figura 7.41 – VPL para os cenários de codigestão com 1,0% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 1,0% implica na utilização de uma massa total igual a 3.379,8 t ano<sup>-1</sup> de resíduos dos cultivos agrícolas de café, feijão, milho e cana-de-açúcar. Os cenários 15 e 16 apresentam viabilidade econômica para o transporte de resíduos por meio de duto e de biometano por meio de gasoduto. Nestes cenários a comercialização da energia elétrica gerada responde por mais da metade da receita obtida pelo empreendimento. Isso se deve à maior contribuição dos resíduos vegetais

empregados na codigestão para a produção de biometano do que de biofertilizante. Os demais cenários são inviáveis economicamente.

A Figura 7.42 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 1,5%.

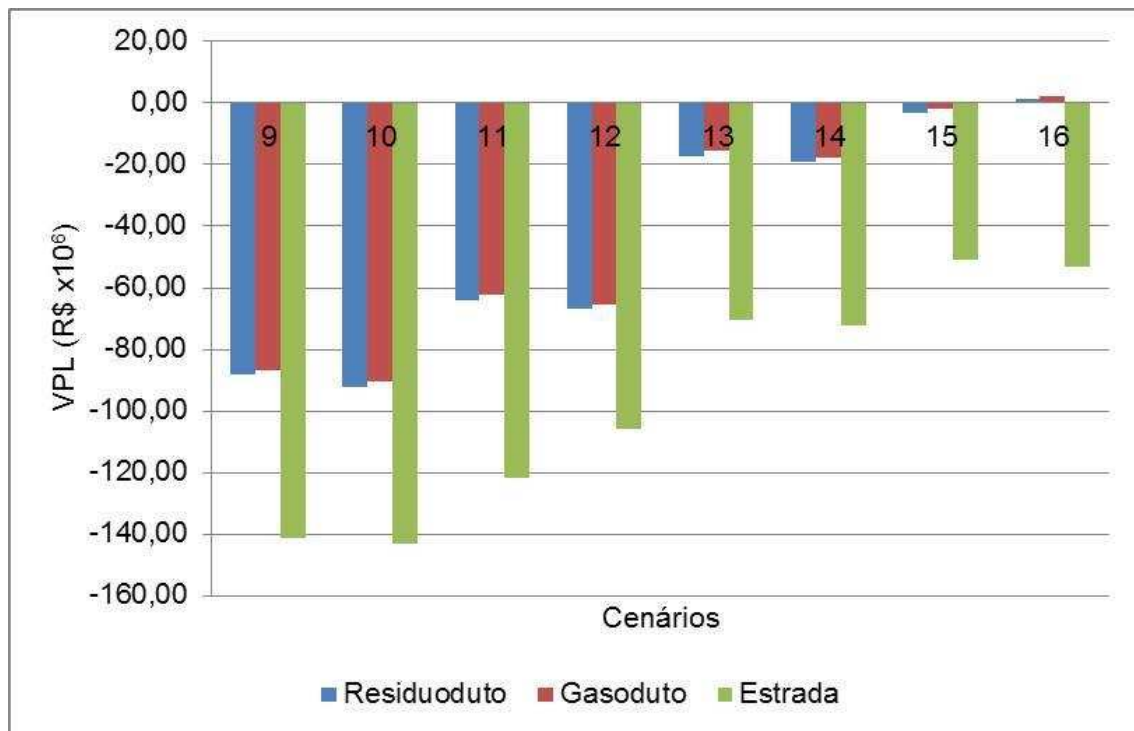


Figura 7.42 – VPL para os cenários de codigestão com 1,5% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 1,5% implica na utilização de uma massa total igual a 5.609,7 t ano<sup>-1</sup> de resíduos dos cultivos agrícolas de café, feijão, milho e cana-de-açúcar. O cenário 16 é o único que apresenta viabilidade econômica para o transporte de resíduos por meio de duto e de biometano por meio de gasoduto. Neste cenário a comercialização da energia elétrica gerada responde por mais da metade da receita obtida pelo empreendimento. Isso se deve à maior contribuição dos resíduos vegetais empregados na codigestão para a produção de biometano do que de biofertilizante. Os demais cenários são inviáveis economicamente.

A Figura 7.43 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 2,0%.

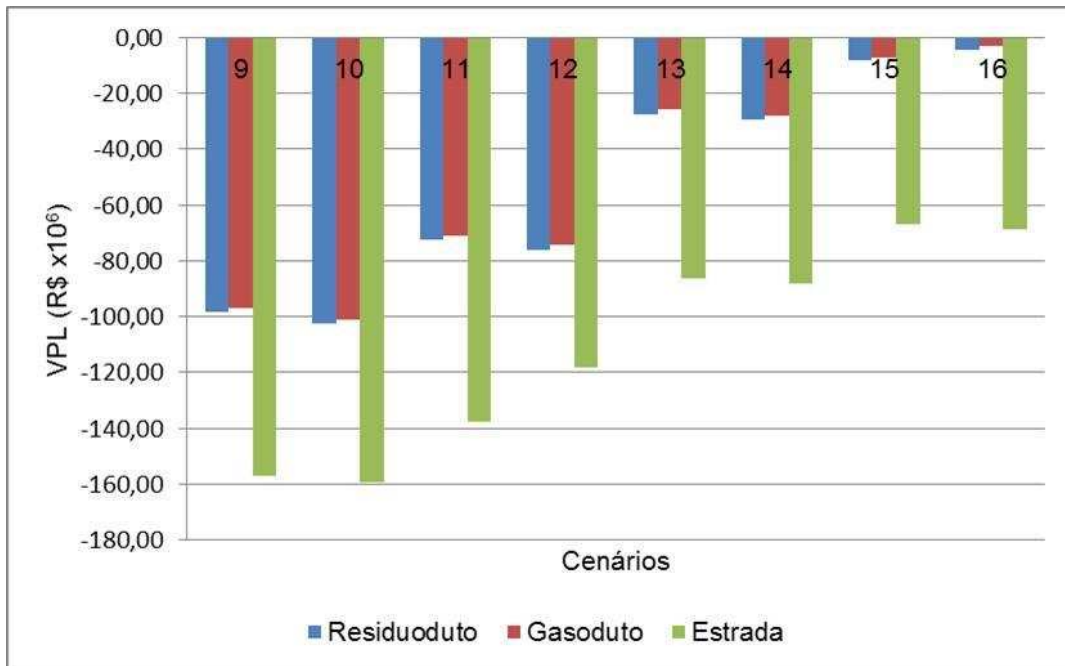


Figura 7.43 – VPL para os cenários de codigestão com 2,0% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 2,0% não apresenta viabilidade econômica em nenhum dos cenários simulados.

A Figura 7.44 apresenta o aumento na produção de biometano com a codigestão considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos suínos para o Condomínio de Agroenergia de Jequeri.

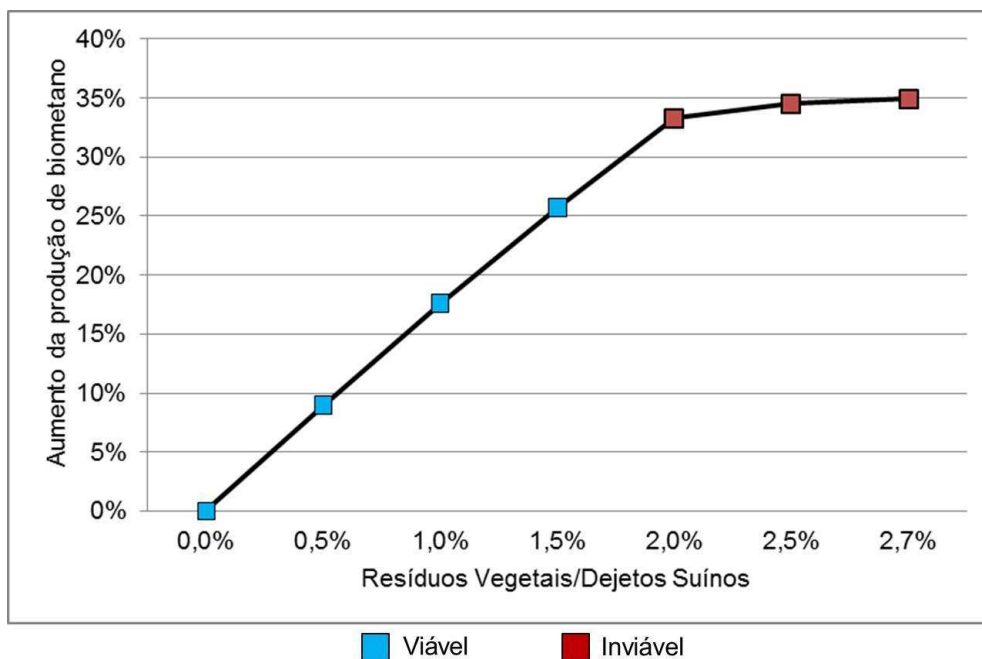


Figura 7.44 – Aumento na produção de biometano com a codigestão.

O aumento percentual da produção de biometano com a codigestão no condomínio de agroenergia Jequeri pode chegar a 34,95%. No entanto a codigestão só é viável para cenários com razões resíduos vegetais/dejetos suínos de 0,5%, 1,0% e 1,5%. Para as demais razões resíduos vegetais/dejetos suínos simuladas, todos os cenários são inviáveis economicamente.

#### 7.3.4. CONDOMÍNIO LEOPOLDINA

O município de Leopoldina se localiza no sudeste da região da Zona da Mata de Minas Gerais. Possui uma população de 51.136 habitantes distribuídos em uma área de 943,076 km<sup>2</sup>.

A Figura 7.45 mostra a localização do município de Leopoldina na Zona da Mata de Minas Gerais.

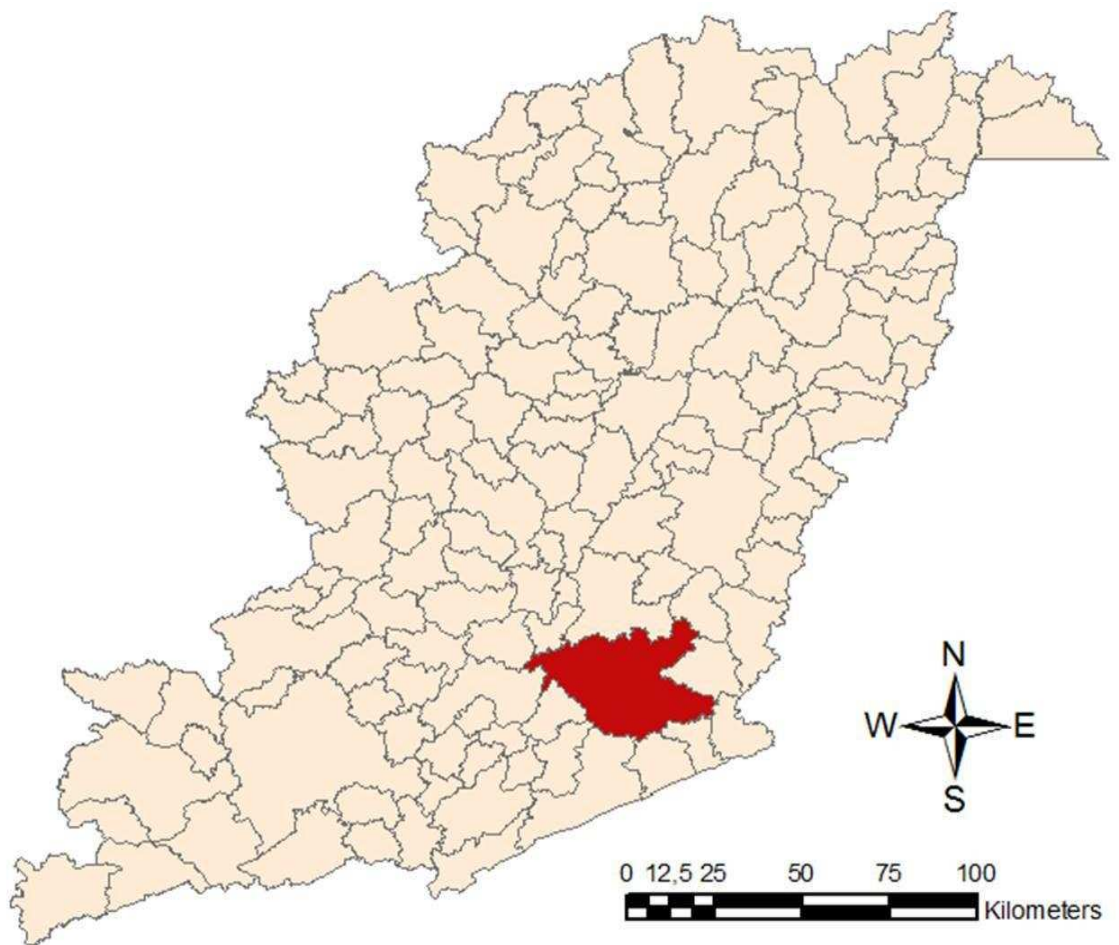


Figura 7.45 – Localização de Leopoldina na Zona da Mata de Minas Gerais.

O Quadro 7.21 apresenta as granjas do município de Leopoldina e suas respectivas quantidades de frangos e produção de dejetos.

Quadro 7.21 – Granjas e suas respectivas quantidades de frangos e produção de dejetos no município de Leopoldina

Granja	Quantidade de frangos	Dejetos (t ano <sup>-1</sup> )
L-1	45.000	559,98
L-2	30.000	373,32
L-3	30.000	373,32
L-4	15.000	186,66
Total	120.000	1.493,28

Fonte: (IMA, 2013b).

O total de resíduos produzidos anualmente pelas granjas localizadas no município de Leopoldina corresponde aos resíduos produzidos por 38 pessoas (FLEMING e FORD, 2001).

A Figura 7.46 apresenta a localização das granjas no município de Leopoldina.

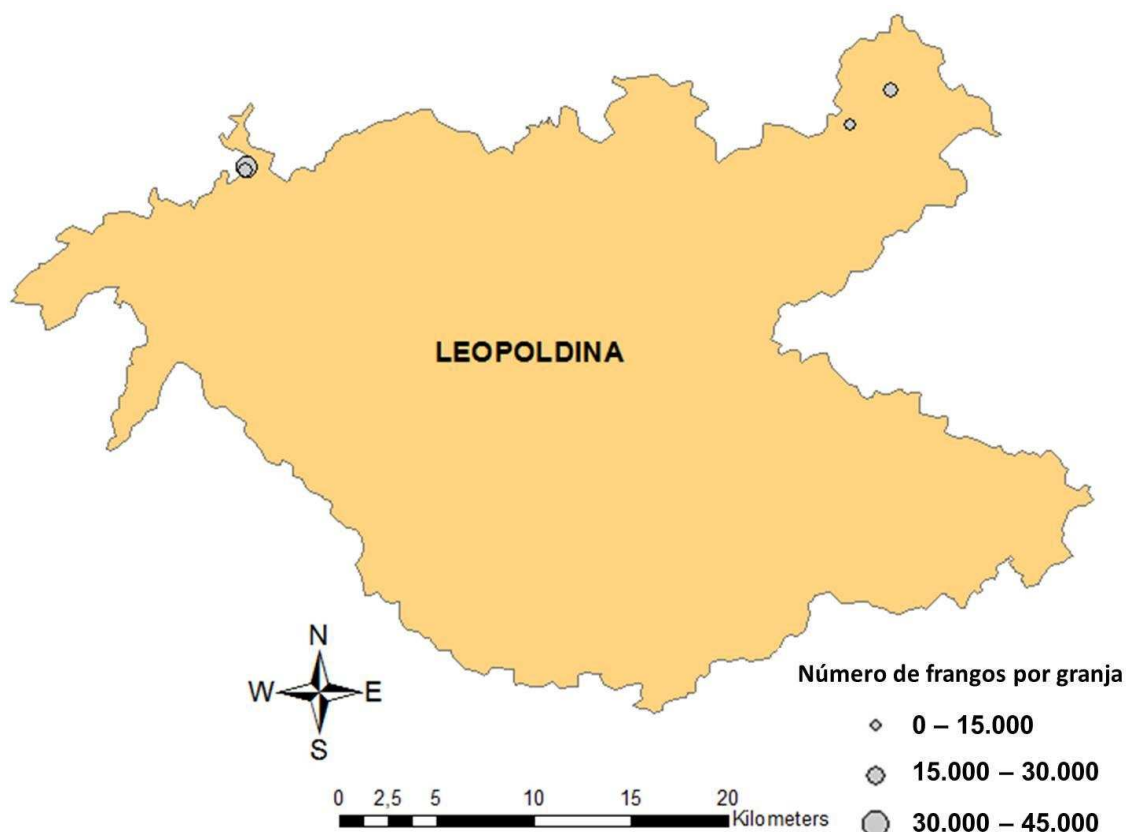


Figura 7.46 – Localização das granjas de suínos no município de Leopoldina.

O Quadro 7.22 apresenta a massa de resíduos vegetais disponível no município de Leopoldina.

Quadro 7.22 – Resíduos de cultivos vegetais disponíveis no município de Leopoldina

Município	café (t ano <sup>-1</sup> )	feijão (t ano <sup>-1</sup> )	milho (t ano <sup>-1</sup> )	bagaço de cana (t ano <sup>-1</sup> )	palha de cana (t ano <sup>-1</sup> )
Leopoldina	16,2	187,2	468,6	1.536,0	2.240,0

A Figura 7.47 apresenta a produção de biometano por substrato, considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos de frangos para o Condomínio de Agroenergia de Leopoldina.

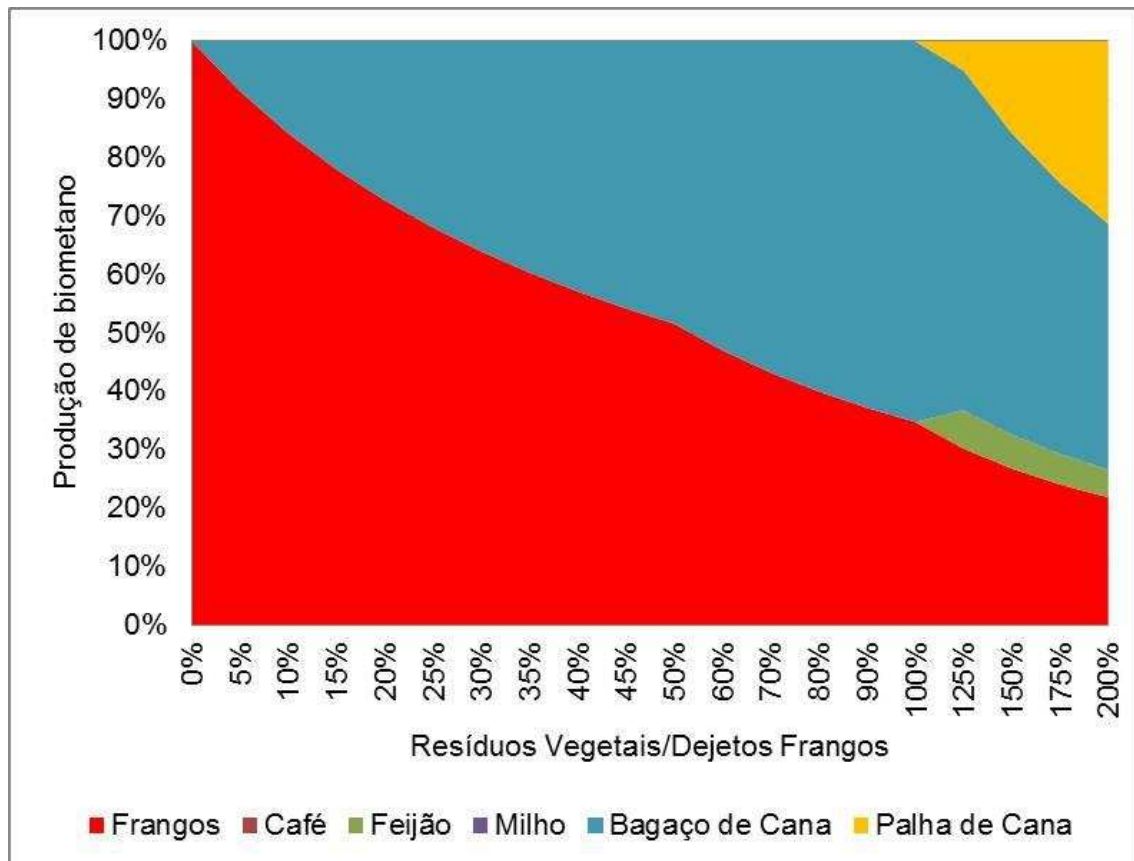


Figura 7.47 – Produção de biometano por substrato.

A massa de dejetos de frangos disponível no condomínio de Leopoldina corresponde a 33,63% da massa de resíduos vegetais. Isso torna possível simular a codigestão com altas razões resíduos vegetais/dejetos frangos. Neste trabalho a máxima razão resíduos vegetais/dejetos frangos foi de 200%. Dada a disponibilidade

de resíduos vegetais, a contribuição máxima dos mesmos é de 78,11% da produção de biometano.

A Figura 7.48 apresenta a produção de biometano e a respectiva potência elétrica gerada.

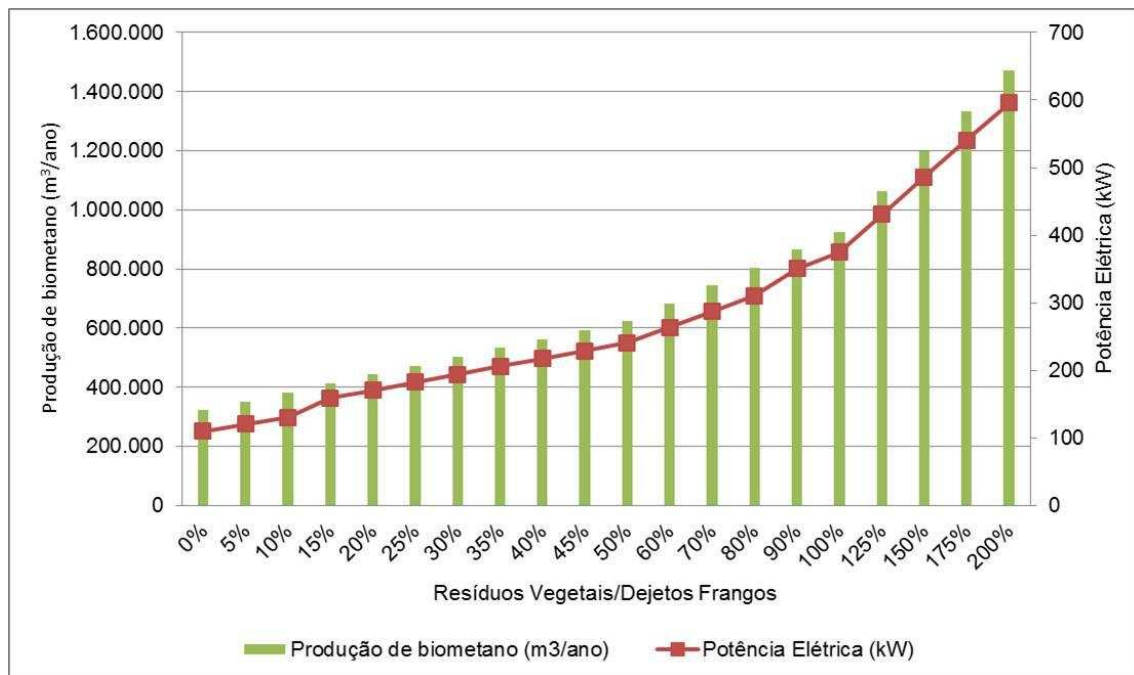


Figura 7.48 – Produção de biometano e potência elétrica.

A produção de biometano a partir dos resíduos agropecuários disponíveis chega a 1.470.109 m³/ano e a potência elétrica disponível é de 596 kW.

A Figura 7.49 apresenta a energia elétrica produzida considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos de frangos para o Condomínio de Agroenergia de Leopoldina.

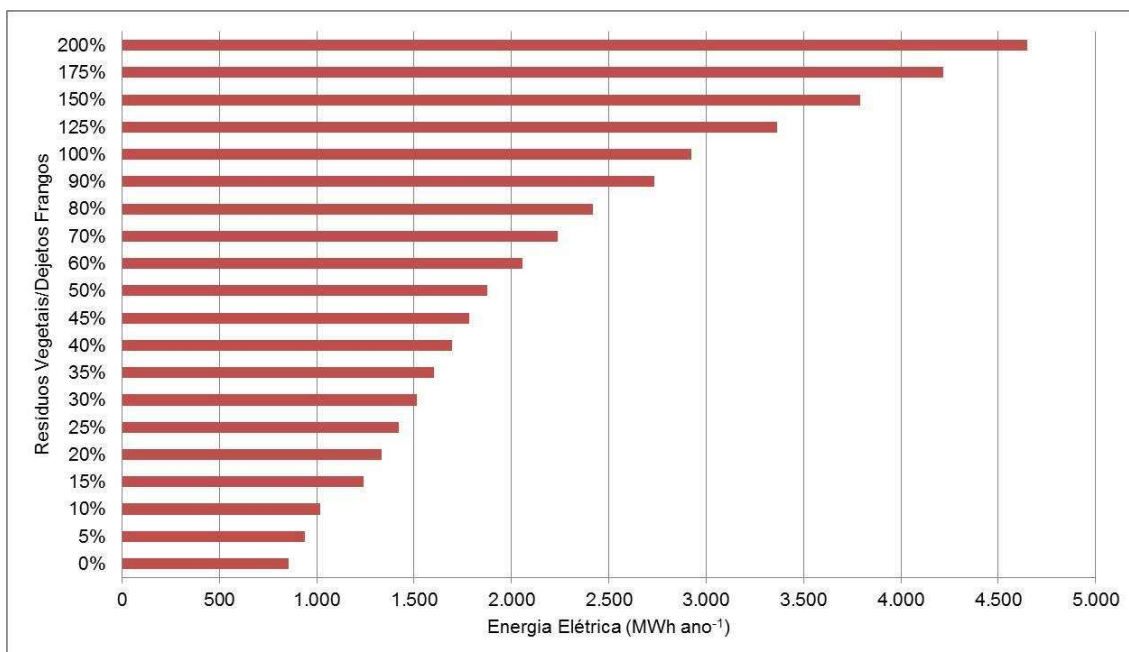


Figura 7.49 – Energia elétrica produzida.

O consumo total de energia elétrica no município de Leopoldina no ano de 2012 foi de 67.596,58 MWh (CEMIG, 2013). A eletricidade gerada com o biometano obtido de dejetos de frangos e resíduos vegetais possibilitaria atender a 6,87% da demanda de energia elétrica do município.

### PRODUÇÃO DE BIOFERTILIZANTE

A Figura 7.50 apresenta a massa de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) contida no digestato dos resíduos agropecuários no Condomínio de Agroenergia de Leopoldina.

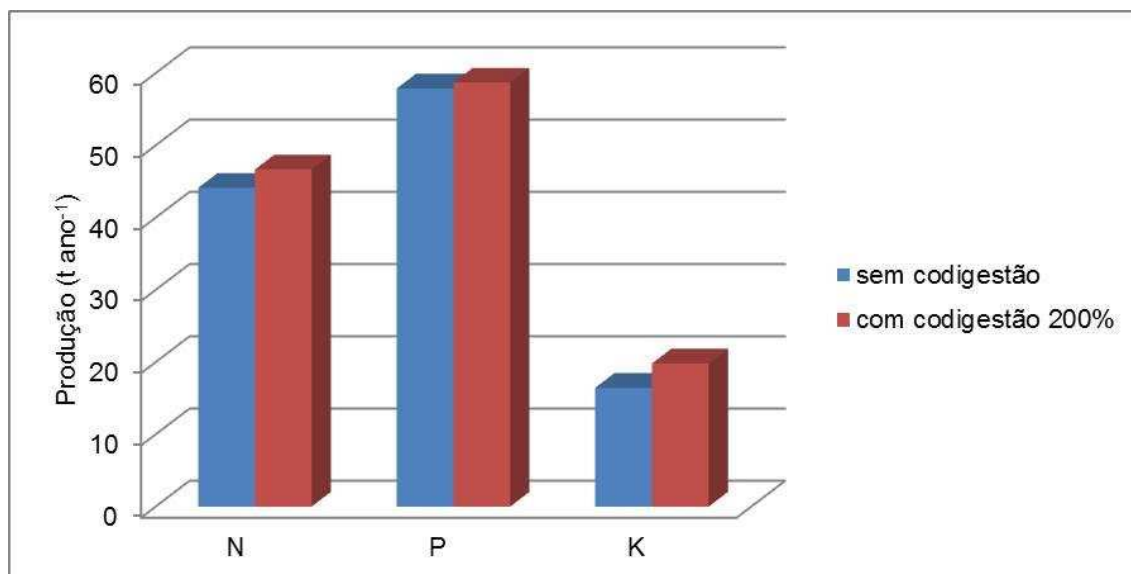


Figura 7.50 – Produção de biofertilizando no Condomínio de Agroenergia de Leopoldina.

O aumento na produção de Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) com a codigestão dos dejetos de suínos e resíduos vegetais é de 5,77%, 1,39% e 20,24%, respectivamente.

O Quadro 7.23 apresenta a intensidade de uso de fertilizantes das culturas do café, feijão, milho e cana-de-açúcar no município de Leopoldina.

Quadro 7.23 – Intensidade de uso fertilizantes por culturas no município de Leopoldina

Cultura	Consumo (t.ha <sup>-1</sup> )	Área Plantada (ha)	Massa utilizada (t)
Café	0,54	30	16,20
Feijão	0,15	170	25,50
Milho	0,31	1.100	341,00
Cana-de-açúcar	0,46	400	184,00

Fonte: (DONZELLI, 2005)

É necessário que se realize a análise de solo a definição da quantidade de nutriente a ser aplicada no solo do município.

## MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

A Figura 7.51 apresenta o potencial de toneladas de dióxido de carbono que podem ser mitigadas com a geração de energia elétrica a partir da codigestão dos resíduos agropecuários no Condomínio de Agroenergia de Leopoldina.

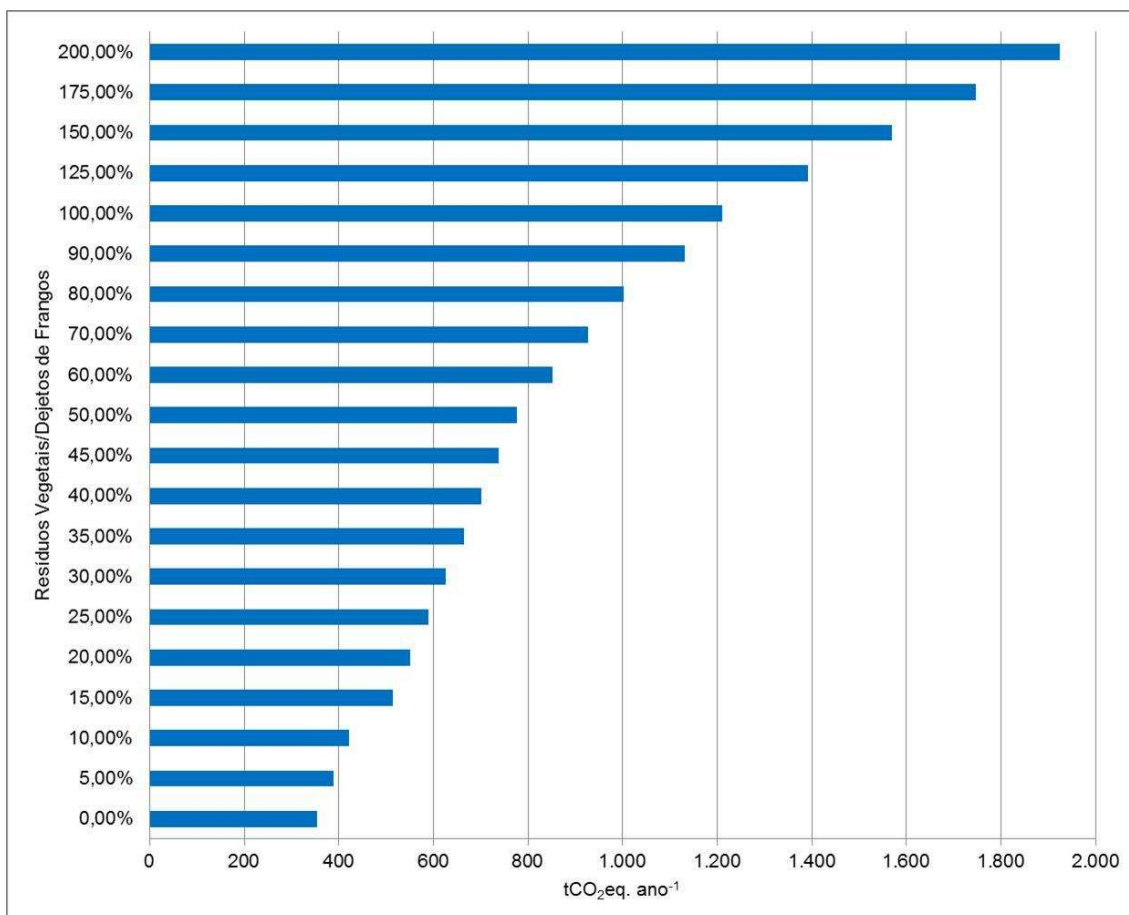


Figura 7.51 – Potencial de mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>.

Considerando-se que a intensidade de emissão média de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>eq.) da carne de frango é de 5,4 kg de CO<sub>2</sub>eq./Kg de carcaça, sendo a produção de ração para os animais e a gestão dos dejetos respondendo pela maior parte das emissões (MACLEOD, *et al.*, 2013). O peso médio da carcaça de frango produzida em Minas Gerais no ano de 2012 foi de 2,0 kg (MINAS GERAIS, 2015b). Tem-se que a emissão de CO<sub>2</sub>eq. para a produção de suínos no condomínio de Leopoldina é de 7.905,6 tCO<sub>2</sub>eq./ano. A geração de eletricidade a partir dos resíduos agropecuários é capaz de compensar 24,34% do total de emissões. É importante observar que essa mitigação diz respeito apenas ao aproveitamento energético dos resíduos. A cadeia produtiva da avicultura é formada por outros elos emissores de dióxido de carbono.

## TRANSPORTE DE BIOMETANO E DE RESÍDUOS

### GASODUTO/RESIDUODUTO

O comprimento total do duto para conectar as 4 granjas de frangos do Condomínio Leopoldina é de 38.551 metros. O Quadro 7.24 apresenta o comprimento de cada um dos dutos dimensionados para o condomínio.

Quadro 7.24 – Comprimento dos dutos dimensionados para o Condomínio de Agroenergia de Leopoldina

Duto	Comprimento (m)
1	100
2	35.672
3	2.779
Total	38.541

A Figura 7.52 apresenta a rotas traçada pelos dutos no território do município de Leopoldina.

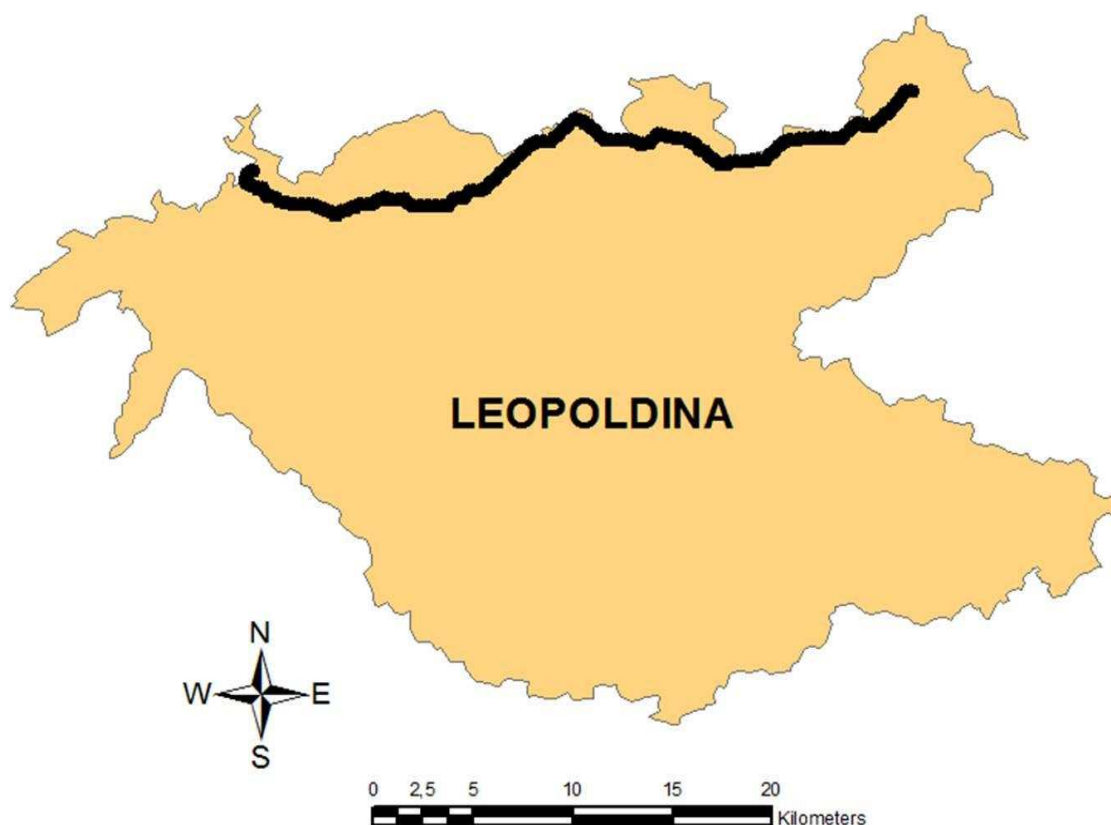


Figura 7.52 – Traçado dos dutos no município de Leopoldina.

## Estradas

O comprimento das rotas de transporte dos resíduos de frangos por estradas (desde as granjas até a central de geração de energia) no município de Leopoldina é mostrado no Quadro 7.25.

Quadro 7.25 – Comprimento das rotas de transporte dos resíduos de frangos por estradas

Rota	Distância (km)
1	50,8
2	53,6
Total	104,4

## ANÁLISE ECONÔMICA

A Figura 7.53 apresenta os custos de produção de energia elétrica considerando: (i) transporte do biometano por gasoduto; (ii) o transporte dos resíduos por residuoduto; e (iii) o transporte dos resíduos por estradas comparados com o valor pago nos leilões de eletricidade da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e os preços de comercialização da energia praticados pelas concessionárias da região.

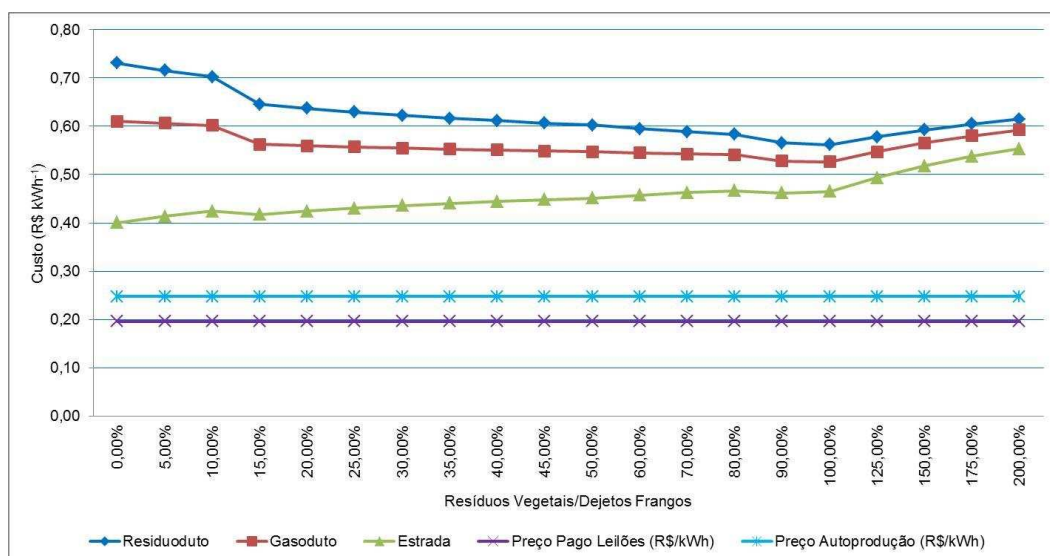


Figura 7.53 – Custo de produção de energia elétrica para diferentes modais de transporte no Condomínio de Agroenergia de Leopoldina.

O custo da produção de energia elétrica com a codigestão aumenta de acordo com a adição de resíduos vegetais no substrato. O preço pago pela energia gerada a partir do biometano de resíduos agropecuários nos leilões e os praticados pelas concessionárias na região são menores que os custos de produção dos três modais de transporte (residuoduto, gasoduto e estrada). O custo de produção com o transporte dos dejetos de frangos por estradas é menor que no transporte por duto e o transporte do biometano por gasoduto.

## VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)

A Figura 7.54 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 1 a 8 em que ocorre o aproveitamento apenas de dejetos de frangos (sem codigestão).

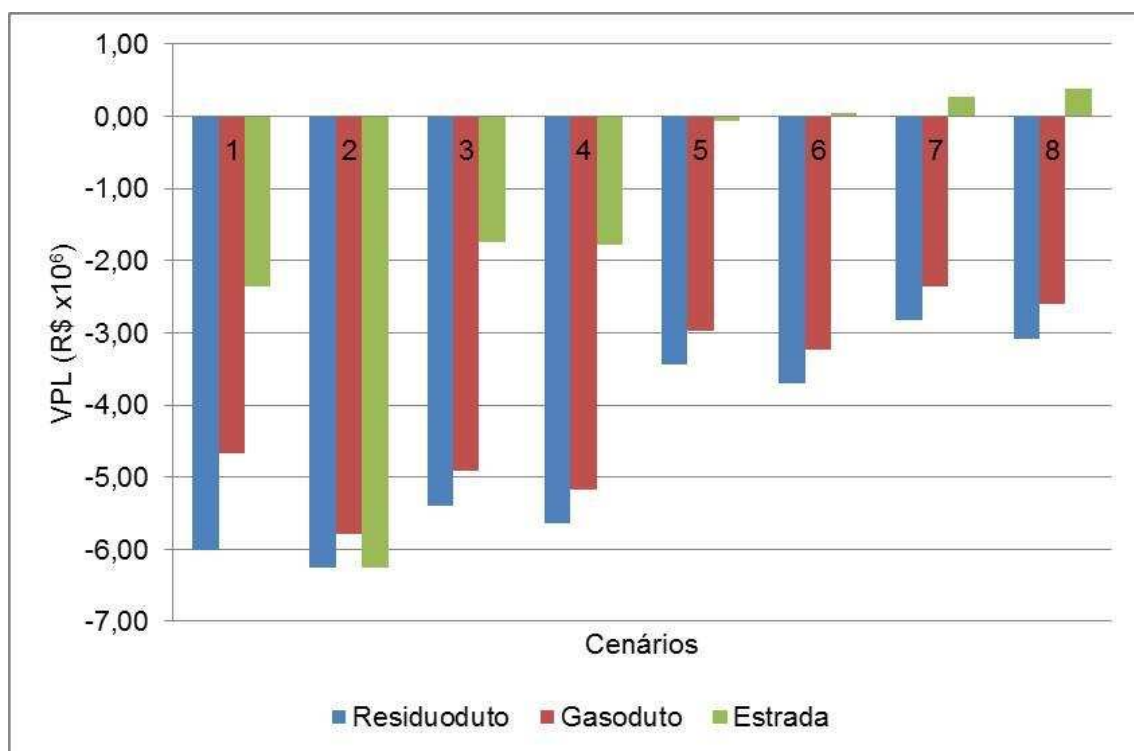


Figura 7.54 – VPL para os cenários sem codigestão.

Para os cenários 1, 2, 3, 4 em que se comercializa apenas a energia elétrica gerada a partir do biometano a valores dos leilões de energia e da tarifa das concessionárias, com financiamento dos empreendimentos com recursos próprios e por meio de empréstimos não há viabilidade econômica, ou seja,  $VPL < 0$ .

O cenário 5 em que ocorre a comercialização da energia elétrica gerada a partir do biometano a valores dos leilões de energia e o biofertilizante, também não é viável economicamente.

Apresentam viabilidade econômica apenas os cenários 6, 7 e 8, mas somente para o transporte dos dejetos de frangos por estradas. No cenário 6, o biofertilizante responde por 52,06% da receita obtida. Nos cenários 7 e 8, o biofertilizante responde por 46,23% da receita obtida.

A Figura 7.55 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 5%.

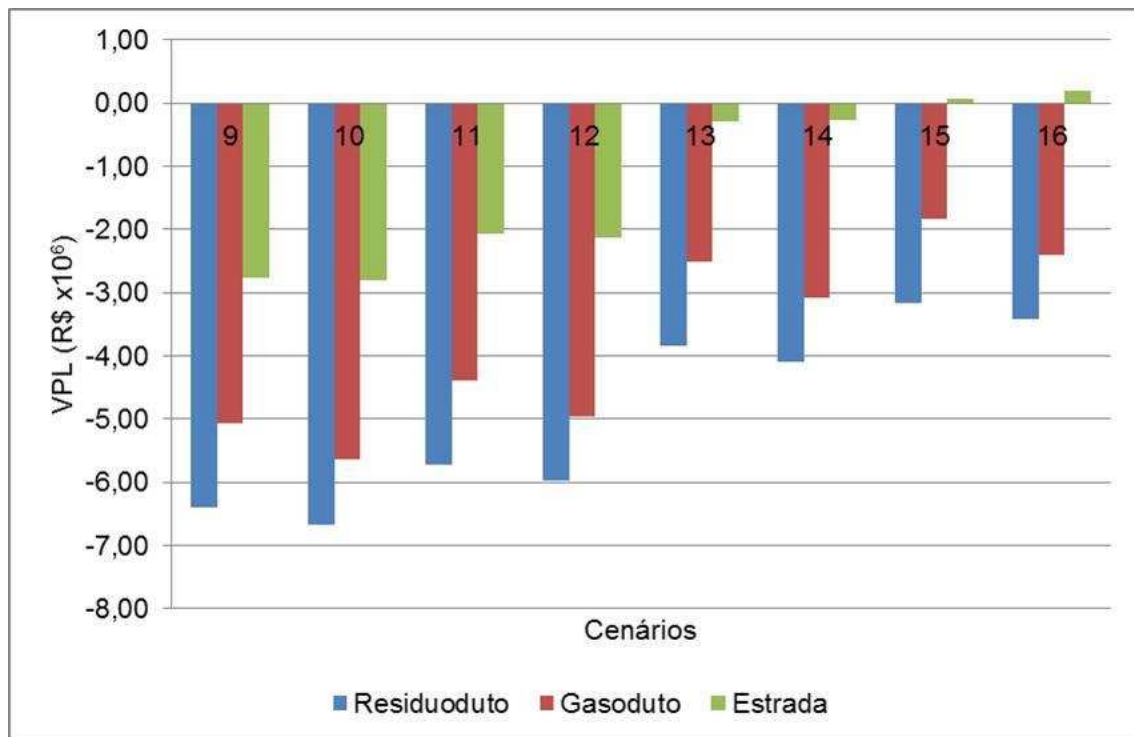


Figura 7.55 – VPL para os cenários de codigestão com 5% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos frangos igual a 5% implica na utilização de uma massa total igual a 74,79 t ano<sup>-1</sup> de resíduos dos cultivos agrícolas de café, feijão, milho e cana-de-açúcar. Os cenários 15 e 16 apresentam viabilidade econômica somente para o transporte dos dejetos de frangos por estradas. Nestes cenários a comercialização da energia elétrica gerada responde por mais da metade da receita obtida pelo empreendimento. Isso se deve

à maior contribuição dos resíduos vegetais empregados na codigestão para a produção de biometano do que de biofertilizante. Os demais cenários são inviáveis economicamente.

A Figura 7.56 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 10%.

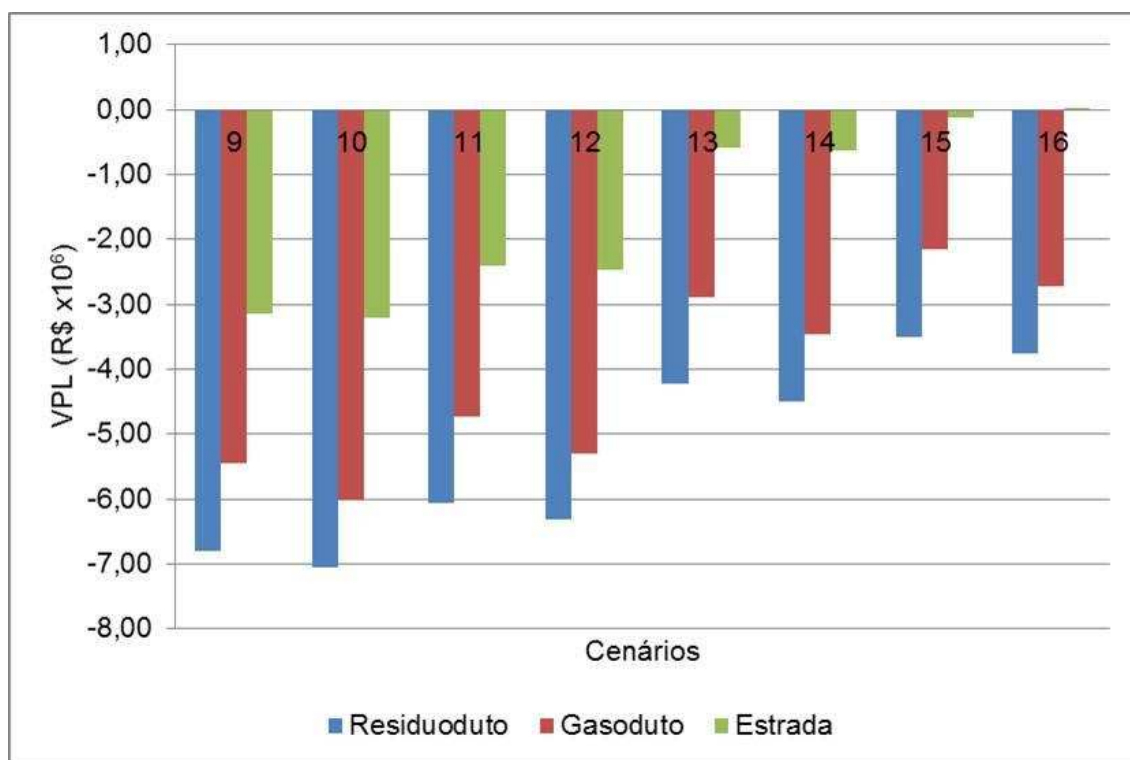


Figura 7.56 – VPL para os cenários de codigestão com 10% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos frangos igual a 10% implica na utilização de uma massa total igual a 149,57 t ano<sup>-1</sup> de resíduos dos cultivos agrícolas de café, feijão, milho e cana-de-açúcar. O cenário 16 é o único que apresenta viabilidade econômica somente para o transporte de dejetos de frangos por estradas. Neste cenário a comercialização da energia elétrica gerada responde por mais da metade da receita obtida pelo empreendimento. Isso se deve à maior contribuição dos resíduos vegetais empregados na codigestão para a produção de biometano do que de biofertilizante. Os demais cenários são inviáveis economicamente.

A Figura 7.57 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 15%.

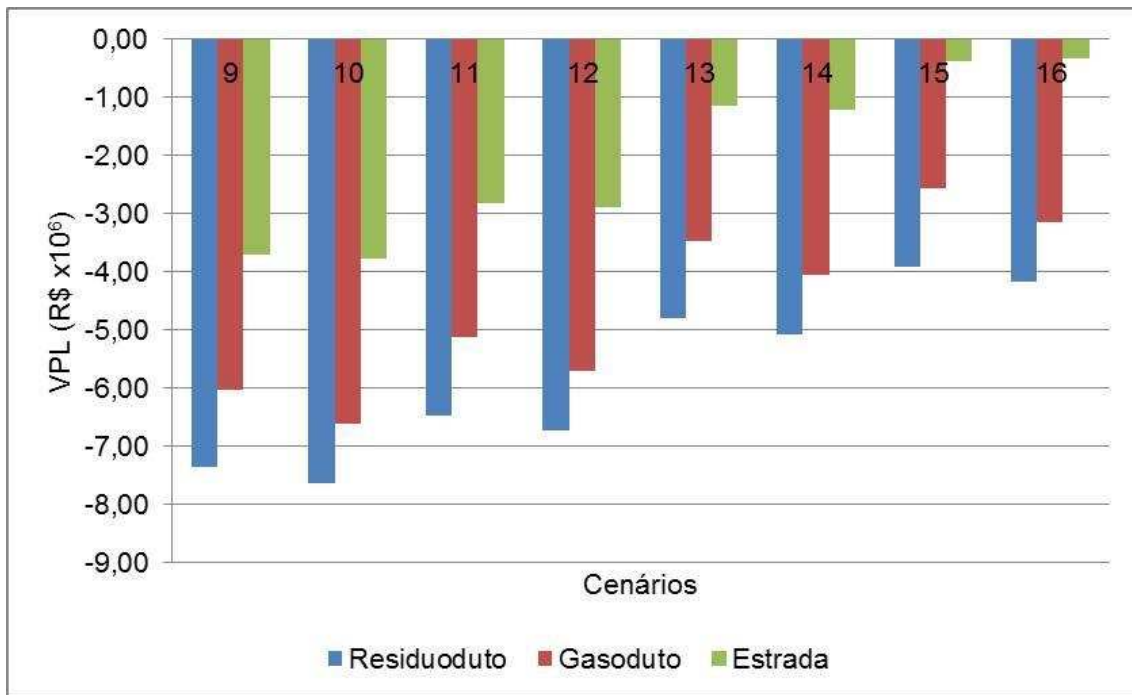


Figura 7.57 – VPL para os cenários de codigestão com 15% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos frangos igual a 15% não apresenta viabilidade econômica em nenhum dos cenários simulados.

A Figura 7.58 apresenta o aumento na produção de biometano com a codigestão considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos de frangos para o Condomínio de Agroenergia de Leopoldina.

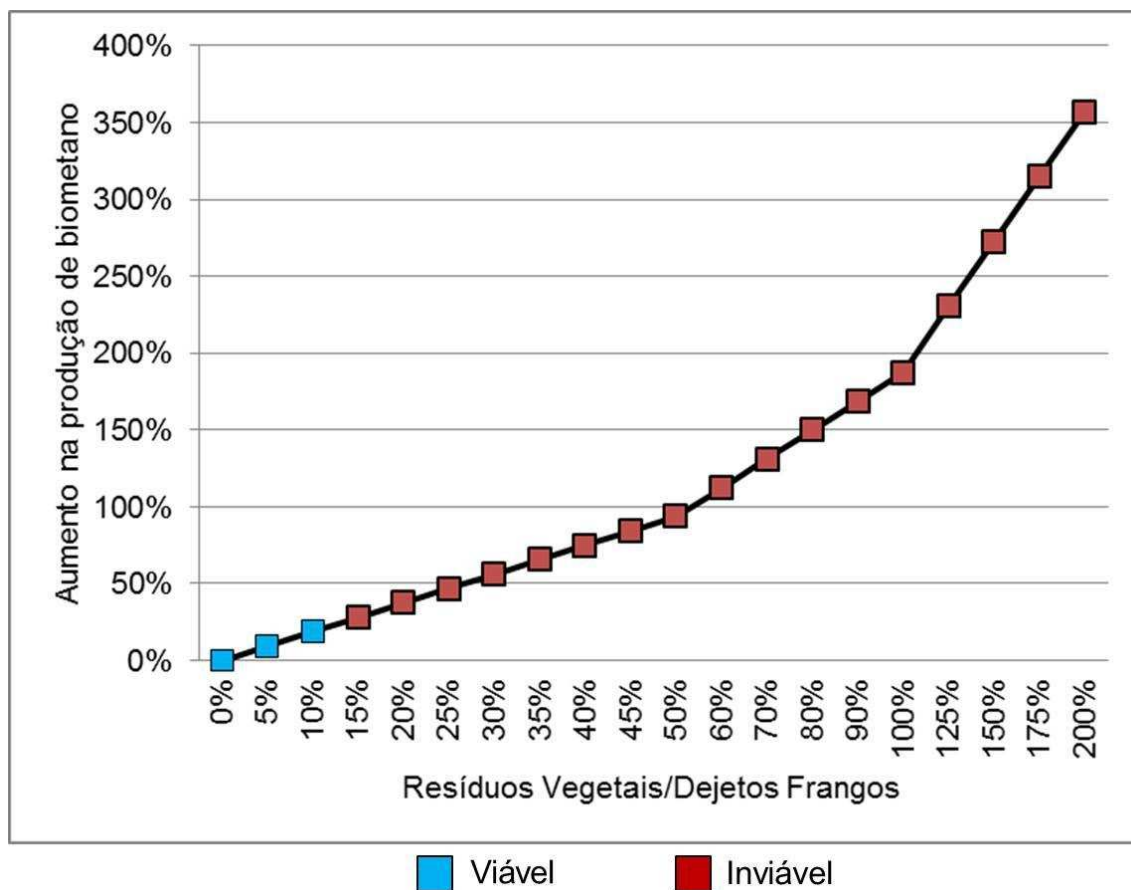


Figura 7.58 – Aumento na produção de biometano com a codigestão.

O aumento percentual da produção de biometano com a codigestão no condomínio de agroenergia Leopoldina pode chegar a 357%. No entanto a codigestão só é viável para cenários com razões resíduos vegetais/dejetos frangos de 5% e 10%. Para as demais razões resíduos vegetais/dejetos frangos simuladas, todos os cenários são inviáveis economicamente.

### 7.3.5. CONDOMÍNIO PIRAÚBA

O município de Piraúba se localiza no centro da região da Zona da Mata de Minas Gerais. Possui uma população de 10.866 habitantes distribuídos em uma área de 143,982 km<sup>2</sup>.

A Figura 7.59 mostra a localização do município de Piraúba na Zona da Mata de Minas Gerais.

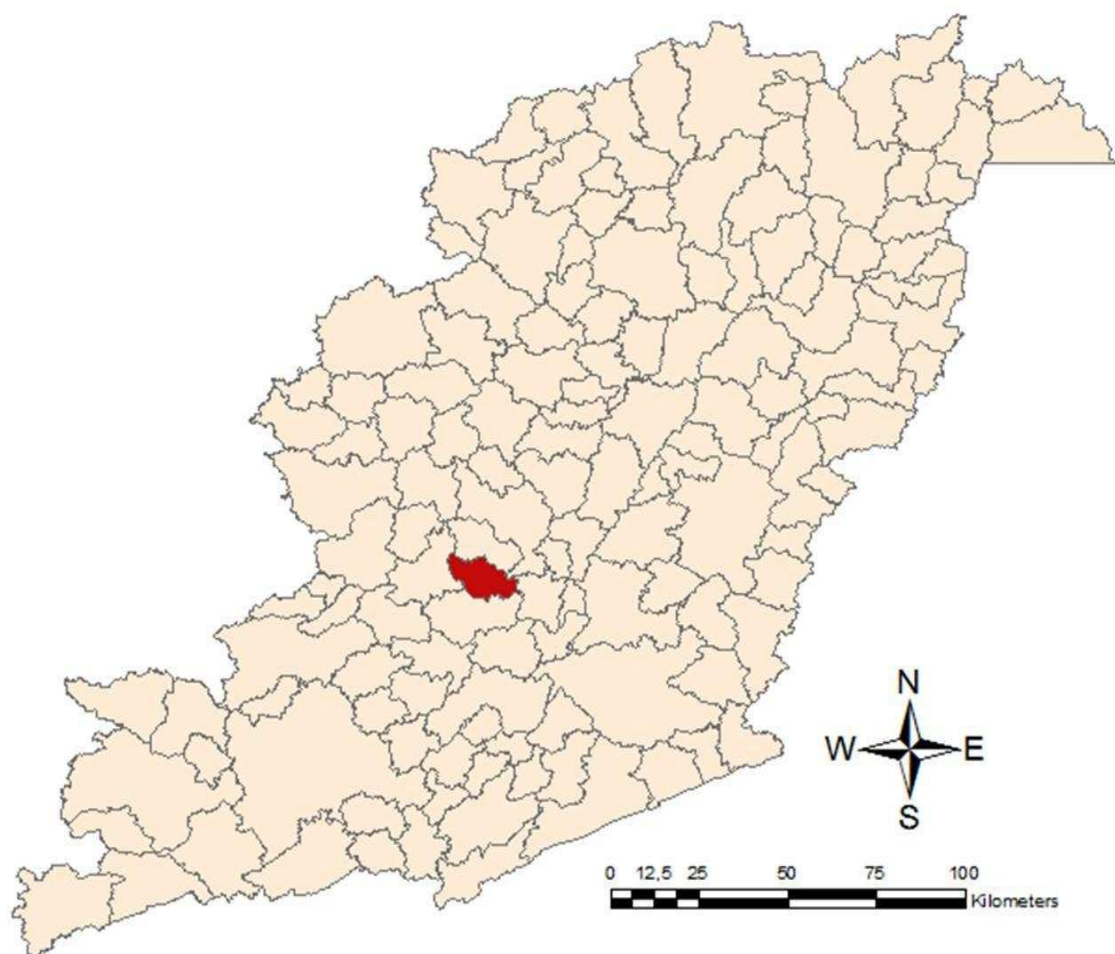


Figura 7.59 – Localização de Piraúba na Zona da Mata de Minas Gerais.

O Quadro 7.26 apresenta as granjas do município de Piraúba e suas respectivas quantidades de frangos e produção de dejetos.

Quadro 7.26 – Granjas e suas respectivas quantidades de frangos e produção de dejetos no município de Piraúba

Granja	Quantidade de frangos	Dejetos (t ano <sup>-1</sup> )
PB-1	85.000	1.057,74
PB-2	81.000	1.007,96
PB-3	29.000	360,88
PB-4	18.000	223,99
PB-5	18.000	223,99
PB-6	18.000	223,99
PB-7	16.000	199,10
PB-8	12.000	149,33
PB-9	12.000	149,33

PB-10	9.000	112,00
PB-11	9.000	112,00
Total	307.000	3.820,31

Fonte: (IMA, 2013b).

O total de resíduos produzidos anualmente pelas granjas localizadas no município de Piraúba corresponde aos resíduos produzidos por 96 pessoas (FLEMING e FORD, 2001).

A Figura 7.60 apresenta a localização das granjas no município de Piraúba.

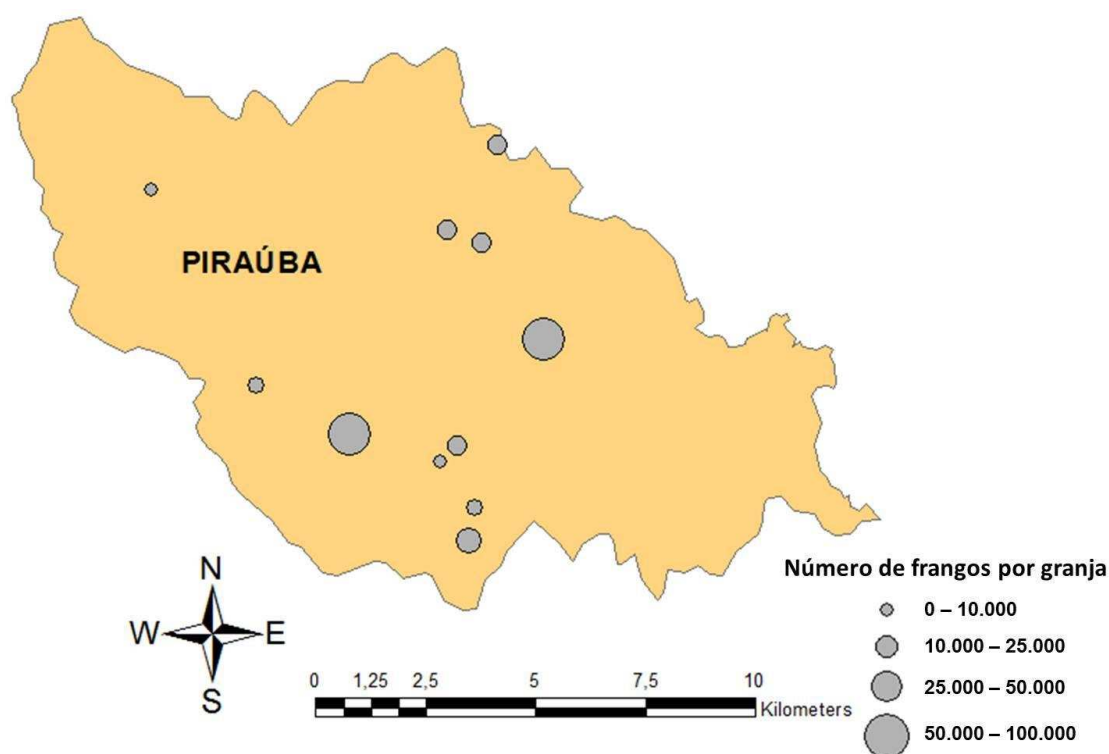


Figura 7.60 – Localização das granjas de frangos no município de Piraúba.

O Quadro 7.27 apresenta a massa de resíduos vegetais disponível no município de Piraúba.

Quadro 7.27 – Resíduos de cultivos vegetais disponíveis no município de Piraúba

Município	café (t ano <sup>-1</sup> )	feijão (t ano <sup>-1</sup> )	milho (t ano <sup>-1</sup> )	bagaço de cana (t ano <sup>-1</sup> )	palha de cana (t ano <sup>-1</sup> )
Piraúba	0,00	68,26	85,20	67,20	98,00

A Figura 7.61 apresenta a produção de biometano por substrato, considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos suínos para o Condomínio de Agroenergia de Piraúba.

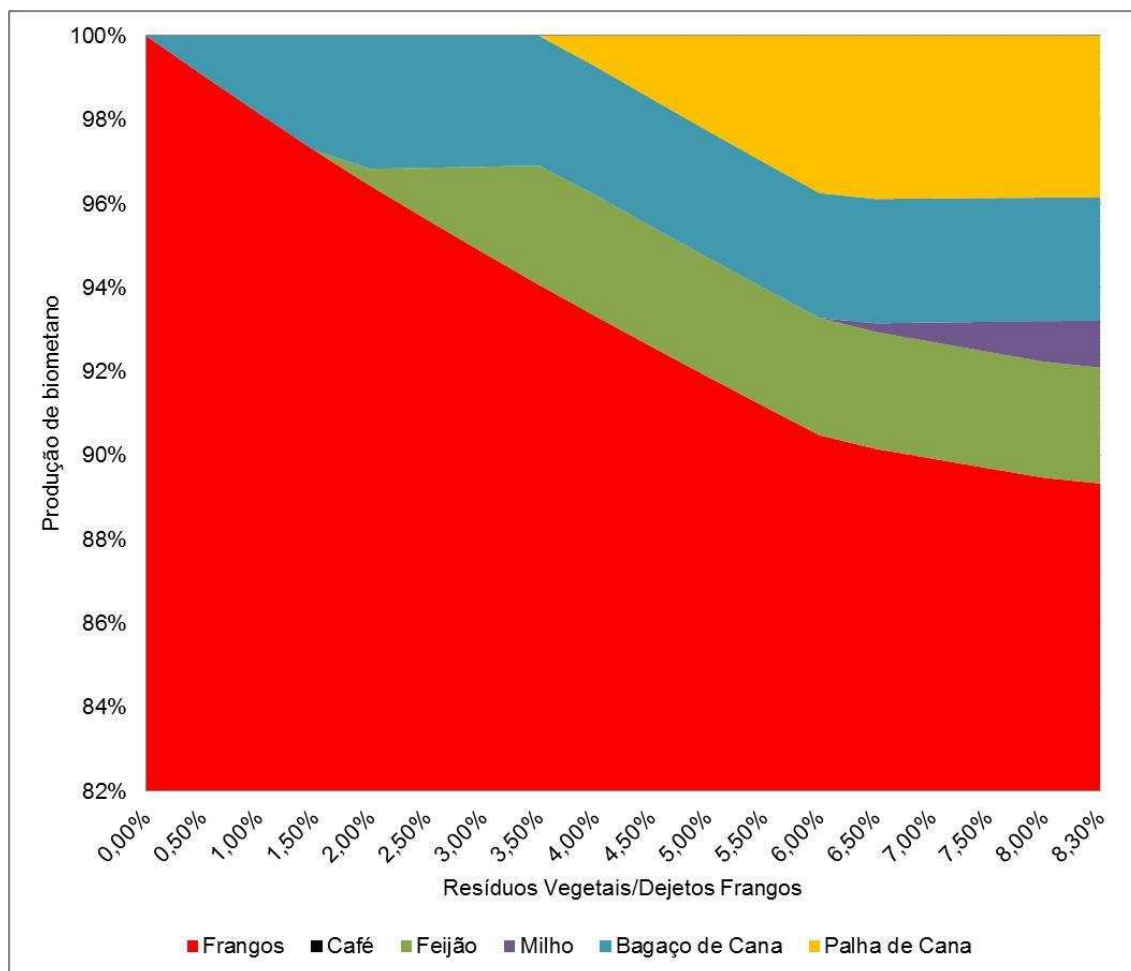


Figura 7.61 – Produção de biometano por substrato.

A massa de resíduos vegetais disponível no condomínio de Piraúba corresponde a 8,33% da massa de dejetos de frangos. Dada a disponibilidade de resíduos vegetais, a contribuição máxima dos mesmos é de 10,67% da produção de biometano.

A Figura 7.62 apresenta a produção de biometano e a respectiva potência elétrica gerada.

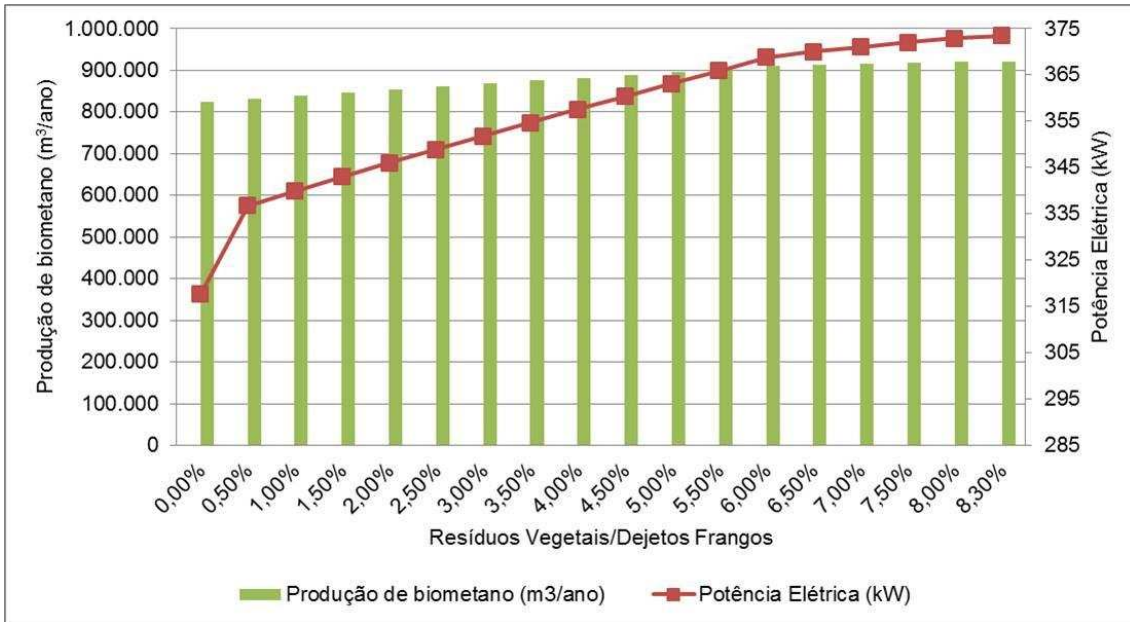


Figura 7.62 – Produção de biometano e potência elétrica.

A produção de biometano a partir dos resíduos agropecuários disponíveis chega a 921.673 m³/ano e a potência elétrica disponível é de 374 kW.

A Figura 7.63 apresenta a energia elétrica produzida considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos de frangos para o Condomínio de Agroenergia de Piranga.

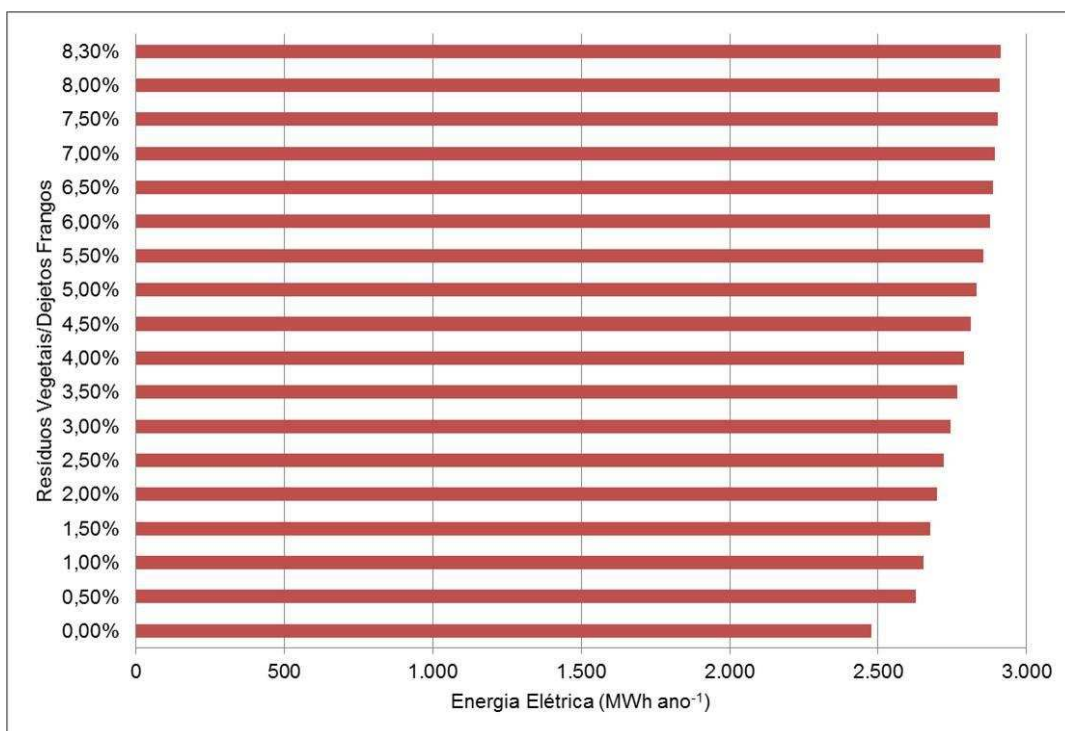


Figura 7.63 – Energia elétrica produzida.

O consumo total de energia elétrica no município de Piraúba no ano de 2012 foi de 11.359,53 MWh (CEMIG, 2013). A eletricidade gerada com o biometano obtido de dejetos de frangos e resíduos vegetais possibilitaria atender a 25,65% da demanda de energia elétrica do município.

## PRODUÇÃO DE BIOFERTILIZANTE

A Figura 7.64 apresenta a massa de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) contida no digestato dos resíduos agropecuários no Condomínio de Agroenergia de Piraúba.

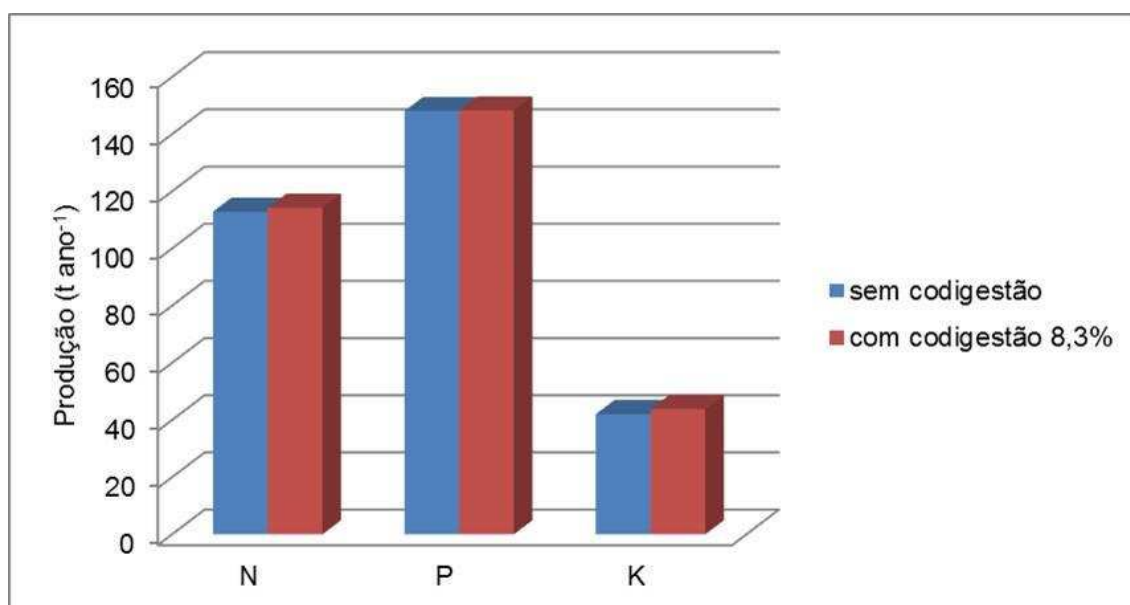


Figura 7.64 – Produção de biofertilizante no Condomínio de Agroenergia de Piraúba.

O aumento na produção de Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) com a codigestão dos dejetos de suínos e resíduos vegetais é de 1,16%, 0,14% e 4,09%, respectivamente.

O Quadro 7.28 apresenta a intensidade de uso de fertilizantes das culturas do café, feijão, milho e cana-de-açúcar no município de Piraúba.

Quadro 7.28 – Intensidade de uso fertilizantes por culturas no município de Piraúba

Cultura	Consumo (t.ha <sup>-1</sup> )	Área Plantada (ha)	Massa utilizada (t)
Café	0,54	0	0,00
Feijão	0,15	110	16,50
Milho	0,31	300	93,00
Cana-de-açúcar	0,46	20	9,20

Fonte: (DONZELLI, 2005)

## MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

A Figura 7.65 apresenta o potencial de toneladas de dióxido de carbono que podem ser mitigadas com a geração de energia elétrica a partir da codigestão dos resíduos agropecuários no Condomínio de Agroenergia de Piraúba.

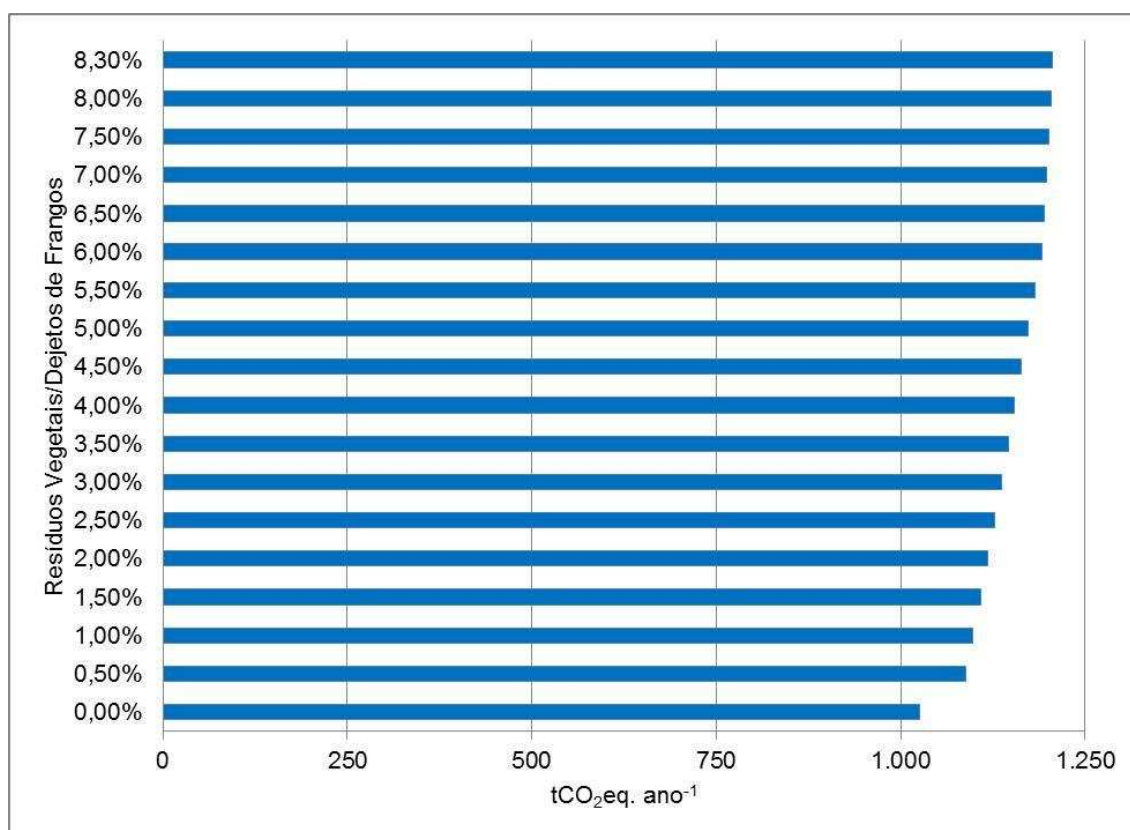


Figura 7.65 – Potencial de mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>.

Considerando-se que a intensidade de emissão média de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>eq.) da carne de frango é de 5,4 kg de CO<sub>2</sub>eq./Kg de carcaça,

sendo a produção de ração para os animais e a gestão dos dejetos respondendo pela maior parte das emissões (MACLEOD, *et al.*, 2013). O peso médio da carcaça de frango produzida em Minas Gerais no ano de 2012 foi de 2,0 kg (MINAS GERAIS, 2015b). Tem-se que a emissão de CO<sub>2</sub>eq. para a produção de suínos no condomínio de Leopoldina é de 20.225,2 tCO<sub>2</sub>eq./ano. A geração de eletricidade a partir dos resíduos agropecuários é capaz de compensar 5,96% do total de emissões. É importante observar que essa mitigação diz respeito apenas ao aproveitamento energético dos resíduos. A cadeia produtiva da avicultura é formada por outros elos emissores de dióxido de carbono.

## TRANSPORTE DE BIOMETANO E DE RESÍDUOS

### GASODUTO/RESIDUODUTO

O comprimento total do duto para conectar as 11 granjas de suínos do Condomínio Piraúba é de 28.087 metros. O Quadro 7.29 apresenta o comprimento de cada um dos dutos dimensionados para o condomínio.

Quadro 7.29 – Comprimento dos dutos dimensionados para o Condomínio de Agroenergia de Piraúba

Duto	Comprimento (m)
1	891
2	1.737
3	803
4	2.864
5	2.538
6	938
7	3.537
8	3.435
9	8.177
10	3.167
Total	28.087

A Figura 7.66 apresenta a rotas traçada pelos dutos no território do município de Piraúba.

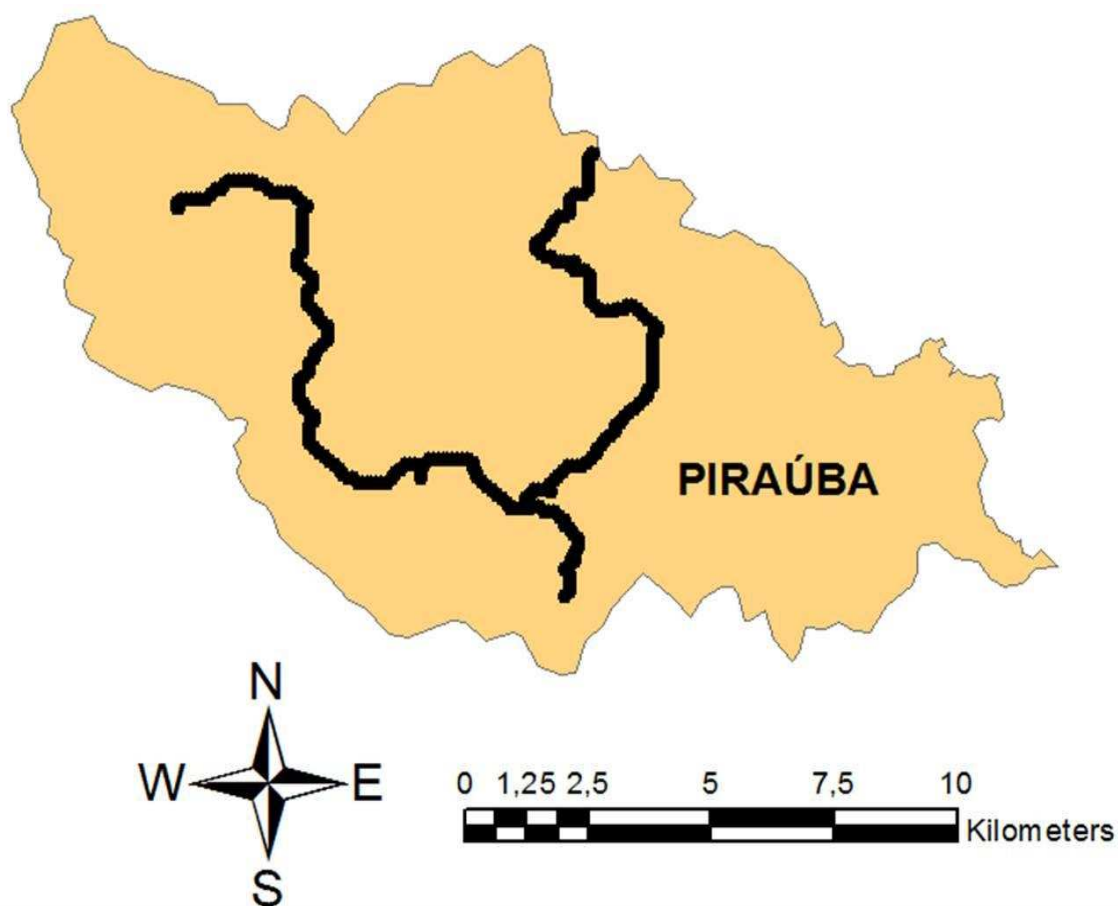


Figura 7.66 – Traçado dos dutos no município de Piraúba.

### Estradas

O comprimento das rotas de transporte dos resíduos de frangos por estradas (desde as granjas até a central de geração de energia) no município de Piraúba é mostrado no Quadro 7.30.

Quadro 7.30 – Comprimento das rotas de transporte dos resíduos de frangos por estradas

Rota	Distância (km)
1	6,2
2	16,2
3	9,4
4	6,2
5	6,7

6	11
7	6,8
8	10
9	11,1
10	3,3
Total	86,9

## ANÁLISE ECONÔMICA

A Figura 7.67 apresenta os custos de produção de energia elétrica considerando: (i) transporte do biometano por gasoduto; (ii) o transporte dos resíduos por residuoduto; e (iii) o transporte dos resíduos por estradas comparados com o valor pago nos leilões de eletricidade da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e os preços de comercialização da energia praticados pelas concessionárias da região.

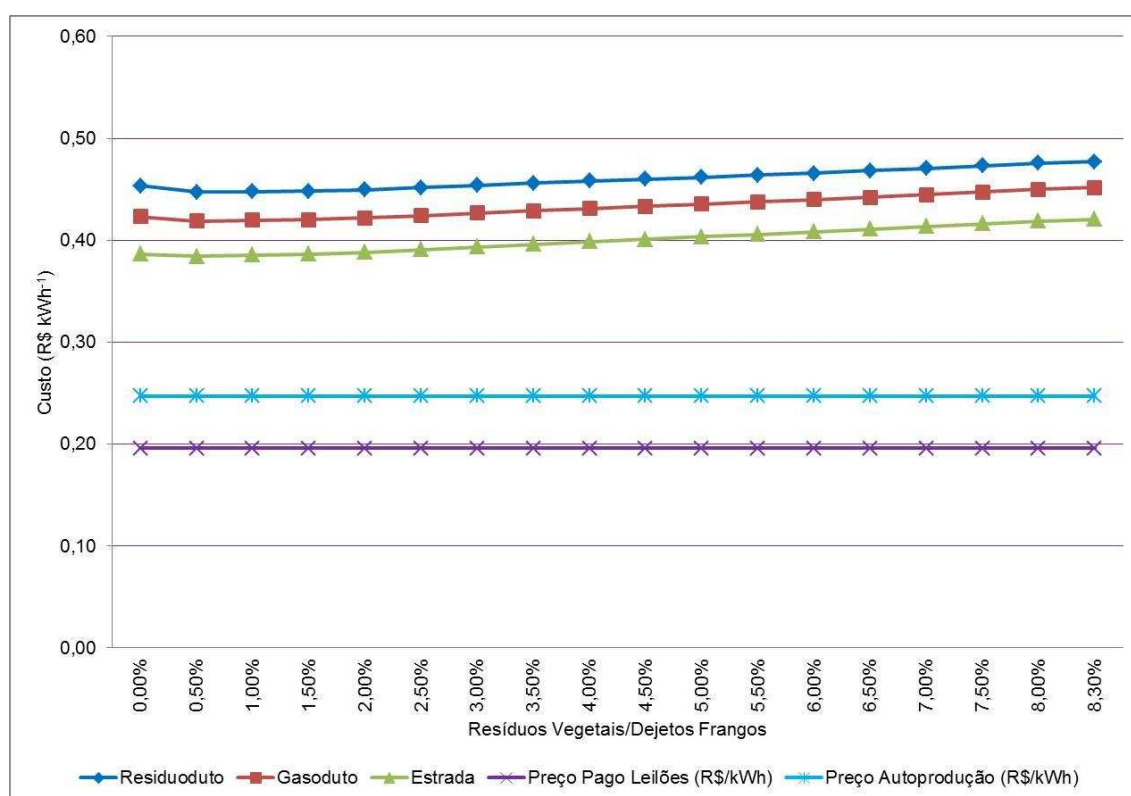


Figura 7.67 – Custo de produção de energia elétrica para diferentes modais de transporte no Condomínio de Agroenergia de Piraúba.

O custo da produção de energia elétrica com a codigestão aumenta de acordo com a adição de resíduos vegetais no substrato. O preço pago pela energia gerada

a partir do biometano de resíduos agropecuários nos leilões e os praticados pelas concessionárias na região são menores que os custos de produção dos três modais de transporte (residuoduto, gasoduto e estrada). O custo de produção com o transporte dos dejetos de frangos por estradas é menor que no transporte por duto e o transporte do biometano por gasoduto.

## VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)

A Figura 7.68 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 1 a 8 em que ocorre o aproveitamento apenas de dejetos de frangos (sem codigestão).

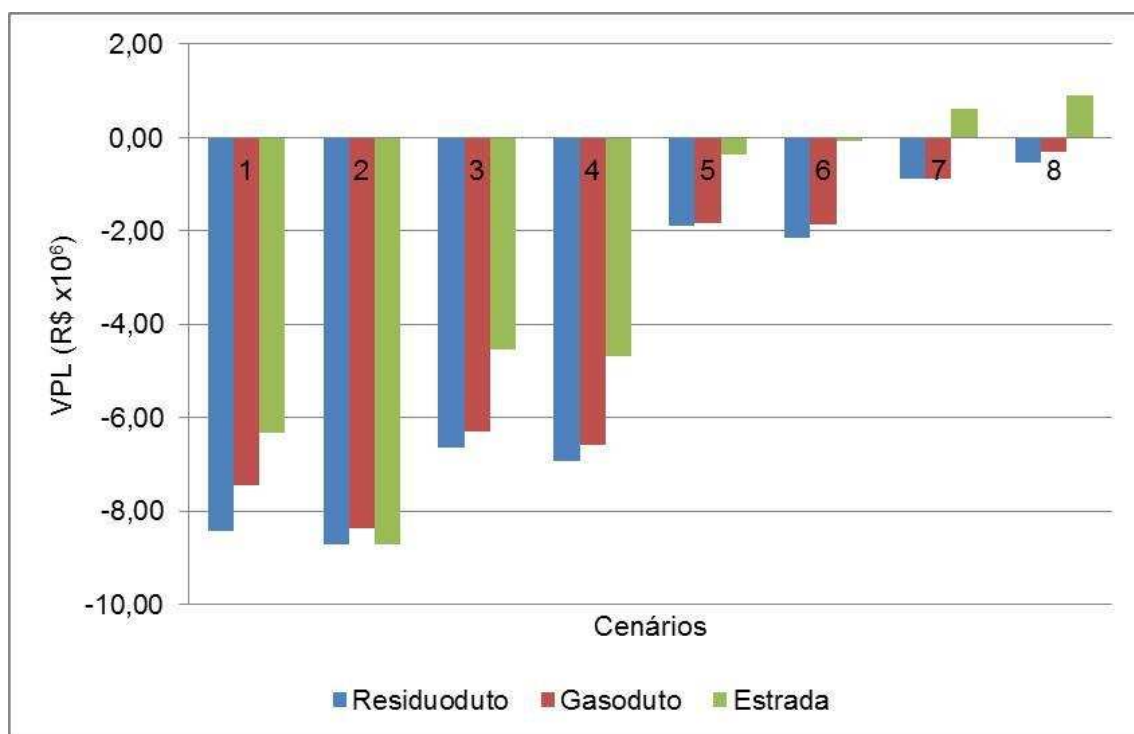


Figura 7.68 – VPL para os cenários sem codigestão.

Para os cenários 1, 2, 3, 4 em que se comercializa apenas a energia elétrica gerada a partir do biometano a valores dos leilões de energia e da tarifa das concessionárias, com financiamento dos empreendimentos com recursos próprios e por meio de empréstimos não há viabilidade econômica, ou seja,  $VPL < 0$ .

Os cenários 5 e 6 em que ocorre a comercialização da energia elétrica gerada a partir do biometano a valores dos leilões de energia e do biofertilizante, também não são viáveis economicamente.

Apresentam viabilidade econômica apenas os cenários 7 e 8, mas somente para o transporte dos dejetos de frangos por estradas. Nestes cenários, o biofertilizante responde por 43,20% da receita obtida.

A Figura 7.69 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 1,0%.

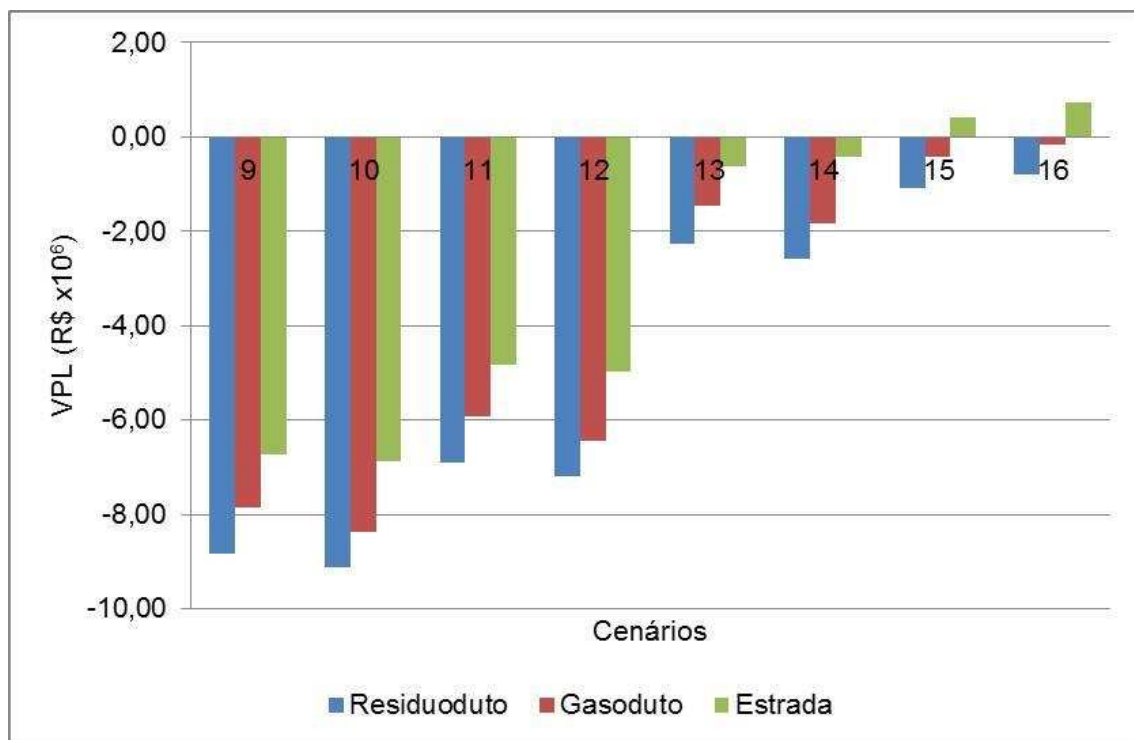


Figura 7.69 – VPL para os cenários de codigestão com 1,0% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos frangos igual 1% implica na utilização de uma massa total igual a 38,27 t ano<sup>-1</sup> de resíduos dos cultivos agrícolas de café, feijão, milho e cana-de-açúcar. Os cenários 15 e 16 apresentam viabilidade econômica somente para o transporte dos dejetos de frangos por estradas. Nestes cenários a comercialização da energia elétrica gerada responde por mais da metade da receita obtida pelo empreendimento. Isso se deve à maior contribuição dos resíduos vegetais empregados na codigestão para a

produção de biometano do que de biofertilizante. Os demais cenários são inviáveis economicamente.

A Figura 7.70 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 2,0%.

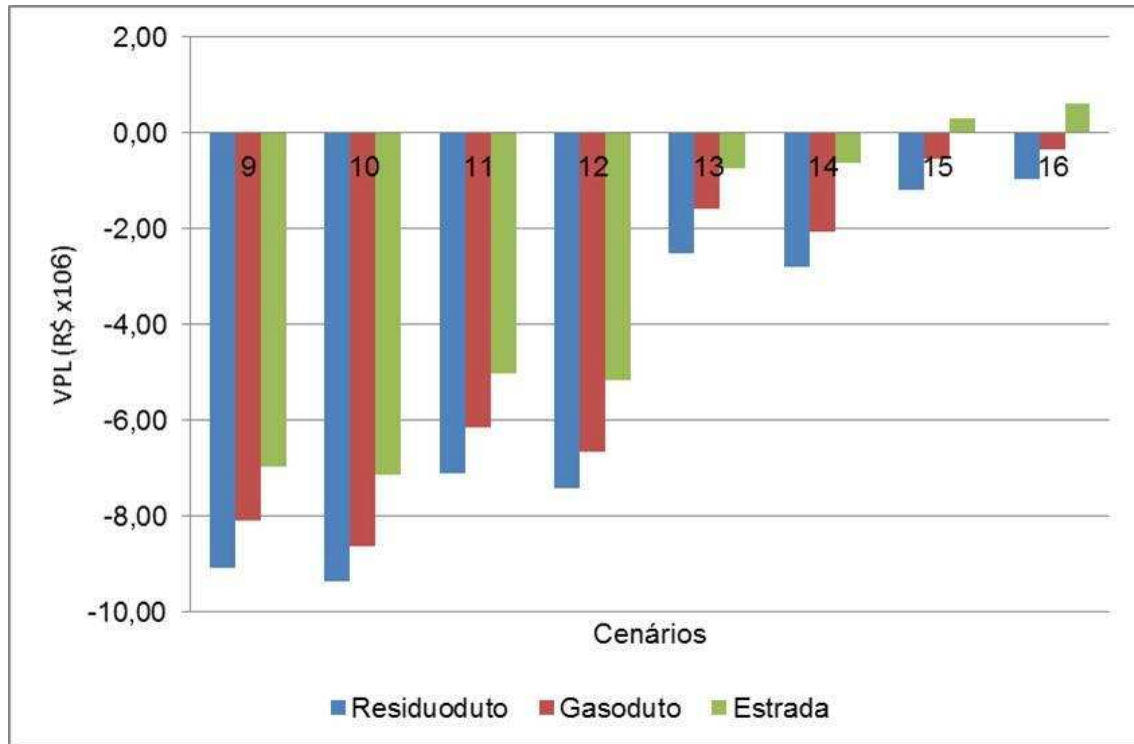


Figura 7.70 – VPL para os cenários de codigestão com 2,0% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos frangos igual 2% implica na utilização de uma massa total igual a 76,53 t ano<sup>-1</sup> de resíduos dos cultivos agrícolas de café, feijão, milho e cana-de-açúcar. Os cenários 15 e 16 apresentam viabilidade econômica somente para o transporte dos dejetos de frangos por estradas. Nestes cenários a comercialização da energia elétrica gerada responde por mais da metade da receita obtida pelo empreendimento. Isso se deve à maior contribuição dos resíduos vegetais empregados na codigestão para a produção de biometano do que de biofertilizante. Os demais cenários são inviáveis economicamente.

A Figura 7.71 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 3,0%.

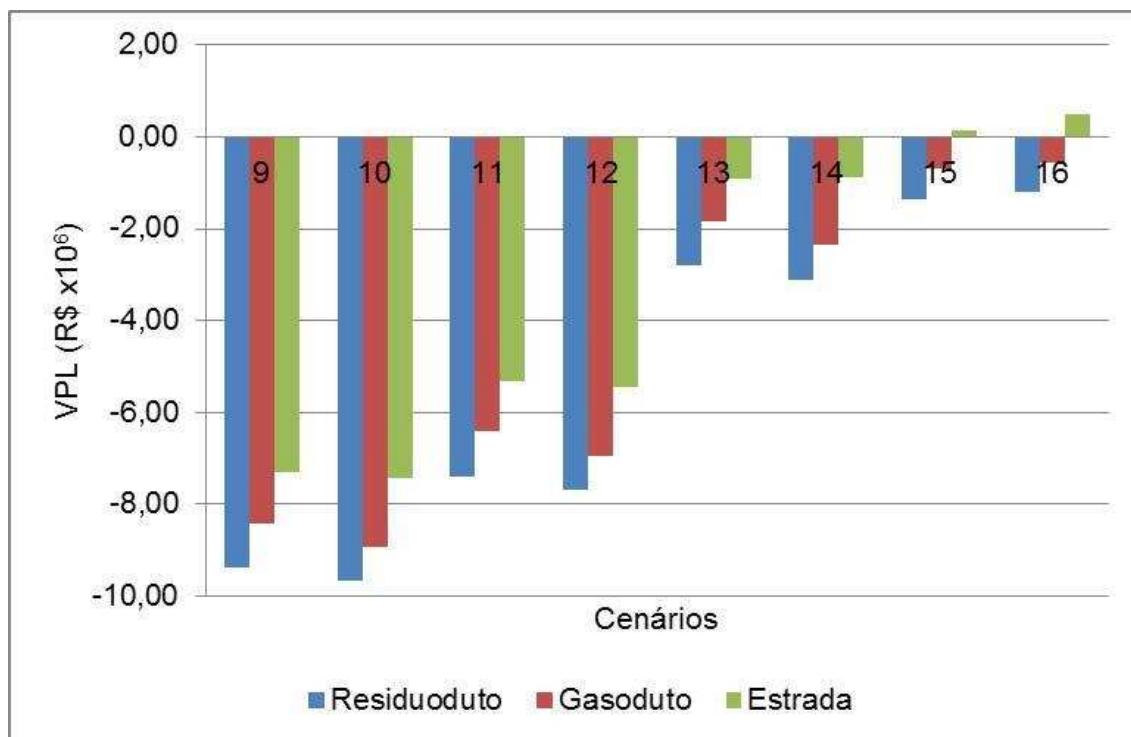


Figura 7.71 – VPL para os cenários de codigestão com 3,0% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos frangos igual 3% implica na utilização de uma massa total igual a 114,80 t ano<sup>-1</sup> de resíduos dos cultivos agrícolas de café, feijão, milho e cana-de-açúcar. Os cenários 15 e 16 apresentam viabilidade econômica somente para o transporte dos dejetos de frangos por estradas. Nestes cenários a comercialização da energia elétrica gerada responde por mais da metade da receita obtida pelo empreendimento. Isso se deve à maior contribuição dos resíduos vegetais empregados na codigestão para a produção de biometano do que de biofertilizante. Os demais cenários são inviáveis economicamente.

A Figura 7.72 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 4,0%.

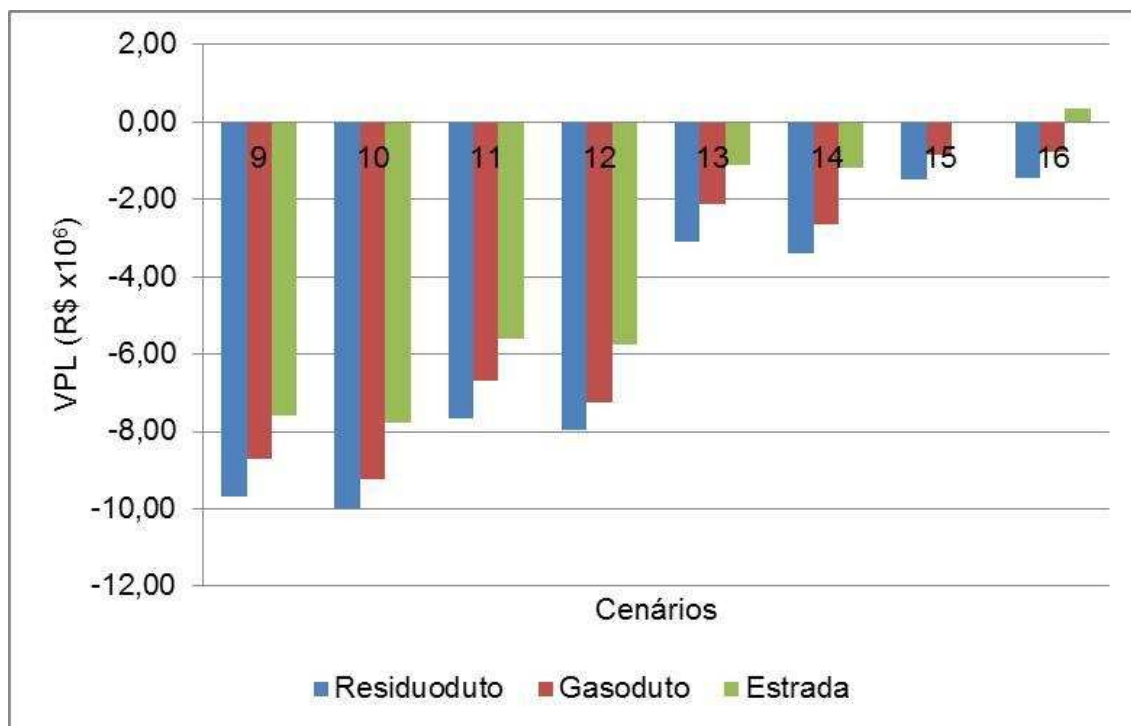


Figura 7.72 – VPL para os cenários de codigestão com 4,0% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos frangos igual 4% implica na utilização de uma massa total igual a 114,80 t ano<sup>-1</sup> de resíduos dos cultivos agrícolas de café, feijão, milho e cana-de-açúcar. O cenário 16 é o único que apresenta viabilidade econômica e somente para o transporte dos dejetos de frangos por estradas. Nestes cenários a comercialização da energia elétrica gerada responde por mais da metade da receita obtida pelo empreendimento. Isso se deve à maior contribuição dos resíduos vegetais empregados na codigestão para a produção de biometano do que de biofertilizante. Os demais cenários são inviáveis economicamente.

A Figura 7.73 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 5,0%.

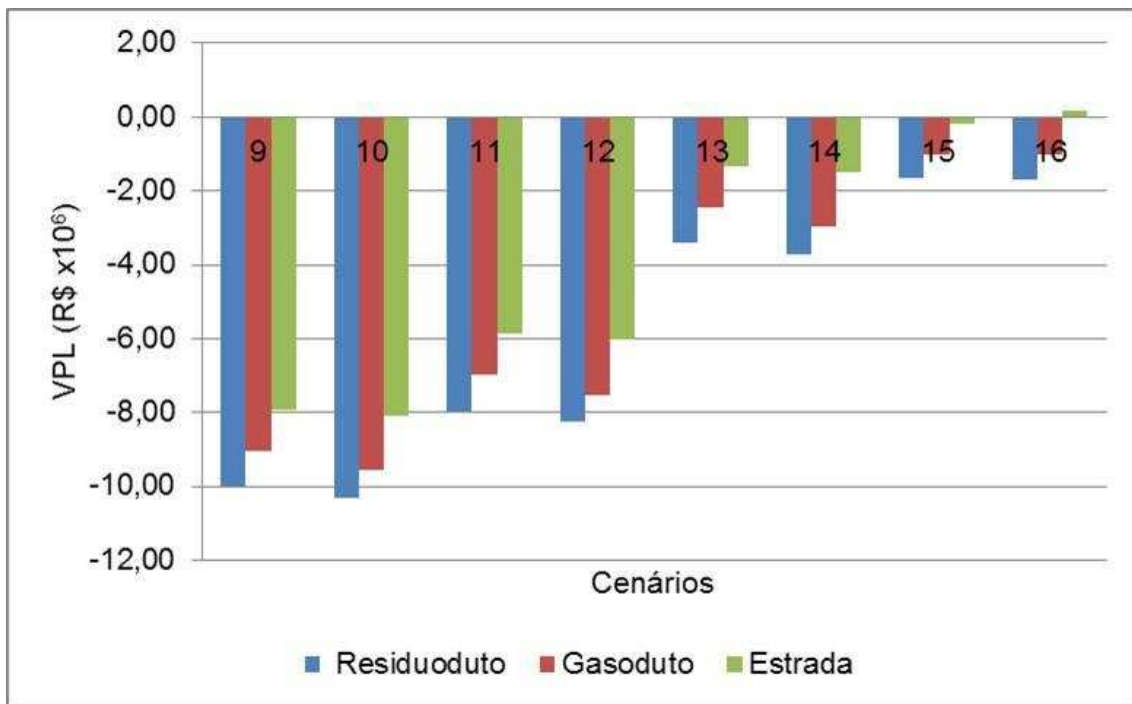


Figura 7.73 – VPL para os cenários de codigestão com 5,0% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos frangos igual 5% implica na utilização de uma massa total igual a 191,33 t ano<sup>-1</sup> de resíduos dos cultivos agrícolas de café, feijão, milho e cana-de-açúcar. O cenário 16 é o único que apresenta viabilidade econômica e somente para o transporte dos dejetos de frangos por estradas. Nestes cenários a comercialização da energia elétrica gerada responde por mais da metade da receita obtida pelo empreendimento. Isso se deve à maior contribuição dos resíduos vegetais empregados na codigestão para a produção de biometano do que de biofertilizante. Os demais cenários são inviáveis economicamente.

A Figura 7.74 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 6,0%.

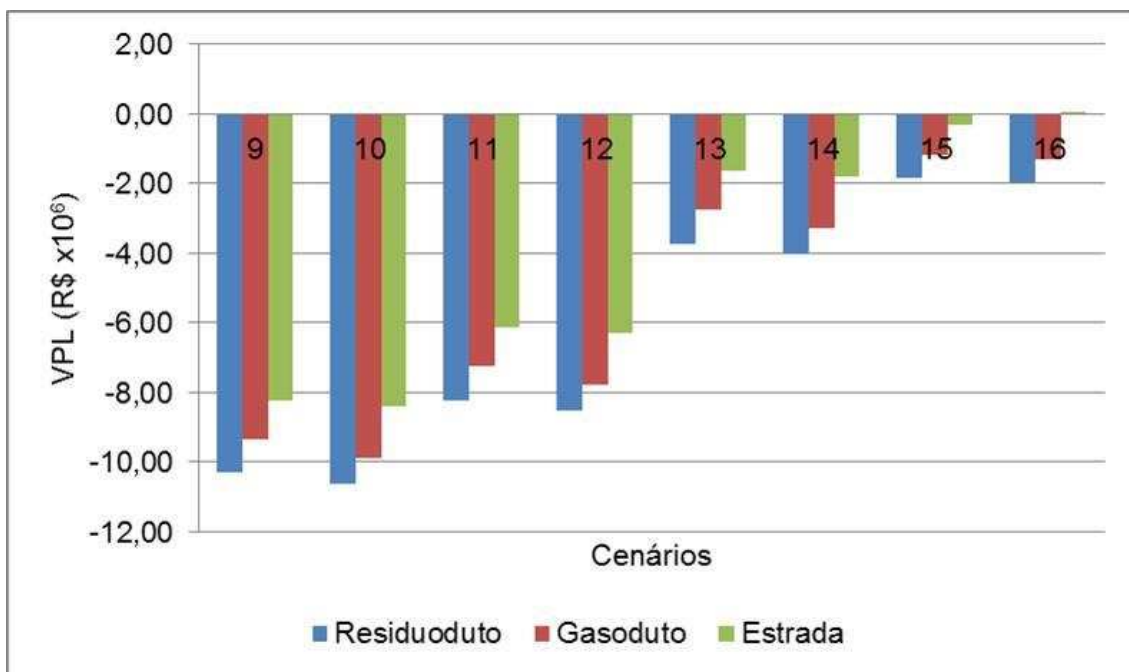


Figura 7.74 – VPL para os cenários de codigestão com 6,0% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos frangos igual 6% implica na utilização de uma massa total igual a 229,59 t ano<sup>-1</sup> de resíduos dos cultivos agrícolas de café, feijão, milho e cana-de-açúcar. O cenário 16 é o único que apresenta viabilidade econômica e somente para o transporte dos dejetos de frangos por estradas. Nestes cenários a comercialização da energia elétrica gerada responde por mais da metade da receita obtida pelo empreendimento. Isso se deve à maior contribuição dos resíduos vegetais empregados na codigestão para a produção de biometano do que de biofertilizante. Os demais cenários são inviáveis economicamente.

A Figura 7.75 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 7,0%.

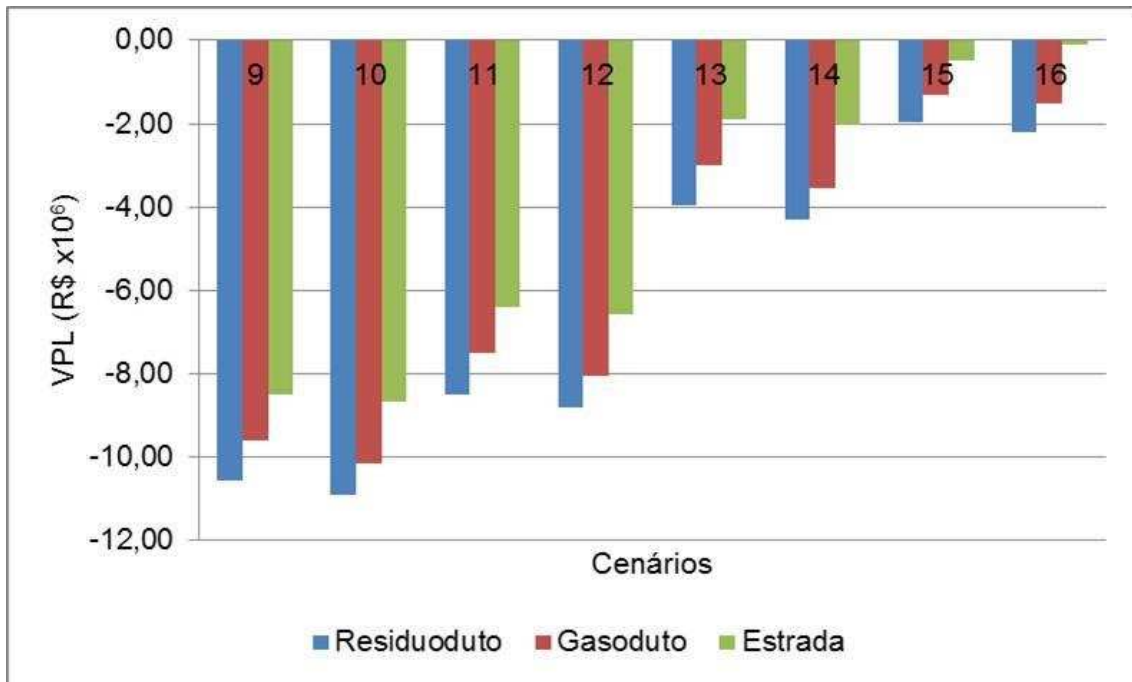


Figura 7.75 – VPL para os cenários de codigestão com 7,0% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos frangos igual a 7% não apresenta viabilidade econômica em nenhum dos cenários simulados.

A Figura 7.76 apresenta o aumento na produção de biometano com a codigestão considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos de frangos para o Condomínio de Agroenergia de Piraúba.

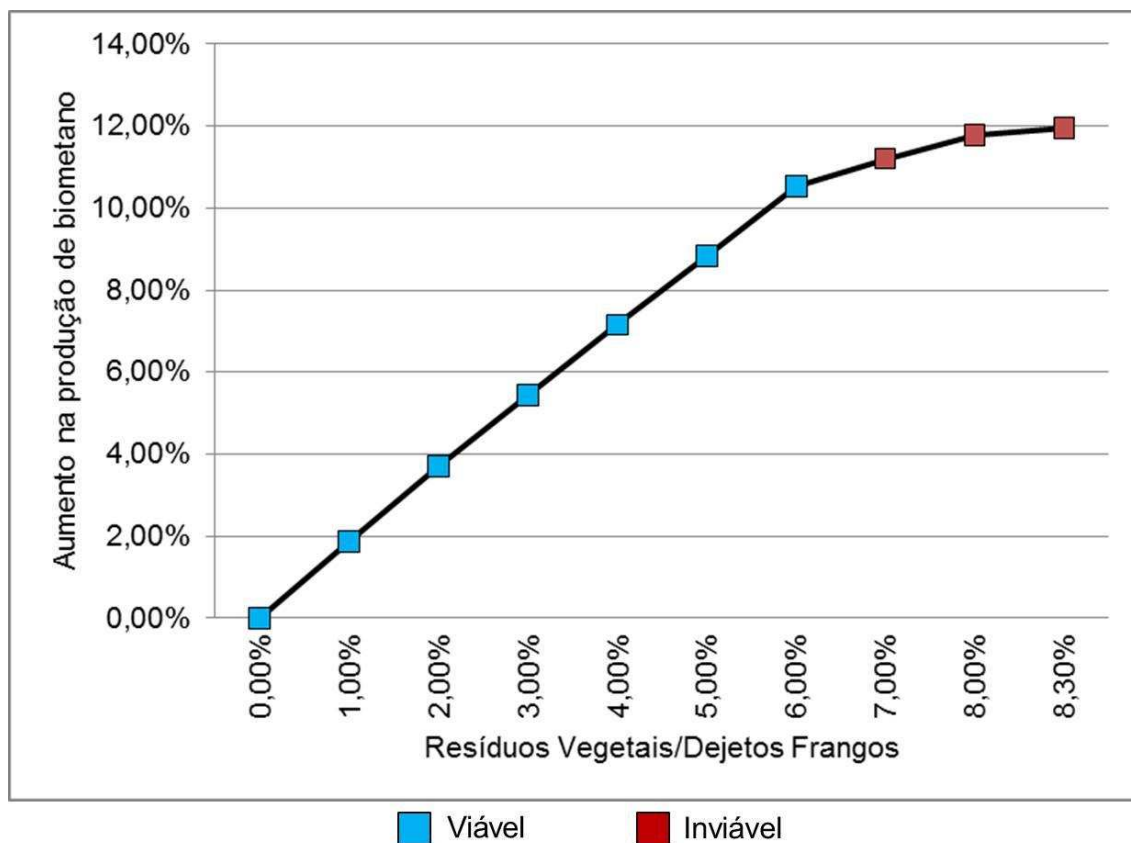


Figura 7.76 – Aumento na produção de biometano com a codigestão.

O aumento percentual da produção de biometano com a codigestão no condomínio de agroenergia Piraúba pode chegar a 11,95%. No entanto a codigestão só é viável para cenários com razões resíduos vegetais/dejetos frangos de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6%. Para as demais razões resíduos vegetais/dejetos frangos simuladas, todos os cenários são inviáveis economicamente.

### 7.3.6. CONDOMÍNIO SÃO MIGUEL DO ANTA

O município de São Miguel do Anta se localiza no centro-norte da região da Zona da Mata de Minas Gerais. Possui uma população de 6.750 habitantes distribuídos em uma área de 152,276 km<sup>2</sup>.

A Figura 7.77 mostra a localização do município de São Miguel do Anta na Zona da Mata de Minas Gerais.

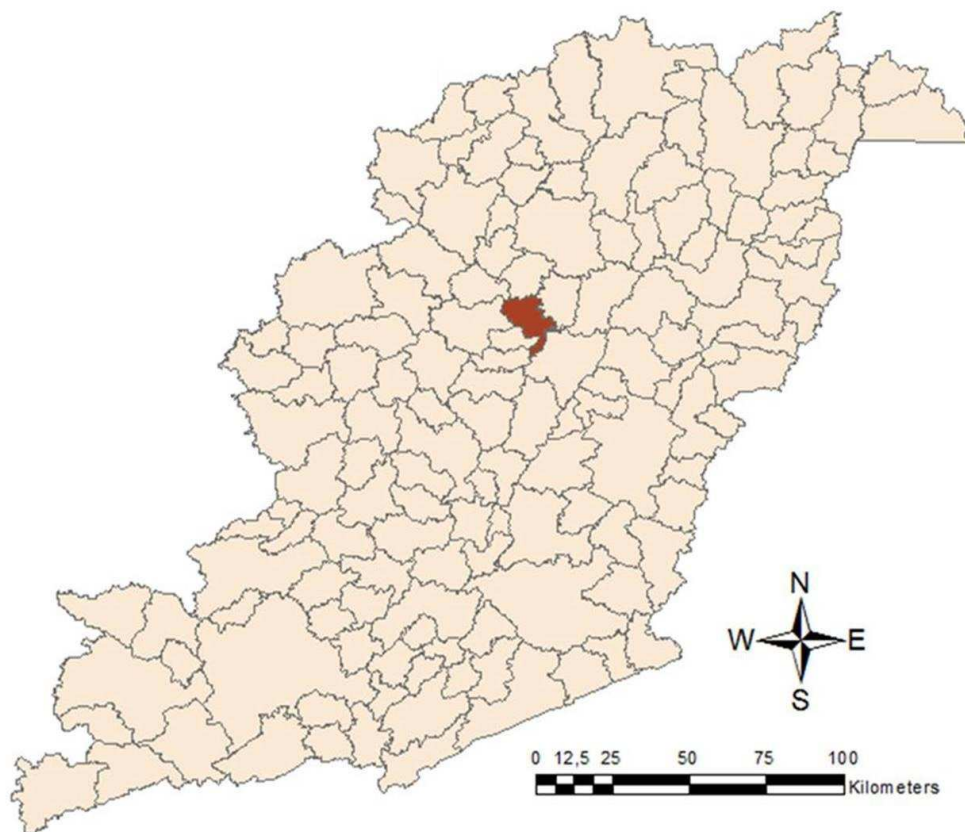


Figura 7.77 – Localização de São Miguel do Anta na Zona da Mata de Minas Gerais.

O Quadro 7.31 apresenta as granjas do município de São Miguel do Anta e suas respectivas quantidades de frangos e produção de dejetos.

Quadro 7.31 – Granjas e suas respectivas quantidades de frangos e produção de dejetos no município de São Miguel do Anta

Granja	Quantidade de frangos	Dejetos (t ano <sup>-1</sup> )
SM-1	59.400	739,17
SM-2	54.000	671,98
SM-3	49.000	609,76
SM-4	38.250	475,98
SM-5	32.340	402,44
SM-6	30.870	384,15
SM-7	30.000	373,32
SM-8	28.000	348,43
SM-9	27.900	347,19
SM-10	27.000	335,99
SM-11	26.100	324,79

SM-12	26.000	323,54
SM-13	25.200	313,59
SM-14	24.960	310,60
SM-15	24.360	303,14
SM-16	23.985	298,47
SM-17	23.653	294,34
SM-18	23.520	292,68
SM-19	23.500	292,43
SM-20	23.000	286,21
SM-21	23.000	286,21
SM-22	23.000	286,21
SM-23	22.770	283,35
SM-24	22.500	279,99
SM-25	21.600	268,79
SM-26	21.600	268,79
SM-27	21.000	261,32
SM-28	20.460	254,60
SM-29	20.072	249,78
SM-30	20.000	248,88
SM-31	20.000	248,88
SM-32	20.000	248,88
SM-33	20.000	248,88
SM-34	20.000	248,88
SM-35	19.200	238,92
SM-36	19.125	237,99
SM-37	19.000	236,44
SM-38	18.000	223,99
SM-39	18.000	223,99
SM-40	17.550	218,39
SM-41	17.000	211,55
SM-42	17.000	211,55
SM-43	17.000	211,55
SM-44	16.200	201,59
SM-45	15.770	196,24
SM-46	15.750	195,99
SM-47	14.000	174,22
SM-48	13.728	170,83
SM-49	12.000	149,33
SM-50	9.906	123,27
SM-51	9.500	118,22

Total

1.185.769

14.755,71

Fonte: (IMA, 2013b).

A Figura 7.78 apresenta a localização das granjas no município de São Miguel do Anta.

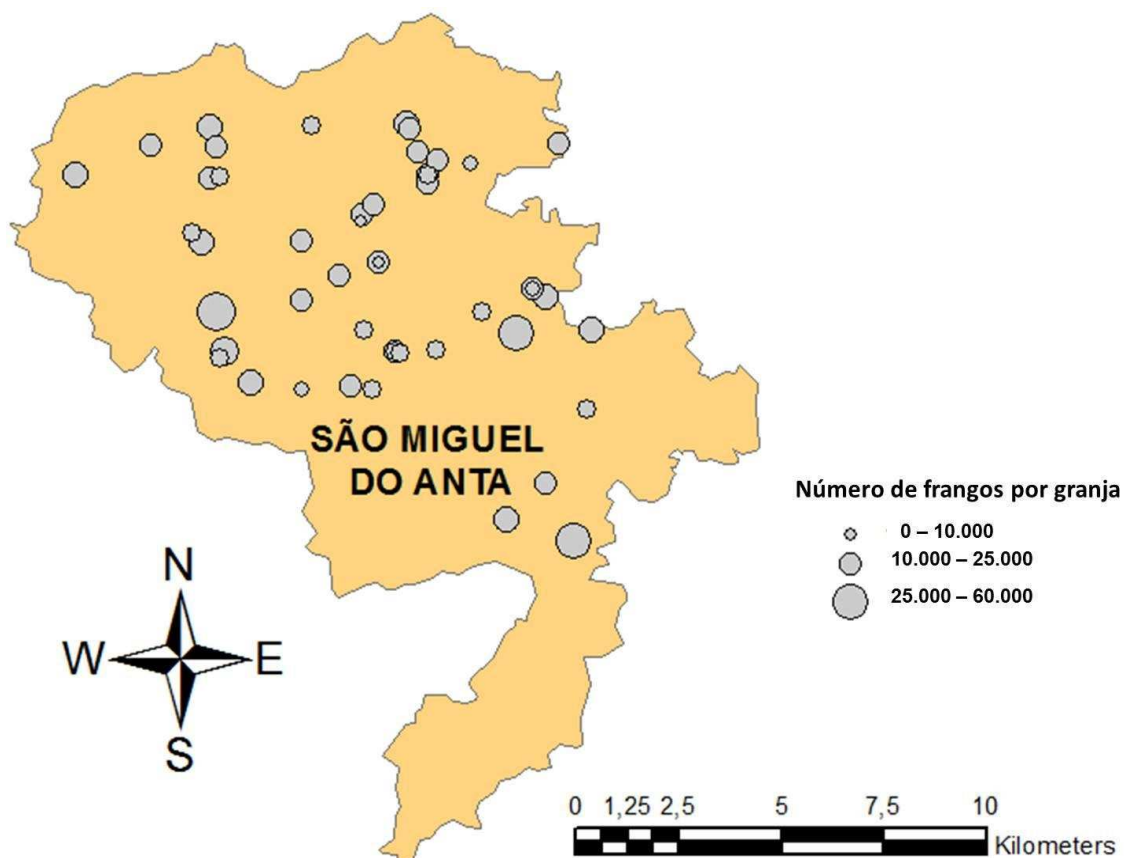


Figura 7.78 – Localização das granjas de frangos no município de São Miguel do Anta.

O Quadro 7.32 apresenta a massa de resíduos vegetais disponível no município de São Miguel do Anta.

Quadro 7.32 – Resíduos de cultivos vegetais disponíveis no município de São Miguel do Anta

Município	café (t ano <sup>-1</sup> )	feijão (t ano <sup>-1</sup> )	milho (t ano <sup>-1</sup> )	bagaço de cana (t ano <sup>-1</sup> )	palha de cana (t ano <sup>-1</sup> )
S. Miguel Anta	680,40	1.156,05	532,50	100,80	147,00

A Figura 7.79 apresenta a produção de biometano por substrato, considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos suínos para o Condomínio de Agroenergia de São Miguel do Anta.

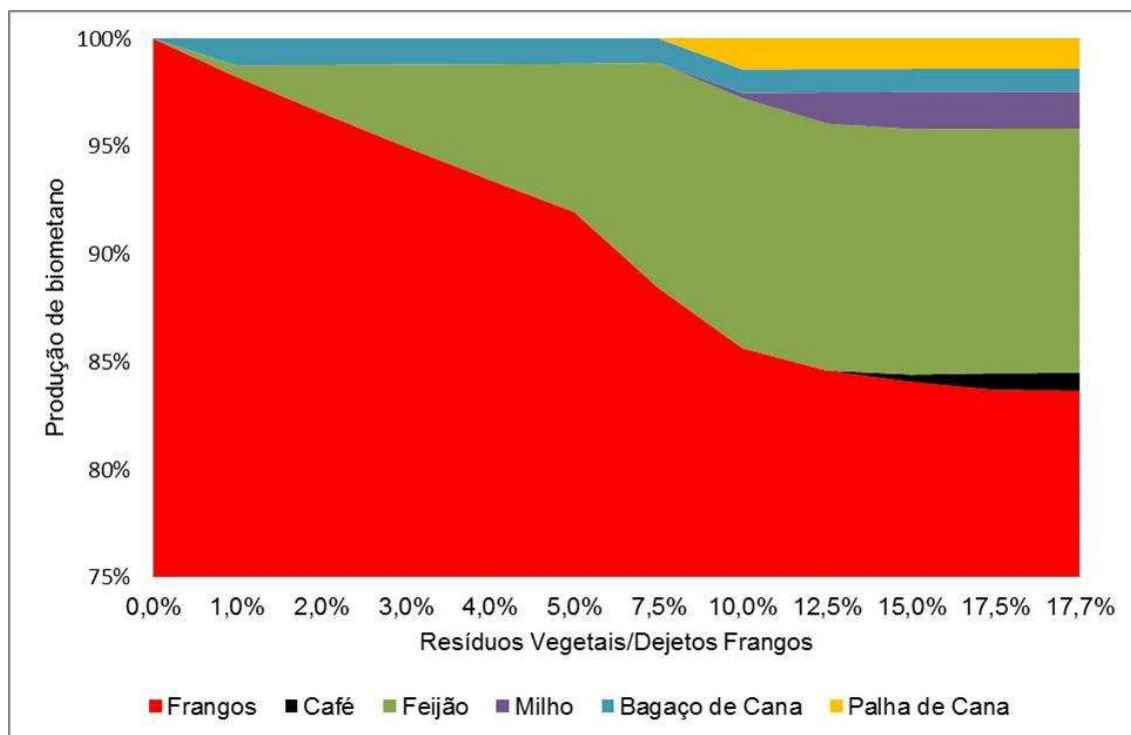


Figura 7.79 – Produção de biometano por substrato.

A massa de resíduos vegetais disponível no condomínio de São Miguel do Anta corresponde a 17,70% da massa de dejetos de frangos. Dada a disponibilidade de resíduos vegetais, a contribuição máxima dos mesmos é de 16,34% da produção de biometano.

A Figura 7.80 apresenta a produção de biometano e a respectiva potência elétrica gerada.

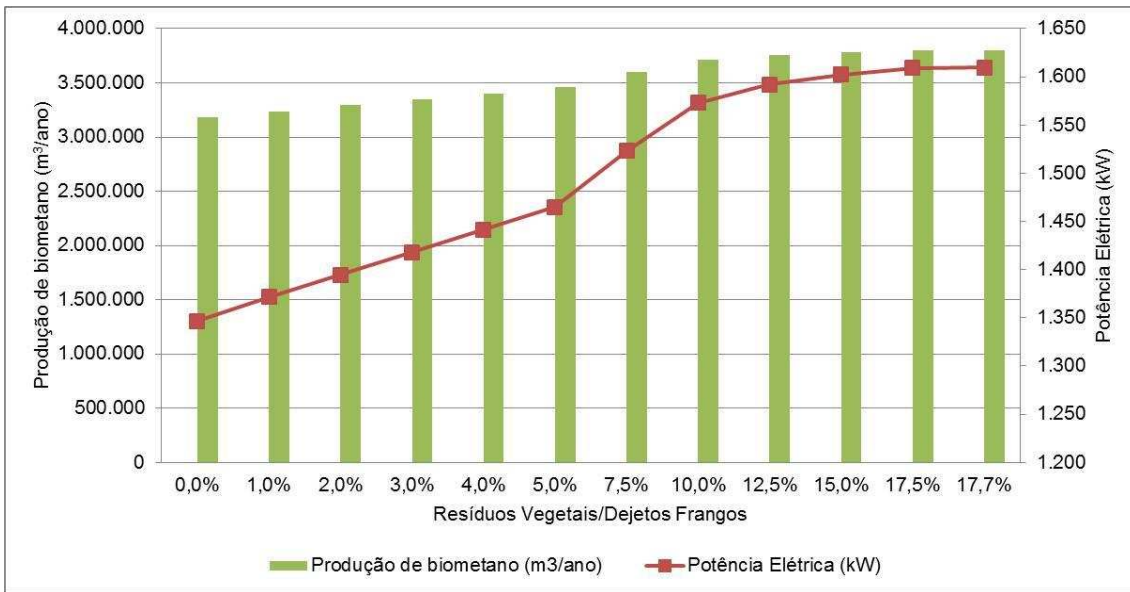


Figura 7.80 – Produção de biometano e potência elétrica.

A produção de biometano a partir dos resíduos agropecuários disponíveis chega a 3.801.042 m<sup>3</sup>/ano e a potência elétrica disponível é de 1,61 MW.

A Figura 7.81 apresenta a energia elétrica produzida considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos suínos para o Condomínio de Agroenergia de São Miguel do Anta.

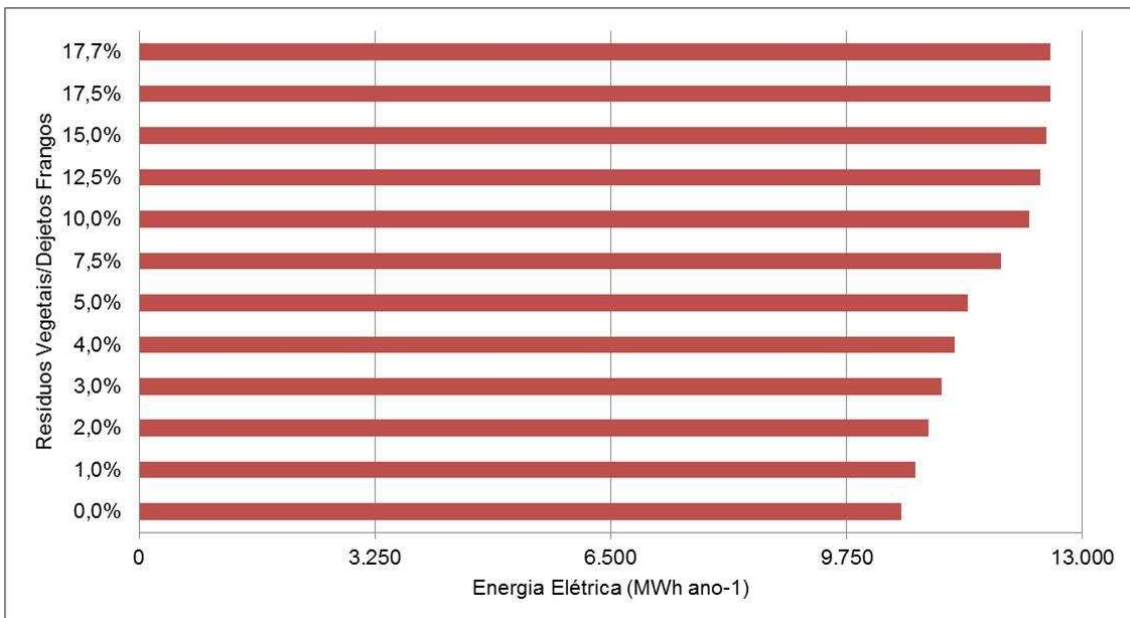


Figura 7.81 – Energia elétrica produzida.

O consumo total de energia elétrica no município de São Miguel do Anta no ano de 2012 foi de 4.503,43 MWh (CEMIG, 2013). A eletricidade gerada com o biometano obtido de dejetos de frangos e resíduos vegetais possibilitaria atender a demanda ocorrendo um excedente de 8.053,03 MWh.

## PRODUÇÃO DE BIOFERTILIZANTE

A Figura 7.82 apresenta a massa de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) contida no digestato dos resíduos agropecuários no Condomínio de Agroenergia de São Miguel do Anta.

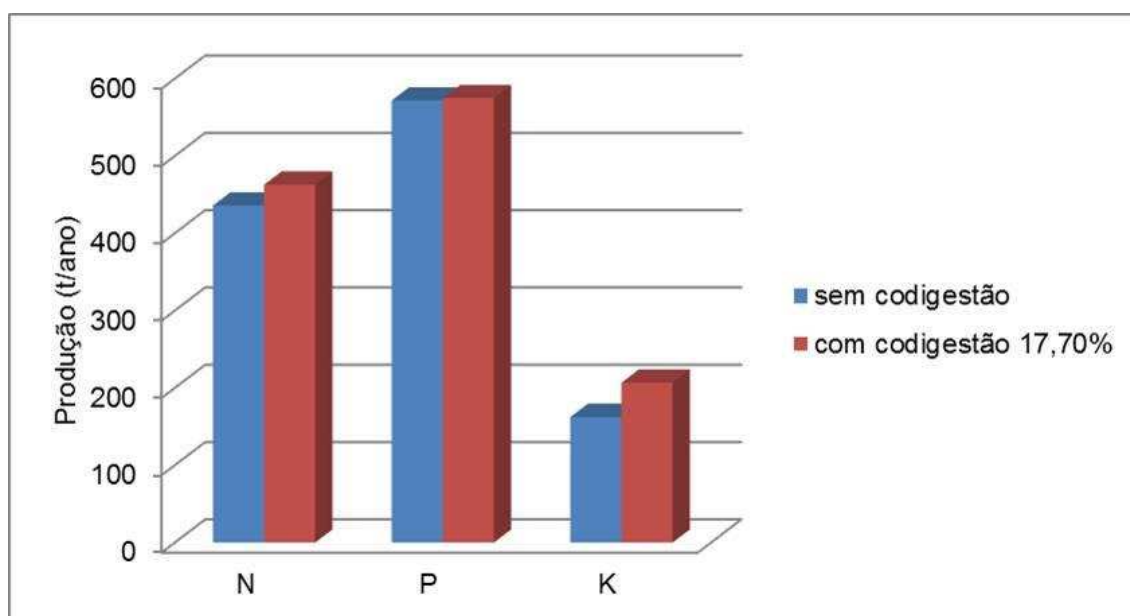


Figura 7.82 – Produção de biofertilizante no Condomínio de Agroenergia de São Miguel do Anta.

O aumento na produção de Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) com a codigestão dos dejetos de suínos e resíduos vegetais é de 6,17%, 0,49% e 27,28%, respectivamente.

O Quadro 7.33 apresenta a intensidade de uso de fertilizantes das culturas do café, feijão, milho e cana-de-açúcar no município de São Miguel do Anta.

Quadro 7.33 – Intensidade de uso fertilizantes por culturas no município de São Miguel do Anta.

Cultura	Consumo (t.ha <sup>-1</sup> )	Área Plantada (ha)	Massa utilizada (t)
Café	0,54	1.400	756,00
Feijão	0,15	1.100	165,00
Milho	0,31	1.250	387,50
Cana-de-açúcar	0,46	50	23,00

Fonte: (DONZELLI, 2005)

## MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

A Figura 7.83 apresenta o potencial de toneladas de dióxido de carbono que podem ser mitigadas com a geração de energia elétrica a partir da codigestão dos resíduos agropecuários no Condomínio de Agroenergia de São Miguel do Anta.

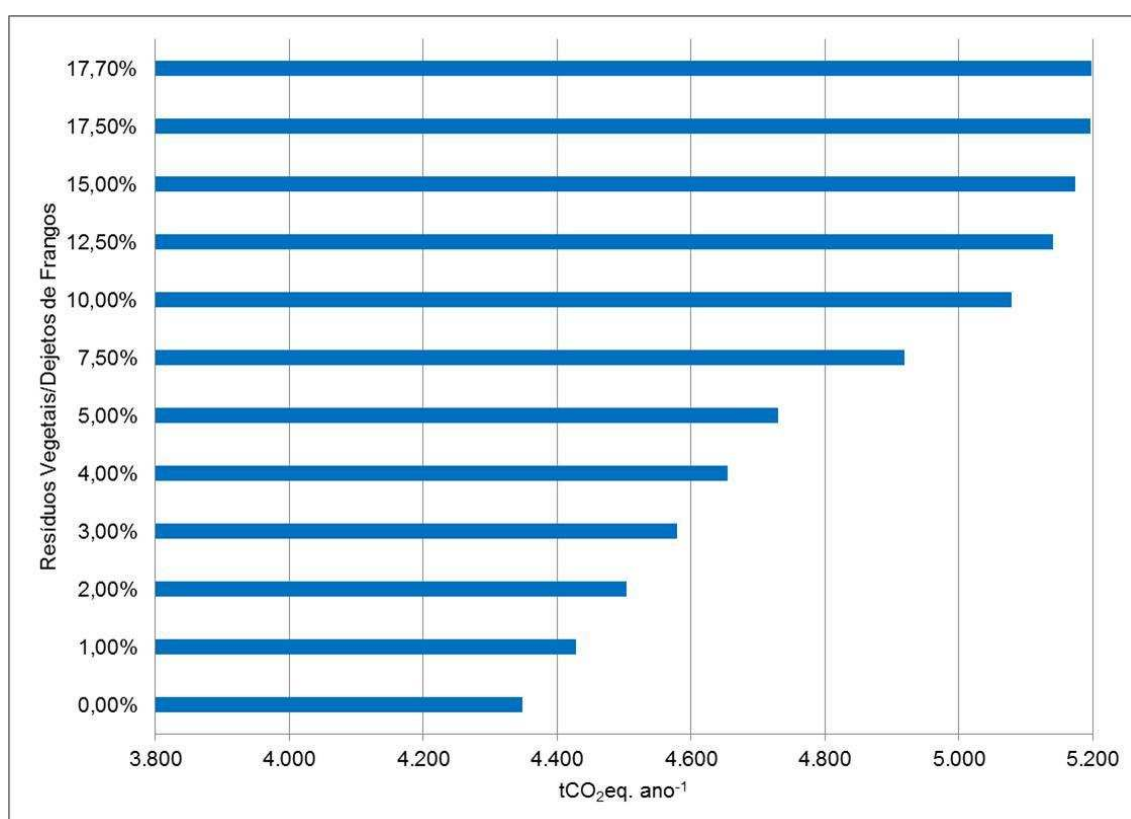


Figura 7.83 – Potencial de mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>.

Considerando-se que a intensidade de emissão média de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>eq.) da carne de frango é de 5,4 kg de CO<sub>2</sub>eq./Kg de carcaça, sendo a produção de ração para os animais e a gestão dos dejetos respondendo pela maior parte das emissões (MACLEOD, *et al.*, 2013). O peso médio da carcaça

de frango produzida em Minas Gerais no ano de 2012 foi de 2,0 kg (MINAS GERAIS, 2015b). Tem-se que a emissão de CO<sub>2</sub>eq. para a produção de suínos no condomínio de Leopoldina é de 78.118,5 tCO<sub>2</sub>eq./ano. A geração de eletricidade a partir dos resíduos agropecuários é capaz de compensar 6,65% do total de emissões. É importante observar que essa mitigação diz respeito apenas ao aproveitamento energético dos resíduos. A cadeia produtiva da avicultura é formada por outros elos emissores de dióxido de carbono.

## TRANSPORTE DE BIOMETANO E DE RESÍDUOS

### GASODUTO/RESIDUODUTO

O comprimento total do duto para conectar as 51 granjas de suínos do Condomínio São Miguel do Anta é de 55.945 metros. O Quadro 7.34 apresenta o comprimento de cada um dos dutos dimensionados para o Condomínio de Agroenergia de São Miguel do Anta.

Quadro 7.34 – Comprimento dos dutos dimensionados para o Condomínio de Agroenergia de São Miguel do Anta

Duto	Comprimento (m)
1	1.149
2	1.498
3	1.393
4	1.353
5	622
6	1.148
7	1.077
8	1.719
9	1.387
10	1.172
11	403
12	2.738
13	3.258
14	2.469
15	1.258
16	2.197

17	969
18	2.074
19	1.398
20	1.279
21	1.514
22	1.938
23	480
24	2.340
25	532
26	676
27	805
28	1.194
29	3.051
30	2.483
31	2.397
32	1.593
33	1.669
34	1.500
35	312
36	2.899
Total	55.945

---

A Figura 7.84 apresenta a rotas traçada pelos dutos no território do município de São Miguel do Anta.

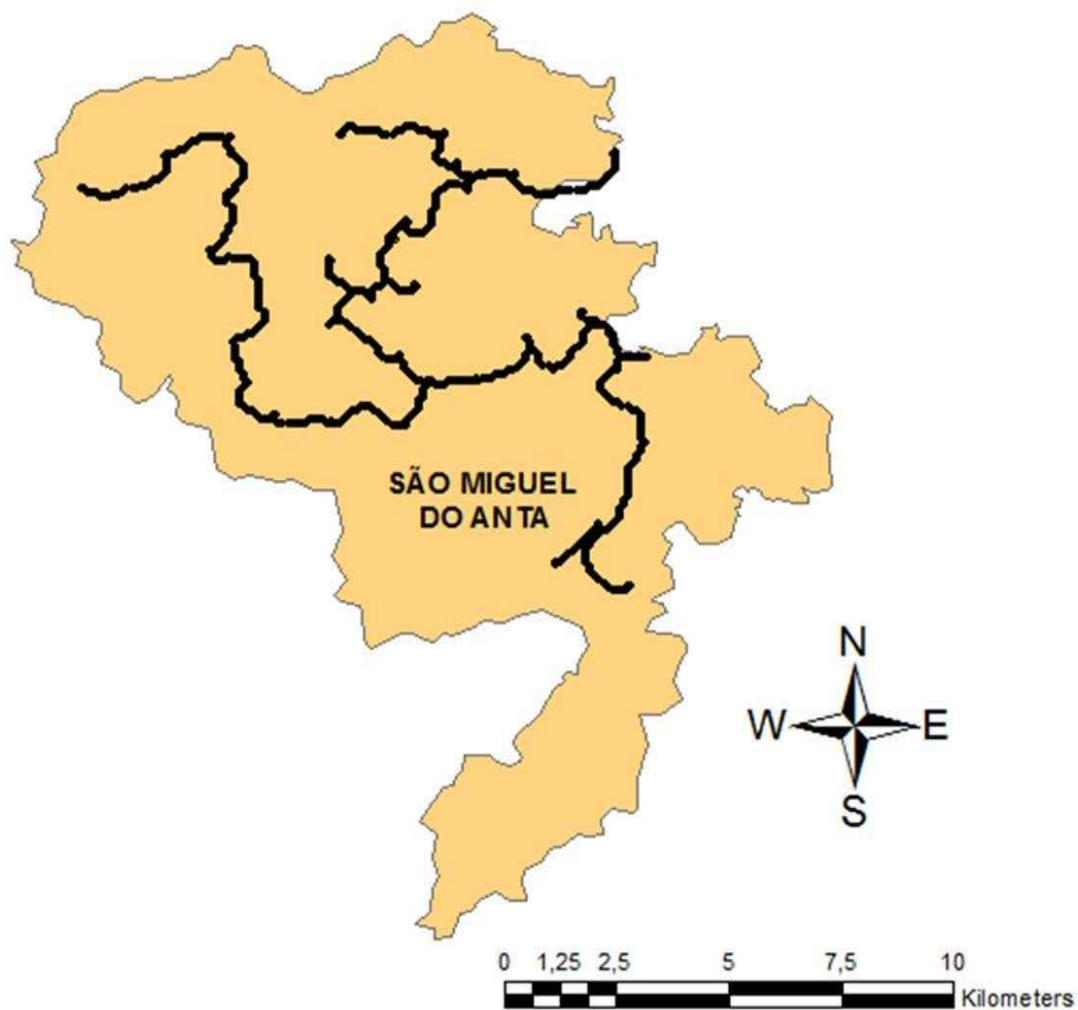


Figura 7.84 – Traçado dos dutos no município de São Miguel do Anta.

## ESTRADAS

O comprimento das rotas de transporte dos resíduos suínos por estradas (desde as granjas até a central de geração de energia) no município de São Miguel do Anta são mostrados no Quadro 7.35.

Quadro 7.35 – Comprimento das rotas de transporte dos resíduos de frangos por estradas

Rota	Distância (km)
1	1,3
2	2,8
3	4,6
4	7,6

5	8,2
6	7,3
7	8,3
8	6,3
9	3
10	3,8
11	4,5
12	4,9
13	5,5
14	7,6
15	7,8
16	8,7
17	11,4
18	7,7
19	8,6
20	8,1
21	5,3
22	7,5
23	10,2
24	10,6
25	9,1
26	8,8
27	13
28	12,1
29	12,1
30	13,2
31	12,7
32	11,6
33	9,8
34	9,4
35	8,7
36	8,6
37	8,7
Total	299,4

---

## ANÁLISE ECONÔMICA

A Figura 7.85 apresenta os custos de produção de energia elétrica considerando: (i) transporte do biometano por gasoduto; (ii) o transporte dos resíduos por residuoduto; e (iii) o transporte dos resíduos por estradas comparados com o valor pago nos leilões de eletricidade da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e os preços de comercialização da energia praticados pelas concessionárias da região.

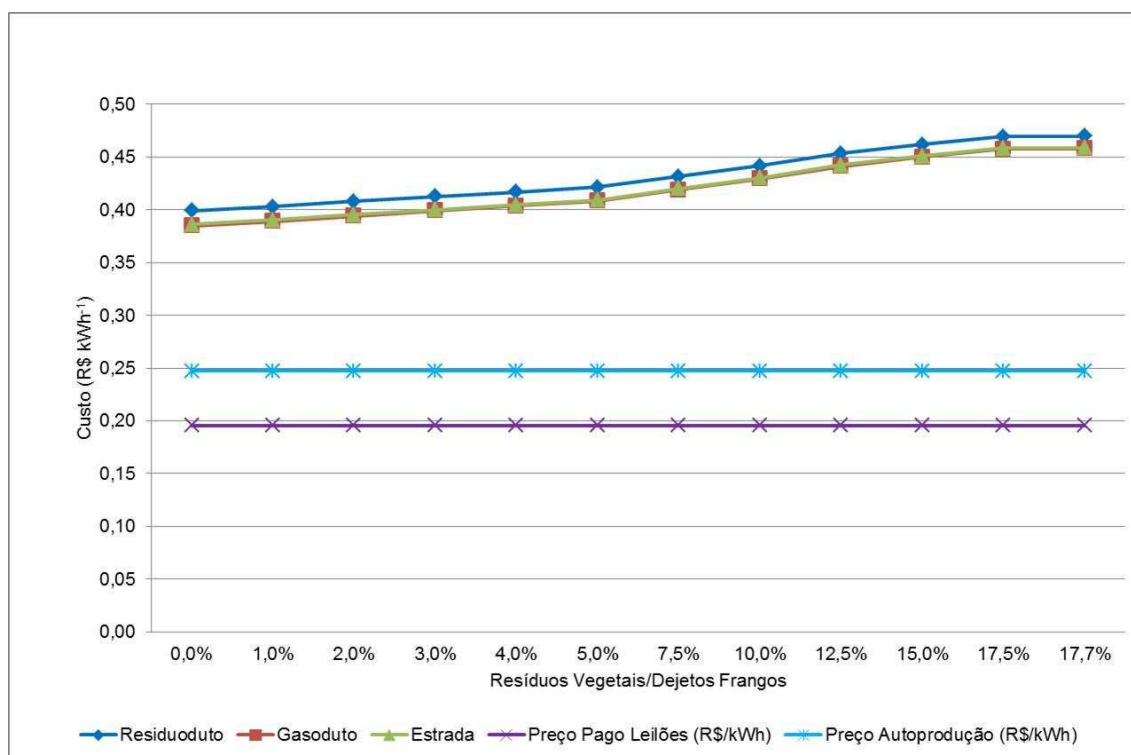


Figura 7.85 – Custo de produção de energia elétrica para diferentes modais de transporte no Condomínio de Agroenergia de São Miguel do Anta.

O custo de produção de energia elétrica com a codigestão aumenta de acordo com a adição de resíduos vegetais no substrato. O preço pago pela energia gerada a partir do biometano de resíduos agropecuários nos leilões e os praticados pelas concessionárias na região são menores que os custos de produção dos três modais de transporte (residuoduto, gasoduto e estrada). O custo de produção com o transporte do biometano por meio de gasoduto é ligeiramente menor que o custo de transporte de dejetos de frangos por estradas. O custo de produção de energia com o transporte dos dejetos de frangos por dutos é maior que os demais modais.

## VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)

A Figura 7.86 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 1 a 8 em que ocorre o aproveitamento apenas de dejetos de frangos (sem codigestão).

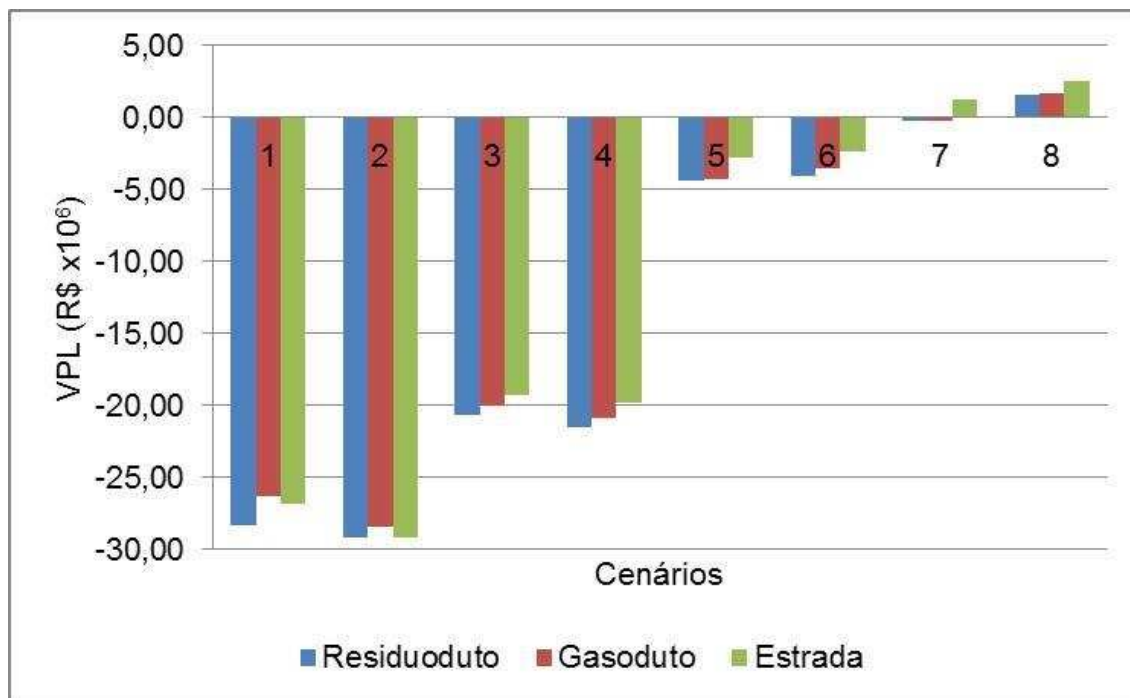


Figura 7.86 – VPL para os cenários sem codigestão.

Para os cenários 1, 2, 3, 4 em que se comercializa apenas a energia elétrica gerada a partir do biometano a valores dos leilões de energia e da tarifa das concessionárias, com financiamento dos empreendimentos com recursos próprios e por meio de empréstimos não há viabilidade econômica, ou seja,  $VPL < 0$ .

Os cenários 5 e 6 em que ocorre a comercialização da energia elétrica gerada a partir do biometano a valores dos leilões de energia e do biofertilizante, também não são viáveis economicamente.

O cenário 7 é viável apenas para o transporte dos dejetos de frangos por estradas. O biofertilizante responde por 46,67%.

O cenário 8 apresenta viabilidade econômica para os três modais. Neste cenário o biofertilizante responde por 40,93%

A Figura 7.87 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 1,0%.

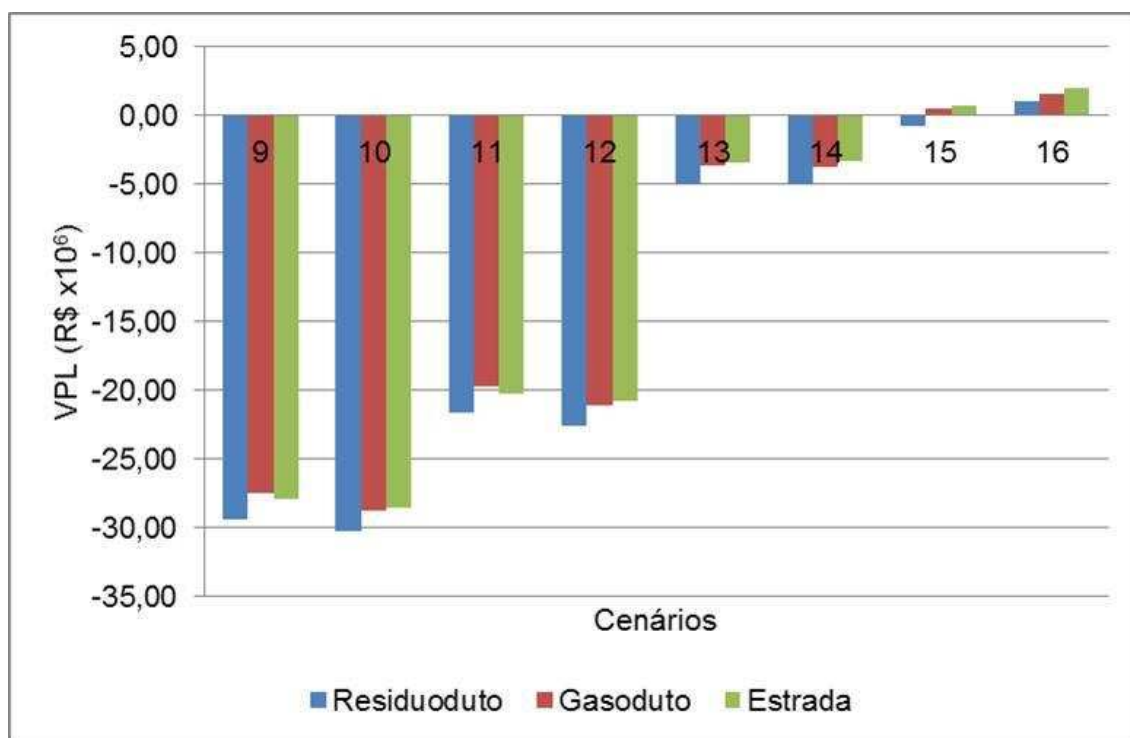


Figura 7.87 – VPL para os cenários de codigestão com 1,0% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos frangos igual a 1% implica na utilização de uma massa total igual a 147,80 t ano<sup>-1</sup> de resíduos dos cultivos agrícolas de café, feijão, milho e cana-de-açúcar.

O cenário 15 apresenta viabilidade econômica somente para o transporte dos dejetos de frangos por estradas e do biometano por gasoduto. O cenário 16 apresenta viabilidade econômica para os três modais de transporte. Nestes cenários a comercialização da energia elétrica gerada responde por mais da metade da receita obtida pelo empreendimento. Isso se deve à maior contribuição dos resíduos vegetais empregados na codigestão para a produção de biometano do que de biofertilizante. Os demais cenários são inviáveis economicamente.

A Figura 7.88 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 2,0%.

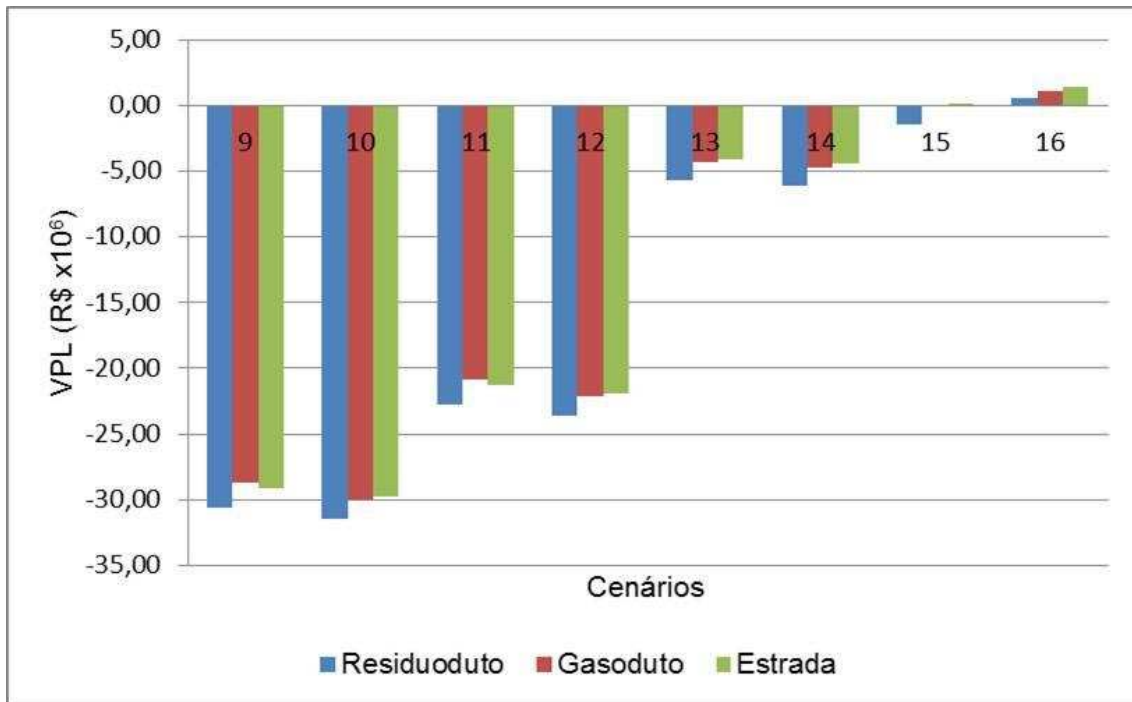


Figura 7.88 – VPL para os cenários de codigestão com 2,0% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos frangos igual a 2% implica na utilização de uma massa total igual a 295,60 t ano<sup>-1</sup> de resíduos dos cultivos agrícolas de café, feijão, milho e cana-de-açúcar.

O cenário 15 apresenta viabilidade econômica somente para o transporte dos dejetos de frangos por estradas e do biometano por gasoduto. O cenário 16 apresenta viabilidade econômica para os três modais de transporte. Nestes cenários a comercialização da energia elétrica gerada responde por mais da metade da receita obtida pelo empreendimento. Isso se deve à maior contribuição dos resíduos vegetais empregados na codigestão para a produção de biometano do que de biofertilizante. Os demais cenários são inviáveis economicamente.

A Figura 7.89 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos de frangos igual a 3,0%.

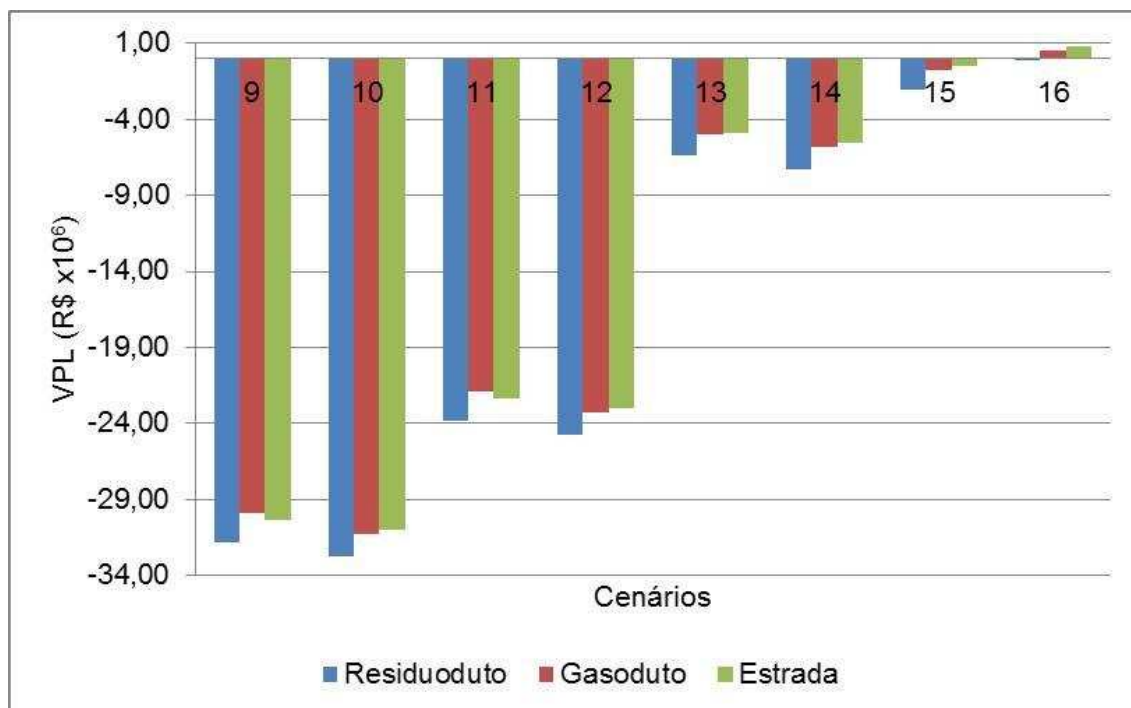


Figura 7.89 – VPL para os cenários de codigestão com 3,0% de razão resíduos vegetais/dejetos de frangos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos frangos igual a 3% implica na utilização de uma massa total igual a 443,40 t ano<sup>-1</sup> de resíduos dos cultivos agrícolas de café, feijão, milho e cana-de-açúcar.

O cenário 16 é o único que apresenta viabilidade econômica para o transporte de dejetos de frangos por estradas e de biometano por gasoduto. Nestes cenários a comercialização da energia elétrica gerada responde por mais da metade da receita obtida pelo empreendimento. Isso se deve à maior contribuição dos resíduos vegetais empregados na codigestão para a produção de biometano do que de biofertilizante. Os demais cenários são inviáveis economicamente.

A Figura 7.90 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 4,0%.

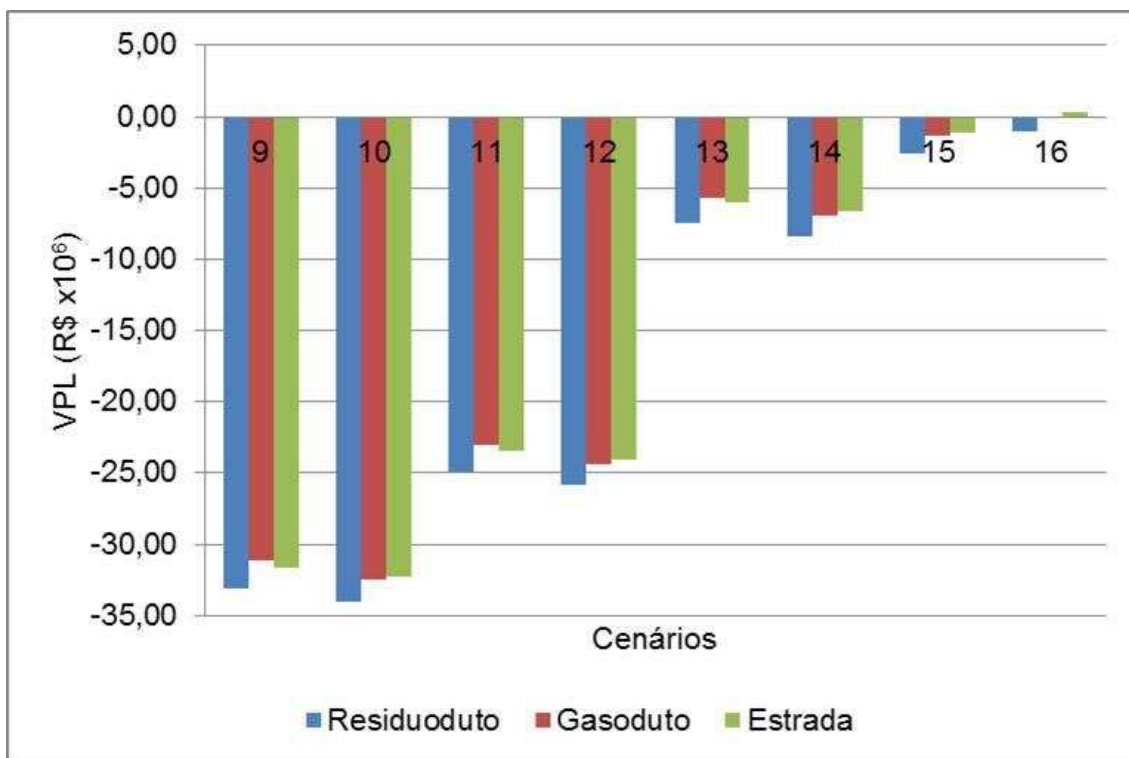


Figura 7.90 – VPL para os cenários de codigestão com 4,0% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos frangos igual a 4% implica na utilização de uma massa total igual a 591,20 t ano<sup>-1</sup> de resíduos dos cultivos agrícolas de café, feijão, milho e cana-de-açúcar.

O cenário 16 é o único que apresenta viabilidade econômica somente para o transporte de dejetos de frangos por estradas. Neste cenário a comercialização da energia elétrica gerada responde por mais da metade da receita obtida pelo empreendimento. Isso se deve à maior contribuição dos resíduos vegetais empregados na codigestão para a produção de biometano do que de biofertilizante. Os demais cenários são inviáveis economicamente.

A Figura 7.91 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) para os cenários 9 a 16, codigestão com razão resíduos vegetais/dejetos suínos igual a 5,0%.

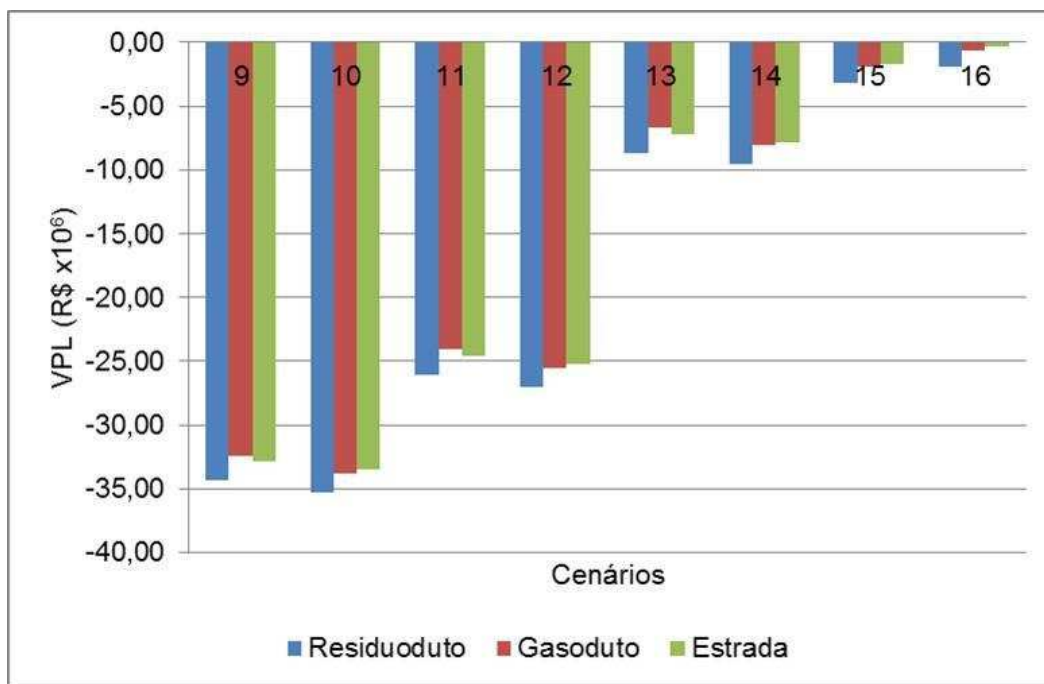


Figura 7.91 – VPL para os cenários de codigestão com 5,0% de razão resíduos vegetais/dejetos suínos.

A codigestão com razão de resíduos vegetais/dejetos frangos igual a 5% não apresenta viabilidade econômica em nenhum dos cenários simulados.

A Figura 7.92 apresenta o aumento na produção de biometano com a codigestão considerando diferentes razões resíduos vegetais/dejetos suínos para o Condomínio de Agroenergia de São Miguel do Anta.

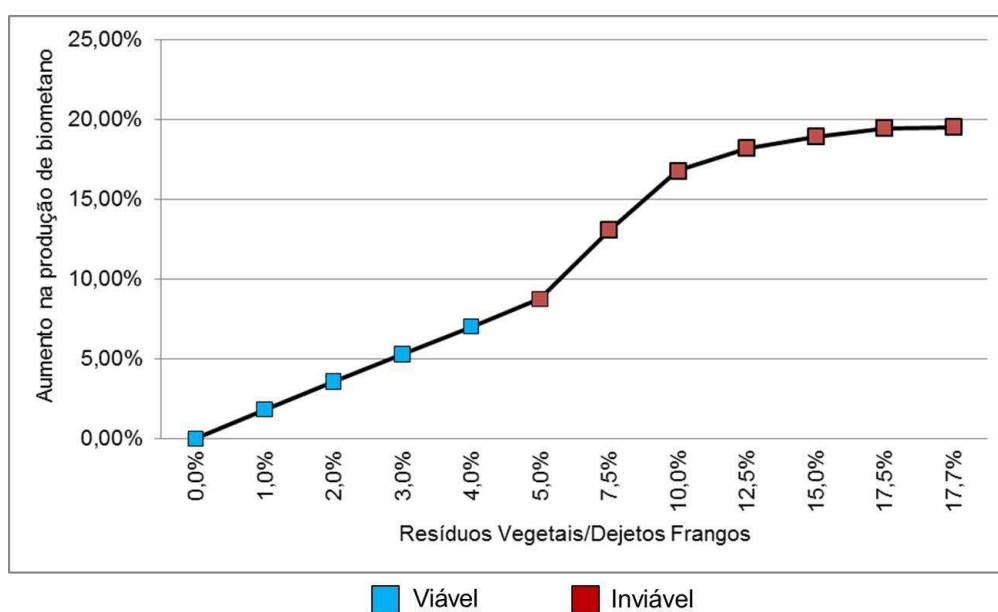


Figura 7.92 – Aumento na produção de biometano com a codigestão.

O aumento percentual da produção de biometano com a codigestão no condomínio de agroenergia Leopoldina pode chegar a 19,53%. No entanto a codigestão só é viável para cenários com razões resíduos vegetais/dejetos frangos de 1%, 2%, 3% e 4%. Para as demais razões resíduos vegetais/dejetos frangos simuladas, todos os cenários são inviáveis economicamente.

## 7.4. CONCLUSÕES

O potencial de geração de eletricidade em todos os condomínios de suínos atendeu às demandas dos municípios para os quais foram simulados, havendo excedente de energia elétrica. No caso dos condomínios de frangos, o único que atendeu a demanda de eletricidade do município gerando excedente de energia elétrica foi o de grande porte (São Miguel do Anta). Os demais condomínios simulados atenderam a um percentual da demanda de eletricidade dos municípios onde foram instalados.

O aumento mais significativo na produção e biofertilizante com a codigestão é do nutriente potássio ( $K_2O$ ), devido aos resíduos de café utilizados na codigestão.

Em relação à análise econômica dos empreendimentos, observou-se o papel fundamental da comercialização do biofertilizante para viabilizar os empreendimentos. No que diz respeito à codigestão a mesma se mostrou viável apenas para os cenários em que foram comercializados a energia elétrica nos valores das tarifas praticadas pelas concessionárias e o biofertilizante.

Considerando-se os cenários viáveis as potências máximas obtidas nos condomínios de agroenergia de suínos foram: (i) Faria Lemos: 392 kW; (ii) Piranga: 964 kW; e (iii) Jequeri: 4.455 kW.

As potências máximas estimadas para os condomínios de agroenergia de frangos foram: (i) Leopoldina: 130 kW; (ii) Piraúba: 369 kW; e (iii) São Miguel do Anta: 1.441 kW.

É fundamental que sejam desenvolvidos mecanismos de incentivo para o aproveitamento energético dos resíduos agropecuários para tornar esses empreendimentos economicamente viáveis.

## 7.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEST, G. (2003). Agroenergy: A New function in Agriculture, LAMNET-NEWS 3rd Issue.

BLEY JÚNIOR, C., LIBÂNIO, J. C., GALINKIN, M., OLIVEIRA, M. M. (2009). Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais. Foz de Iguaçu/Brasília: Itaipu Binacional/FAO, Techno Politik Editora, 2ª edição, revisada.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais, 2013.

DONZELLI, J. L. Uso de Feilizantes. In: MACEDO, I. C. (2005). A Energia da Cana-de-Açúcar – Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade. São Paulo: Berlendis & Vertecchia.

EEG, 2014 – Lei Alemã de Energias Renováveis. Disponível em: [https://www.clearingstelle-eeg.de/files/EEG\\_2014\\_141222.pdf](https://www.clearingstelle-eeg.de/files/EEG_2014_141222.pdf). (Consulta em: 04/2015).

FLEMING, R., FORD, M. (2001). Humans versus Animals - Comparison of Waste Properties. Disponível em: [http://www.ridgetownc.uoguelph.ca/research/documents/fleming\\_huvsanim0107.PDF](http://www.ridgetownc.uoguelph.ca/research/documents/fleming_huvsanim0107.PDF). (Consulta em: 04/2015).

IBGE, (2014). Pesquisa Agrícola Municipal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pam/default.asp?o=28&i=P>, (Consulta em: 09/2014).

IMA - Instituto Mineiro de Agropecuária (IMA), Cadastro de Suinocultores 2013a.

IMA - Instituto Mineiro de Agropecuária (IMA), Cadastro de Suinocultores 2013b.

MACLEOD, M., GERBER, P., MOTTET, A., TEMPIO, G., FALCUCCI, A., OPIO, C., VELLINGA, T., HENDERSON, B., STEINFELD, H. (2013). Greenhouse gas emissions from pig and chicken supply chains – A global life cycle assessment. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.

MANGOYANA, R. B., SMITH, T. F. (2011). Decentralised bioenergy systems: A review of opportunities and threats, *Energy Policy*, Vol 39 (3): 1286-1295.

MINAS GERAIS, Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Relatórios da Pecuária: Suinocultura 2015. Disponível em: [http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq\\_Relatorios/Pecuaria/2015/abr/suinocultura\\_abr\\_2015.pdf](http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq_Relatorios/Pecuaria/2015/abr/suinocultura_abr_2015.pdf). (Consulta em: 05/2015a).

MINAS GERAIS, Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Relatórios da Pecuária: Avicultura de Corte 2015. Disponível em: [http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq\\_Relatorios/Pecuaria/2015/mar/avicultura\\_corte\\_mar\\_2015.pdf](http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq_Relatorios/Pecuaria/2015/mar/avicultura_corte_mar_2015.pdf). (Consulta em: 05/2015b).

RAVEN, R.P.J.M., GREGERSEN, K.H. (2007). Biogas plants in Denmark: successes and setbacks, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 11 (1): 116-132.

## **CAPÍTULO 8**

### **CONCLUSÃO GERAL**

## **8.1. CONCLUSÕES**

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de apresentar soluções energéticas para as cadeias produtivas de frango de corte e da suinocultura da Zona da Mata de Minas Gerais. Com vistas a alcançar esse objetivo realizou-se: (i) avaliação do estado da arte da codigestão anaeróbia de dejetos animais e resíduos agroindustriais; (ii) avaliação do estado da arte das políticas públicas de incentivo à geração de energia a partir do biogás/biometano; (iii) desenvolvimento de ferramenta computacional para estimar o potencial de produção de biometano e a viabilidade de empreendimentos de geração de energia; (iv) avaliação da inserção do biometano na matriz energética da região de estudo; (v) avaliação da viabilidade da produção de energia a partir do biometano em granjas de frangos de corte e suínos; e (vi) avaliação da viabilidade da produção de energia a partir do biometano em condomínios de agroenergia.

### **8.1.1. ESTADO DA ARTE DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA E DE POLÍTICAS PÚBLICAS PARA O BIOGÁS/BIOMETANO**

A codigestão anaeróbia de dejetos de animais e resíduos agropecuários e agroindustriais se apresenta como uma alternativa para o aproveitamento energético desses resíduos. A proporção da mistura dos co-substratos deve ser estudada para se alcançar uma maior produção de biogás/biometano. As políticas públicas são fundamentais para a promoção do biogás/biometano. Países que desenvolveram programas com metas claras e objetivas e mecanismos eficientes de incentivo estão aumentando a participação dessa fonte de energia renovável em sua matriz energética com resultados positivos do ponto-de-vista ambiental, econômico e social.

### **8.1.2. FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOMETANO A PARTIR DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS**

A ferramenta SAUDADE se apresentou como uma alternativa para avaliar o potencial de geração de biometano por meio da codigestão anaeróbia de quaisquer resíduos agropecuários. A ferramenta relaciona banco de dados da produção agropecuária, geração de resíduos com sistema de informações geográficas (SIG),

podendo ser aplicada para uma determinada região e utilizada no auxílio à tomada de decisões de investimento.

### **8.1.3. INSERÇÃO DA ENERGIA DO BIOMETANO NA MATRIZ ENERGÉTICA DA ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS**

Verificou-se que o biometano produzido a partir dos resíduos agropecuários atende a toda a demanda de combustíveis (fósseis e renováveis) do setor agropecuário da região, gerando um excedente de energia que pode ser aproveitado em outros setores produtivos, como a indústria. A codigestão anaeróbia aumentou substancialmente o potencial de geração de eletricidade. A inserção da eletricidade gerada pode evitar a construção de novas pequenas centrais hidrelétricas evitando assim impactos ambientais e sociais. O aumento da oferta de eletricidade pode representar a melhoria de qualidade de vida das pessoas contribuindo para a elevação do índice de desenvolvimento humano regional. A produção, transmissão e distribuição de eletricidade podem representar uma redução na evasão de divisas econômicas, uma vez que a energia pode ser produzida e consumida *in loco* não sendo exportada a outras regiões.

### **8.1.4. POTENCIAL ENERGÉTICO DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA EM GRANJAS DE SUÍNOS E FRANGOS NA ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS**

A codigestão de dejetos animais (suínos e frangos) com resíduos vegetais permite aumentar substancialmente o potencial de produção de biometano e energia em granjas de suínos e frangos. Observou-se que esse potencial está diretamente relacionado à disponibilidade de resíduos agropecuários e seu poder metanogênico (relacionado ao bagaço de cana, resíduos de feijão e palha de cana). O biofertilizante contribuiu para viabilizar economicamente alguns cenários simulados. Apesar do aumento da produção de biometano e energia elétrica, a codigestão não foi viável economicamente para a grande maioria dos cenários simulados o que indica a necessidade de mecanismos de incentivo para essa fonte de energia renovável.

### **8.1.5. CONDOMÍNIOS DE AGROENERGIA NA ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS**

Observou-se que para todos os condomínios de agroenergia simulados em municípios com destacada atividade suinícola, a produção de eletricidade atendeu às demandas dos municípios havendo excedente de energia. No caso dos condomínios simulados em que a atividade avícola se destacada apenas um condomínio (São Miguel do Anta) atendeu plenamente a demanda de eletricidade do município. O que demonstra a possibilidade do uso dos resíduos agropecuários para a promoção do desenvolvimento sustentável e independência energética a nível municipal. O potencial de geração de energia infelizmente não se traduziu na viabilidade econômica dos empreendimentos no atual cenário das políticas públicas praticadas.

## 8.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apresentam-se a seguir sugestões para trabalhos futuros:

- (i) Comparar do ponto-de-vista técnico e econômico diferentes metodologias de aproveitamento energético de resíduos agropecuários, por exemplo: biodigestão, codigestão, pirólise, gaseificação, etc;
- (ii) Realizar a análise econômica considerando cenários em que o preço pago pela energia gerada com o biometano de resíduos agropecuários permita a viabilidade dos empreendimentos;
- (iii) Realizar experimentos de codigestão em biodigestores de bancada (laboratório) para determinar o poder metanogênico dos resíduos agropecuários disponíveis em uma determinada região, bem como a produção de biometano para diferentes porcentagens de misturas de resíduos;
- (iv) Desenvolver a ferramenta computacional SAUDADE para estações móveis como smartphones e tablets;
- (v) Avaliar a influência do controle de temperatura e agitação do substrato dentro do digestor na maximização da produção de biometano;
- (vi) Realizar o dimensionamento dos biodigestores considerando a codigestão e a adição de substratos;

## **BIBLIOGRAFIA GERAL**

## 9. BIBLIOGRAFIA GERAL

ABIPECS – Associação Brasileira das Indústrias Produtoras e Exportadoras de Carne Suína. Carne Suína Brasileira em 2011. Disponível em: [www.abipecs.org.br](http://www.abipecs.org.br), (Consulta em: 09/2012).

ABIPECS – Associação Brasileira das Indústrias Produtoras e Exportadoras de Carne Suína. Relatório ABIPECS 2012. Disponível em: <http://www.abipecs.org.br/pt/relatorios.html>, (Consulta em: 05/2015).

ABOUELENIEN, F., NAMBA, Y., KOSSEVA, M. R., NISHIO, N., NAKASHIMADA, Y. (2014). Enhancement of methane production from co-digestion of chicken manure with agricultural wastes, *Bioresource Technology*, Vol 159: 80-87.

AL SEADI, T. (2001). Good practice in quality management of AD residues from biogas production. Report made for the International Energy Agency, Task 24- Energy from Biological Conversion of Organic Waste. Published by IEA Bioenergy and AEA Technology Environment, Oxfordshire, United Kingdom.

ALBIERO, D. Utilização de energia na agricultura - Parte II. <http://www.diadecampo.com.br>. (Consulta em: 09/2012).

ÁLVAREZ, J.A., OTERO, L., LEMA, J.M. (2010). A methodology for optimising feed composition for anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes. *Bioresour. Technol.* Vol 101, 1153–1158.

ALVAREZ, R., LIDEN, G. (2008). Anaerobic co-digestion of aquatic flora and quinoa with manures from Bolivian Altiplano. *Waste Manage.* Vol 28, 1933–1940.

AMARAL, A.L., MORES, N. (2008). Planejamento da produção de suínos em lotes com vazão sanitário. *Acta Scientiae Veterinariae*. 36 (Supl 1): 143-154.

ANDA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. Principais indicadores do setor de fertilizantes. Disponível em: [http://www.anda.org.br/estatistica/Principais\\_Indicadores\\_2014.pdf](http://www.anda.org.br/estatistica/Principais_Indicadores_2014.pdf) Acesso em: Abr 2015.

ANDREWS, S. (2006). Crop Residue Removal for Biomass Energy Production: Effects on Soils and Recommendations. White Paper, published online. USDA Natural Resources Conservation Service.

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, Resumo Geral dos Novos Empreendimentos de Geração. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=37&idPerfil=2> (Consulta em: 03/2015).

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/GeracaoTipoFase.asp?tipo=5&ase=3&UF=MG:MINAS%20GERAIS> (Consulta em: 09/2014).

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa n° 482/2012. 21 p. 2011.

BEST, G. (2003). Agroenergy: A New function in Agriculture, LAMNET-NEWS 3rd Issue.

BIOGASPARTNER. (2014). Market Development - The Netherlands.

BLEY JÚNIOR, C., LIBÂNIO, J. C., GALINKIN, M., OLIVEIRA, M. M. (2009). Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais. Foz de Iguaçu/Brasília: Itaipu Binacional/FAO, Techno Politik Editora, 2ª edição, revisada.

BORGES NETO, M. R., CARVALHO, P. C. M. (2009). Planejamento energético rural assistido por computador. Eng. Agríc. Vol.29 (2): 172-184.

BRASIL, Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Balanço Energético Nacional 2014 – Ano base 2013 [www.epe.gov.br/](http://www.epe.gov.br/) (Consulta em: 04/2015).

BRASIL, MME (Ministério de Minas e Energia). 2014. Plano Decenal de Expansão de Energia 2023. MME, Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Brasília, DF, Brasil. 434 pp.

BRASIL. Câmara dos Deputados. Projetos de Lei e Outras Proposições. PL 6559/2013. Disponível em: <<http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/fichaDetramitacao?idProposicao=596099>>. (Consulta em: 06/2015).

BRAUN, R., WELLINGER, A. (2003). Potential of Co-digestion. IEA Task 37. <http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publi-task37/Potential%20of%20Codigestion%20short%20Brosch221203.pdf>. (Consulta em: 06/2015).

BUDZIANOWSKI, W. M. (2012). Sustainable biogas energy in Poland: Prospects and challenges, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 16 (1): 342-349.

BULKOWSKA, K., POKÓJ, T., KLIMIUK, E., GUSIATIN, Z.M. (2012). Optimization of anaerobic digestion of a mixture of Zea mays and Miscanthus sacchariflorus silages with various pig manure dosages, Bioresource Technology, Vol 125: 208-216.

CARVALHO, C. H. R. Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros. IPEA: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília, abril de 2011.

CAVALIERO, C. K. N., SILVA, E. P. (2005). Electricity generation: regulatory mechanisms to incentive renewable alternative energy sources in Brazil, Vol 33 (13), 1745-1752.

CEMIG – COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, [www.cemig.com.br](http://www.cemig.com.br) (Consulta em: 08/2014).

CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. 27º Balanço Energético de Minas Gerais - BEEMG, 2012. Ano base 2011. Belo Horizonte: Cemig, 2012.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais, 2013.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. (2014). Disponível em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/corporativo/Paginas/tarifas201201.aspx> (Consulta em: 05/2015).

CEPEA – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. PIB do agronegócio. 2012. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br/pib/>>. Acesso em: Abr 2015.

COIMBRA-ARAÚJO, C. H., MARIANE, L., BLEY JÚNIOR, C., FRIGO, E.P., FRIGO, M. S., ARAÚJO, I. R. C., ALVES, H. J. (2014). Brazilian case study for biogas energy: Production of electric power, heat and automotive energy in condominiums of agroenergy. *Renew. Sustainable Energy Rev.*, Vol 40, 826-839.

CONVERTI, A., DRAGO, F., GHIAZZA, G., DEL BORGHI, M., MACCHIAVELLO, A. (1997). Co digestion of municipal sewage sludge and pre-hydrolysed woody agricultural wastes, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, Vol 69, 231-239.

COOLS, D.; MERCKX, R.; VLASSAK, K.; VERHAEGEN, J. (2001). Survival of *E. Coli* and *Enterococcus* spp. Derived From Pig Slurry in Soils of Different Texture. *Applied Soil Ecology*. Vol 17:53-62.

COSTA, C. V., ROVEREA, E., ASSMANN, D. (2008). Technological innovation policies to promote renewable energies: Lessons from the European experience for the Brazilian case. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 12 (1), 65-90.

COSTA, R. S. C., TOWNSEND, C. R., LEÔNIDAS, F. C. Diversas utilidades da casca de café. Informe Tecnológico No. 43 Embrapa Rondônia, 2002. (Consulta em: 11/2013).

CRITT, Centro Regional de Inovação e Transferência de Tecnologia/Universidade Federal de Juiz de Fora (2003). **Diagnóstico do Arranjo Produtivo da Suinocultura de Ponte Nova e Região**. UFJF: Juiz de Fora, 97 p.

DAHLGREN, S., LILJEBLAD, A., CERRUTO, J. (2013). Realiserbar biogaspotential I Sverige 2030 genom rötning och förgasning. *Avfall Sverige utveckling*, Malmö.

DE PAOLI, F., BAUER, A., LEONHARTSBERGER, C., AMON, B., AMON, T. (2011). Utilization of by-products from ethanol production as substrate for biogas production, *Bioresource Technology*, Vol 102 (11): 6621-6624.

DELIVAND, M. K., BARZ, M., GHEEWALA, S. H. (2011). Logistic cost analysis of rice straw for biomass power generation in Thailand. *Energy*, Vol.36: 1435-1441.

DEUBLEIN, D., STEINHAUSER, A. (2011). *Biogas from waste and renewable resources: an introduction*. Second, revised and expanded edition. Weinheim: Wiley-VCH.

DIAS, V. P., FERNANDES, E. (2006). Fertilizantes: uma visão global sintética, BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 24, 97 – 138.

DIESEL, R.; MIRANDA, C. R.; PERDOMO, C. C. (2002). Coletânea de tecnologias sobre dejetos suínos. *Boletim Informativo – BIPERS*, Vol 10 (14). 4-28.

DONZELLI, J. L. Uso de Feilizantes. In: MACEDO, I. C. (2005). *A Energia da Cana-de-Açúcar – Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo: Berlendis & Vertecchia.

DRESSLER, D., LOEWEN, A., NELLES, M. (2012). Life cycle assessment of the supply and use of bioenergy: impact of regional factors on biogas production. *Int J Life Cycle Assess*, 17 (9): 1104–1115.

DUTCHMAN (2015). Disponível em: <http://lostdutchmancoffee.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/09/Map.jpg>, (Consulta em: 03/2015).

EBA (2013) *Biogas Report 2013*. European Biogas Association

EEG, 2014 – Lei Alemã de Energias Renováveis. Disponível em: [https://www.clearingstelle-eeeg.de/files/EEG\\_2014\\_141222.pdf](https://www.clearingstelle-eeeg.de/files/EEG_2014_141222.pdf). Consulta em: 04/2015.

EL-KHATTAM, W.; SALAMA, M.M.A. (2004). Distributed generation technologies, definitions and benefits. *Electric Power Systems Research*, Vol 71: 119-128.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Central de Informações de Aves e Suínos. Disponível em: <http://www.cnpsa.embrapa.br/cias/dados/custo.php>. Consulta em: MAIO 2015.

ENERGINET.DK (2014), PSO biogas support schemes in Denmark according to Danish law. <http://www.energinet.dk/EN/GAS/biogas/Stoette-til-biogas/Sider/Stoetteordningerfor-biogas.aspx>

ENERGISA, [www.energisa.com.br](http://www.energisa.com.br), Consulta em: AGO/2014.

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2012. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>.  
Consulta em: 06/2014.

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). Balanço Energético Nacional 2012 - Resultados [www.epe.gov.br/](http://www.epe.gov.br/) Data da consulta: 06/2014.

EurObserv'ER. Disponible en: [http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat\\_baro/observ/baro224\\_Biogas\\_en.pdf](http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/observ/baro224_Biogas_en.pdf) . (consultado em: OUT/2014).

FABbiogas, [http://www.fabbiogas.eu/fileadmin/user\\_upload/Home/AD-process-diagram2.jpg](http://www.fabbiogas.eu/fileadmin/user_upload/Home/AD-process-diagram2.jpg). Consultado em Junho 2015.

FERREIRA, M., MARQUES, I. P., MALICO, I. (2012). Biogas in Portugal: Status and public policies in a European context, Energy Policy, Vol 43: 267-274.

FIGUEIRO, G. G., GRACIOLLI, L. A. (2011). Influência da composição química do substrato no cultivo de Pleurotus florida. Ciência e Agrotecnologia. Vol.35 (5): 924-930.

FISCHER, E., SCHMIDT, T., HORA, S., GIERSDORF, J., STINNER, W., SCHOLWIN, F. (2010). Agro-industrial biogas in Kenya, Potentials, Estimates for Tariffs, Policy and Business Recommendations. Federal Ministry of Economics and Technology, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).

FLEMING, R., FORD, M. (2001). Humans versus Animals - Comparison of Waste Properties. Disponível em: [http://www.ridgetownc.uoguelph.ca/research/documents/fleming\\_huvsanim0107.PDF](http://www.ridgetownc.uoguelph.ca/research/documents/fleming_huvsanim0107.PDF) . (consultado em: Abril, 2015).

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO – FJP. (2011). Índice Mineiro de Responsabilidade Social. Versão 2011. Belo Horizonte: FJP.

GARCIA, S.K., CARVALHO, J., OLIVEIRA, T.M.L. (2005) Suinocultura Mineira (I): Distribuição e tamanho dos plantéis nos polos regionais em 2004. In: CONGRESSO DA ABRAVES, 12., 2005, Fortaleza. Anais... Fortaleza: ABRAVES (CD-ROM).

GasNZV (2012) Gasnetzzugangsverordnung (Gas Network Access Ordinance) – Verordnung über den Zugang zu Gasversorgungsnetzen.

GELEGENIS, J.; D. GEORGAKAKIS; I. ANGELIDAKI; AND V. MAVRIS. (2007). Optimization of biogás production by co-digesting whey with diluted poultry manure. Renewable Energy 32:2147-2160

GGG (2013) Biomethane Market Matrix. Green Gas Grids

HASHIMOTO, A.G. (1983). Conversion of straw-manure mixtures to methane at mesophilic and thermophilic temperatures. Biotechnol. Bioeng. 25: 185–200.

HILLS, D.J., ROBERTS, D.W. (1981). Anaerobic digestion of dairy manure and field cropresidues. Agric. Wastes 3: 179–189.

IBGE, (2014). Pesquisa Agrícola Municipal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pam/default.asp?o=28&i=P>, (consultado em: SET 2014).

IBGE, 2014a. Pesquisa Agrícola Municipal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pam/default.asp?o=28&i=P>, (consultado em: SET 2014).

IBGE, 2014b. Pesquisa Pecuária Municipal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/ppm/default.asp?o=27&i=P>, (consultado en: Septiembre 2014).

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Projeção da População do Brasil. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/> Data da Consulta: ABR/2015.

IEA BIOENERGY (2014) Task 37 Biogas Country Overview, Disponível em: <http://www.iea-biogas.net/country-reports.html?file=files/daten-redaktion/download/publications/country-reports/Summary/Countryreport2013.pdf>. Consultado em Junho 2015.

IMA - Instituto Mineiro de Agropecuária (IMA), Cadastro de Suinocultores 2013a.

IMA - Instituto Mineiro de Agropecuária (IMA), Cadastro de Avicultores 2013b.

IMA – Instituto Mineiro de Agropecuária, Geo DSA, 2011/2012. [www.ima.mg.gov.br](http://www.ima.mg.gov.br). INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário 2006**. Disponível em <http://www.sidra.ibge.gov.br>. Data da Consulta: Set 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). IBGE Cidades. Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/uf.php?lang=&coduf=31&search=minas-gerais>. Data da Consulta: Set 2014.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY (IEA), Key World Energy Statistics, Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2013.pdf>, Data da Consulta: 08/2014

JINGURA, R. M., MATENGAIFA, R. (2009). Optimization of biogas production by anaerobic digestion for sustainable energy development in Zimbabwe, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 13 (5): 1116-1120.

KAFLE, G. K., KIM, S. H. (2013). Anaerobic treatment of apple waste with swine manure for biogas production: Batch and continuous operation, Applied Energy, Vol 103: 61-72.

KAPARAJU, P., RINTALA, J. (2005). Anaerobic co-digestion of potato tuber and its industrial by-products with pig manure. Resour. Conserv. Recycl. 43 (2), 175–188.

KARELLAS, S., BOUKIS, I., KONTOPOULOS, G. (2010). Development of an investment decision tool for biogas production from agricultural waste, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 14 (4): 1273-1282.

KIRB, F.F., BILJETINA, R. (1987). Reactor designs. In: Chynoweth, D. P., Isaacson, R. *Anaerobic digestion of biomass*. London: Elsevier, 141-171.

KOOP, D., MORRIS, C. (2012) Biogas in Luxembourg's natgas network. *Renew. Int.*

KOPPEJAN, J., ELBERSEN, W., MEEUSEN, M., PREM, B. (2009) beschikbaarheid van nederlandse biomassa voor elektriciteit en.

KTBL, (2014). Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. <http://daten.ktbl.de/euagrobiogasbasis/startSeite.do;jsessionid=B9227F8151EE276102038F7038DC3710?selectedAction=start> . Consulta em: SET/2014.

KUMAR, A., CAMERON, J. B., FLYNN, P. C. (2003). Biomass power cost and optimum plant size in western Canada. *Biomass & Bioenergy*, Vol. 24: 445-464.

LANSING, S., MARTIN, F., BOTERO, R.B., NOGUEIRA DA SILVA, T., DIAS DA SILVA, E. (2010). Methane production in low-cost, unheated, plug-flow digesters treating swine manure and used cooking grease. *Bioresour. Technol.* Vol 101, 4362–4370.

LEHTOMAKI, A.; HUTTUNEN, S., RINTALA, J. A. (2007). Laboratory investigations on co-digestion of energy crops and crop residues with cow manure for methane production: Effect of crop to manure ratio. *Resources, Conservation and Recycling*. 51: 591–609.

LI, Q., QIAO, W., WANG, X., TAKAYANAGI, K., SHOFIE, M., LI, Y-Y. (2015). Kinetic characterization of thermophilic and mesophilic anaerobic digestion for coffee grounds and waste activated sludge, *Waste Management*, Vol 36: 77-85.

LI, Y.B., PARK, S.Y., ZHU, J.Y. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renew. Sust. Energy Rev.* Vol 15, 821–826.

LORA, E. E. S.; Haddad, J. (2006). Geração Distribuída. Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais. Rio de Janeiro, RJ. Editora Interciência.

LUXEMBOURG. (2011). Production, la rémunération et la commercialisation de biogaz.

MACLEOD, M., GERBER, P., MOTTET, A., TEMPIO, G., FALCUCCI, A., OPIO, C., VELLINGA, T., HENDERSON, B., STEINFELD, H. (2013). Greenhouse gas emissions from pig and chicken supply chains – A global life cycle assessment. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.

MALLIK, M.K., SINGH, U.K., AHMAD, N. (1990). Batch digester studies on biogas production from Cannabis sativa, water hyacinth and crop wastes mixed with dung and poultry litter, Biological Wastes, Vol 31(4): 315-319.

MANGOYANA, R. B., SMITH, T. F. (2011). Decentralised bioenergy systems: A review of opportunities and threats, Energy Policy, Vol 39 (3): 1286-1295.

MAO, C., FENG, Y., WANG, X., REN, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 45, 540-555.

MAPEMBA, L. D., EPPLIN, F. M., HUHNEKE, R. L., TALIAFERRO, C. M. (2008). Herbaceous plant biomass harvest and delivery cost with harvest segmented by month and number of harvest machines endogenously determined. Biomass and Bioenergy, Vol. 32: 1016-1027.

MARKOVSKA, N., KLEMEŠ, J. J., DUIĆ, N., GUZOVIĆ, Z., MATHIESEN, B. V., LUND, H., YAN, J. (2014). Sustainable development of energy, water and environment systems, Applied Energy, Vol 135 pp. 597-599.

MARTÍNEZ-GARCÍA, G., JOHNSON, A.C., BACHMANN, R.T., WILLIAMS, C.J., BURGOYNE, A., EDYVEAN, R.G.J. (2007). Two-stage biological treatment of olive mill wastewater with whey as co-substrate. International Biodeterioration Biodegradation, Vol 59, 273–282.

MARTINS, F.M.; OLIVEIRA, P.A.V. (2011). Análise econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás na suinocultura. Revista Engenharia Agrícola. Jaboticabal, Vol.31 (3): 477-486.

MATA-ALVAREZ, J., MACE, S. LLABRES, P. (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. Bioresource Technol., 74, 3 – 16.

MENDES JÚNIOR, A.P. Participação da energia fóssil na produção dos fertilizantes industriais nitrogenados com ênfase na uréia. Botucatu/SP: UNESP, 2011. (Dissertação – Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura).

METCALF & EDDIE (1991) Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse. Mc Graw-Hill, New York.

MEYER-AURICH, A., SCHATTAUER, A., HELLEBRAND, H.J., KLAUSS, H., PLÖCHL, M., BERGA, W. (2012). Impact of uncertainties on greenhouse gas mitigation potential of biogas production from agricultural resources. Renew. Energy, 37(1): 277–284.

MINAS GERAIS, 2014. Disponível em: [http://www.minas-gerais.net/diretorio/index.php?cat\\_id=763](http://www.minas-gerais.net/diretorio/index.php?cat_id=763), (Consultado em: Agosto 2014).

MINAS GERAIS, Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Relatórios da Pecuária: Suinocultura 2015. Disponível em: [http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq\\_Relatorios/Pecuaria/2015/abr/suinocultura\\_abr\\_2015.pdf](http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq_Relatorios/Pecuaria/2015/abr/suinocultura_abr_2015.pdf). Data da Consulta: Maio/2015a.

MINAS GERAIS, Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Relatórios da Pecuária: Avicultura de Corte 2015. Disponível em: [http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq\\_Relatorios/Pecuaria/2015/mar/avicultura\\_corte\\_mar\\_2015.pdf](http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq_Relatorios/Pecuaria/2015/mar/avicultura_corte_mar_2015.pdf). Data da Consulta: Maio/2015b.

MITCHELL JUNIOR, C.C. (1991). The value and use of poultry waste as a fertilizer. In: POULTRY by-product management handbook. Alabama: Auburn University, Cooperative Extensive Service (Circular ANR-244).

MOESTEDT, J., NORDELL, E., YEKTA, S. S., LUNDGREN, J., MARTÍ, M., SUNDBERG, C., EJLERTSSON, J., SVENSSON, B.H., BJÖRN, A. (2015). Effects of trace element addition on process stability during anaerobic co-digestion of OFMSW and slaughterhouse waste, *Waste Management*.

MOLINUEVO-SALCES, B., GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, C., GÓMEZ, X., GARCÍA-GONZÁLEZ, M. C., MORÁN, A. (2012). Vegetable processing wastes addition to improve swine manure anaerobic digestion: Evaluation in terms of methane yield and SEM characterization, *Applied Energy*, Vol 91 (1), 36-42.

MONDRAGÓN, F. A., P. SAMAR, H. H. J. COX, B. K. AHRING, AND R. IRANPOUR (2006) Anaerobic codigestion of municipal, farm, and industrial organic wastes: A survey of recent literature. *Water Environ. Res.* Vol 78: 607-636.

MOURA, A. D., JUNQUEIRA, B. A., ROCHA, D. T., SILVA Jr., A. G. (2004). Relatório complementar de caracterização do arranjo produtivo da suinocultura de Ponte Nova (MG) e região. SEBRAE – MG, 16 p.

MURTHY, P. S., NAIDU M. M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol 66: 45-58.

NETTO, M. M. & DINIZ, A. M. A. (2005). A estagnação sócio-econômica da Zona da Mata de Minas Gerais: uma abordagem geohistórica. X Encontro de Geógrafos da América Latina, São Paulo. 9342-9367.

OLIVEIRA, L. G. S. Aproveitamento energético de resíduos agrícolas – O caso da agroeletricidade distribuída. 2011. 282p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro.

OLIVEIRA, P. A. V.; HIGARASHI, M. M.; NUNES, M. L. A. (2003). Efeito Estufa. *Suinocultura Industrial*, São Paulo, v. 25, n. 7, ed. 172, p. 16-20.

OLIVEIRA, P.A.V. Projeto de Biodigestor e Estimativa da Produção de Biogás e, Sistemas de Produção, EMBRAPA Comunicado Técnico 417. Dez 2005.

ORRICO JUNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A., LUCAS JUNIOR, J. (2011) Produção animal e o meio ambiente: uma comparação entre potencial de emissão de metano dos dejetos e a quantidade de alimento produzido. Eng. Agríc. Vol.31 (2): 399-410.

ORRICO JUNIOR, M.A.P., ORRICO, A.C.A., LUCAS JUNIOR, J. (2010). Biodigestão anaeróbia dos resíduos da produção avícola: cama de frangos e carcaças. Eng. Agríc., 30 (3), 546-554.

OUEDRAOGO, N. S. (2013). Energy consumption and human development: Evidence from a panel cointegration and error correction model, Energy, Vol 63: 28-41.

PANTALEO, A., DE GENNARO, B., SHAH, N. (2013). Assessment of optimal size of anaerobic co-digestion plants: An application to cattle farms in the province of Bari (Italy), Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 20: 57-70.

PAULA, A. R. P. ; CRISTOVAO, E. C. ; MIRANDA, H. P. ; AMARAL, T. O. (2013). Vocaç o Energética na Zona da Mata Mineira. XIV Encontro de Geógrafos da América Latina, Lima – Peru.

PEPERMANS, G.; DRIESEN, J.; HAESELDONCKX, D.; BLEMNAS, R.; D'HAESELEER, W. (2005). Distributed Generation: definition, benefits and issues. Energy Policy, Vol 33: 787-798.

PETERSSON, A., THOMSEN, M. H., HAUGGAARD-NIELSEN, H., THOMSEN, A. B. (2007). Potential bioethanol and biogas production using lignocellulosic biomass from winter rye, oilseed rape and faba bean, Biomass and Bioenergy, Vo 31 (11-12): 812-819.

PETERSSON, A., THOMSEN, M. H., HAUGGAARD-NIELSEN, H., THOMSEN, A. B. (2007). Potential bioethanol and biogas production using lignocellulosic biomass from winter rye, oilseed rape and faba bean, Biomass and Bioenergy, Vo 31 (11-12): 812-819.

POESCHL, M., WARD, S., OWENDE, P. Prospects for expanded utilization of biogas in Germany, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 14, Issue 7, September 2010, Pages 1782-1797.

POTTMAIER, D. ; MELO, C.R. ; SARTOR, M.N. ; KUESTER, S. ; AMADIO, T.M. ; FERNANDES, C.A.H. ; MARINHA, D. ; ALARCON, O.E. (2013). The Brazilian energy matrix: From a materials science and engineering perspective. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 19, p. 678-691.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD). Atlas do desenvolvimento humano no Brasil – 2013. Disponível em: <http://www.pnud.org.br/IDH/Default.aspx?indiceAccordion=1&li=li AtlasMunicipios>.

Data da Consulta: Set 2014.

RAVEN, R.P.J.M., GREGERSEN, K.H. (2007). Biogas plants in Denmark: successes and setbacks, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 11 (1): 116-132.

RAVULA, P. P., GRISSO, R. D., CUNDIFF, J. S. (2008). Comparison between two policy strategies for scheduling trucks in a biomass logistic system. *Bioresource Technology*, Vol. 99: 5710-5721.

RESOURCE DYNAMICS CORPORATION, Assessment of Distributed Generation Technology Applications, Vienna, VA, USA, February 2001, Disponível em: [www.distributed-generation.com](http://www.distributed-generation.com), Data da Consulta: Abr/2015.

RIAÑO, B., GARCÍA-GONZÁLEZ, M.C. (2015). Greenhouse gas emissions of an on-farm swine manure treatment plant – comparison with conventional storage in anaerobic tanks, *Journal of Cleaner Production*, Vol 103: 542-548.

RIAÑO, B., MOLINUEVO, B., GARCÍA-GONZÁLEZ, M.C. (2011). Potential for methane production from anaerobic co-digestion of swine manure with winery wastewater. *Bioresour. Technol.* Vol 102, 4131–4136.

RIBEIRO, M. F. S., RAIHER, A. P., Potentialities of energy generation from waste and feedstock produced by the agricultural sector in Brazil: The case of the State of Paraná, *Energy Policy*, Vol 60, 208-216.

RICHETTI, A.; SANTOS, A.C. (2000). O sistema integrado de produção de frango de corte em minas gerais: uma análise sob a ótica da ECT. Organizações Rurais e Agroindustriais – Revista Eletrônica de Administração, v.2, n.2.

RISBERG, K., SUN, L., LEVÉN, L., HORN, S. J., SCHNÜRER, A. (2013). Biogas production from wheat straw and manure – Impact of pretreatment and process operating parameters, *Bioresource Technology*, Vol 149: 232-237.

ROMANO, R. T., ZHANG, R.. (2008). Co-digestion of onion juice and wastewater sludge using an anaerobic mixed biofilm reactor, *Bioresource Technology*, Vol 99 (3): 631-637.

SALMINEN, E., RINTALA, J. (2002). Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste – a review, *Bioresource Technology*, Vol 83 (1): 13-26.

SAMANEZ, C.P. (2002) *Matemática Financeira – Aplicações à Análise de Investimentos*. 3ª Edição. Editora Pearson/Prentice Hall.

SANTOS, F. A., QUEIRÓZ, J. H., COLODETTE, J. L., FERNANDES, S. A., GUIMARÃES, V. M., REZENDE, S. T.. (2012). Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. *Química Nova*, 35(5), 1004-1010.

SCARPIN, J. E., SLOMSKI, V. (2007). Estudo dos fatores condicionantes do índice de desenvolvimento humano nos municípios do estado do Paraná: instrumento de controladoria para a tomada de decisões na gestão governamental. *Rev. Adm. Pública*. Vol.41 (5): 909-933.

SCHERER, E.E.; AITA, C.; BALDISSERA, I.T. Avaliação da qualidade do esterco líquido de suínos da região Oeste Catarinense para fins de utilização como fertilizante. Florianópolis: EPAGRI, 1996, 46 p. (EPAGRI. Boletim Técnico, 79).

SEVERINO, L.S.; LIMA, R.L.S.; BELTRÃO, N.E.M. *Composição Química de Onze Materiais Orgânicos Utilizados em Substratos para Produção de Mudanças*. MAPA. Campina Grande, 2006.

SHARMA, D., ESPINOSA-SOLARES, T., HUBER, D. H. (2013). Thermophilic anaerobic co-digestion of poultry litter and thin stillage, *Bioresource Technology*, Vol 136, 251-256.

SILVA, L. C.; QUEIROZ, D. M.; FLORES, R. A. (2006). Estimativa de custos operacionais em unidades armazenadoras de grãos por meio de simulação. *Revista Brasileira de Armazenamento*, Viçosa, MG, Vol. 31: 1-7.

SILVA, N. F., ROSA, L. P., FREITAS, M. A. V., PEREIRA, M. G.(2013), Wind energy in Brazil: From the power sector's expansion crisis model to the favorable environment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 22, 686-697.

SOITO, J. L. S.; FREITAS, M. A. V. (2011). Amazon and the expansion of hydropower in Brazil: Vulnerability, impacts and possibilities for adaptation to global climate change. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol 15, 3165-3177.

SOKHANSANJ, S.; KUMAR, A.; TURHOLLOW, A. F. (2006). Development and implementation of integrated biomass supply analysis and logistic model (IBSAL). *Biomass and Bioenergy*, Vol. 30: 838-847.

SOUZA, C.F.; CARVALHO, C.C.S.; CAMPOS, J.A.; MATOS, A.T., FERREIRA, W.P.M. (2009). Caracterização de dejetos de suínos em fase de terminação. *R. Ceres*, Vol 56:128-133.

SOUZA, S. N. M. (2001). Energia excedente de biomassa nas usinas de açúcar e álcool para produção de hidrogênio In: IV Congresso Internacional de Ingeniería Agrícola. Vol 1: 131–133, Chillán.

SOUZA, S. N. M. de, SORDI, A., OLIVA, C. A. (2002). Potencial de energia primária de resíduos vegetais no Paraná: 4º Encontro de Energia no Meio Rural.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, Campinas.

SULTANA, A., KUMAR, A., HARFIELD, D. (2010). Development of agri-pellet production cost and optimum size. *Bioresource Technology*, Vol. 101: 5609-5621.

SUWANSRI, S., MORAN, J.C., AGGARANGSI, P., TIPPAYAWONG, N., BUNKHAM, A., RERKKRIANGKRAI, P., (2014). A biomethane solution for domestic cooking in Thailand. *Energy Sustain. Dev.* Vol 23, 68-77.

THRÄN, D., PERSSON, T., SVENSSON, M., DANIEL-GROMKE, J., PONITKA, J., SEIFFERT, M., BALDWIN, J., KRANZL, L., SCHIPFER, F., MATZENBERGER, J., DEVRIENDT, N., DUMONT, M., DAHL, J., BOCHMANN, G. (2014). Biomethane – status and factors affecting market development and trade. IEA Task 40 and Task 37 Joint Study.

UBABEF, União Brasileira de Avicultura, Relatório Anual 2013. Disponível em: <http://www.ubabef.com.br/files/publicacoes/732e67e684103de4a2117dda9ddd280a.pdf>. Consulta em: MAIO 2015.

UNIVATES, Unidade Integrada Vale do Taquari de Ensino Superior. Disponível em: <https://www.univates.br/noticias/15092-univates-integra-evento-sobre-desempenho-de-onibus-abastecido-com-gnverde>. Consultado em Junho 2015.

VOLPI, G., JANUZZI, G. M., GOMES, R. D. M. (2006). A sustainable electricity blueprint for Brazil. *Energy for Sustainable Development Journal*. Vol 4: 14-24.

WANG, G. 2009. Biogas production from energy crops and agriculture residues. Thesis Dissertation, Technical University of Denmark.

WANG, X., YANG, G., FENG, Y., REN, G., HAN, X. (2012a). Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw, *Bioresource Technology*, Vol 120: 78-83.

WANG, X.J., YANG, G.H., FENG, Y.Z., REN, G.X. (2012b). Potential for biogas production from anaerobic co-digestion of dairy and chicken manure with corn stalks. *Adv. Mat. Res.* Vol 347, 2484–2492.

WARR, B.S., AYRES, R.U. (2010). Evidence of causality between the quantity and quality of energy consumption and economic growth, *Energy*, Vol 35 (4): 1688-1693.

WU, W. (2007). Anaerobic co-digestion of biomass for methane production: recent research achievements. Iowa State University.

WU, X., YAO, W., ZHU, J., MILLER, C. (2010). Biogas and CH<sub>4</sub> productivity by co-digesting swine manure with three crop residues as an external carbon source, *Bioresource Technology*, Vol 101 (11) 4042-4047.

[www.cype.com](http://www.cype.com)

XIE, S., LAWLOR, P.G., FROST, J.P., HU, Z., ZHAN, X. (2011). Effect of pig manure to grass silage ratio on methane production in batch anaerobic co-digestion of pig manure and grass silage. *Bioresour. Technol.* Vol 102, 5728–5733.

YU, C., LEE, J., MUNRO-STASIUK, M. J. (2003) – Extensions to least-cost path algorithms for roadway planning – *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 17 (4): 361 – 376.