

FELIPE PINHEIRO SILVA

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA UNIDADE DE MICROGERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DA SUINOCULTURA**

CASCADEL
PARANÁ - BRASIL
MARÇO - 2015

FELIPE PINHEIRO SILVA

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA UNIDADE DE MICROGERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DA SUINOCULTURA**

Trabalho de dissertação apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura do Curso de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na Agricultura da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE.

ORIENTADOR: Prof^o. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

COORIENTADOR: Prof^o. Dr. Jair Cruz Siqueira

CASCADEL
PARANÁ - BRASIL
MARÇO - 2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

S58e

Silva, Felipe Pinheiro

Eficiência energética de uma unidade de microgeração de energia elétrica a partir do biogás da suinocultura./Felipe Pinheiro Silva. Cascavel, 2015.

60 p.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Coorientador: Prof. Dr. Jair Cruz Siqueira

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na
Agricultura

1. Digestão anaeróbia. 2. Grupo gerador. 3. Instrumentos. I. Souza, Samuel Nelson Melegari de . II. Siqueira, Jair Cruz. III. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. IV. Título.

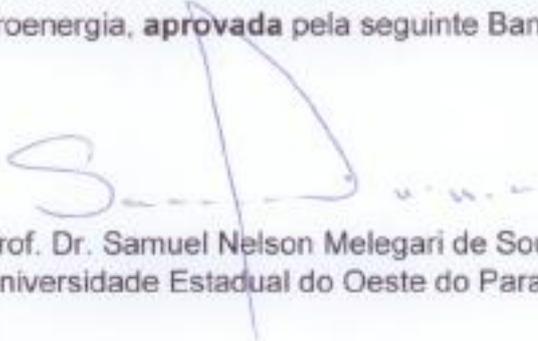
CDD 21.ed. 665.7

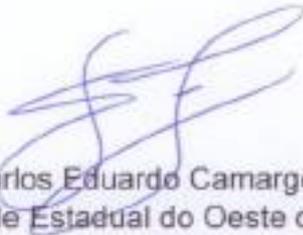
Ficha catalográfica elaborada por Helena Soterio Bejio – CRB 9ª/965

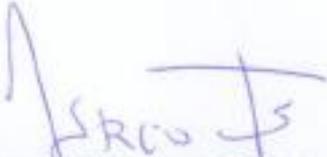
FELIPE PINHEIRO SILVA

“Eficiência energética de uma unidade de microgeração de energia elétrica a partir do biogás da suinocultura”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovada** pela seguinte Banca Examinadora:


Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel


Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel


Prof. Dr. Laercio Mantovani Frare
Universidade Tecnológica Federal do Paraná– UTFPR/Medianeira

Cascavel, 11 de março de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) pela oportunidade em participar deste Programa de Mestrado.

Aos meus pais e minha namorada, Fernanda, pelo incentivo e apoio em todo os momentos.

Ao meu colega de trabalho, Kitamura, que participou em todos os momentos na execução em campo e na elaboração dos projetos deste estudo.

À Família Colombari, em especial ao Pedro Colombari, que sempre foi receptivo, e quando possível forneceu informações adicionais para contribuir com os resultados.

Ao meu orientador, Prof. Samuel Nelson Melegari de Souza, que contribuiu com sugestões e seu conhecimento.

À ITAIPU Binacional, através da Assessoria de Energias Renováveis por fomentar a pesquisa na área de biomassa e biogás.

E ao Instituto de Tecnologia Aplicada e Inovação (ITAI), pela oportunidade de realizar este aperfeiçoamento na minha carreira profissional e fomentar a pesquisa e desenvolvimento em diversas áreas do conhecimento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema das etapas de produção de biogás	6
Figura 2. Biodigestor modelo fluxo tubular	8
Figura 3. Vista aérea da Granja Colombari	16
Figura 4. Fluxograma do processo produtivo	17
Figura 5. Biodigestores em série no tratamento de dejetos	19
Figura 6. Grupo gerador a biogás de 104 kVA	19
Figura 7. Fluxograma da coleta e armazenamento dos dados na propriedade	21
Figura 8. Painel de monitoramento instalado na propriedade	22
Figura 9. Diagrama esquemático da localização dos instrumentos de medição	23
Figura 10. Medidor de vazão da marca Magnetrol	24
Figura 11. Transmissor de concentração de metano	25
Figura 12. Diagrama esquemático das ligações e local dos medidores de energia ..	26
Figura 13. Multimetro de grandezas elétricas	27
Figura 14. Termorresistência Pt100	30
Figura 15. Produção mensal de biogás, produção diária média de biogás e quantidade média de animais.....	32
Figura 16. Produção média diária de biogás e temperatura média mensal	33
Figura 17. Concentração média de metano no biogás.....	34
Figura 18. Tempo médio de operação diário e energia média gerada	35
Figura 19. Consumo específico de biogás e potência ativa média.....	35
Figura 20. Eficiência global do conjunto motogerador e do motor.....	37
Figura 21. Consumo específico em diferentes cargas	37
Figura 22. Valores em kWh da energia elétrica da Granja Colombari, incluindo geração total, consumo total, energia exportada, energia consumida evitada e energia consumida da rede.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Variação do P.C.I. conforme composição do biogás	10
Tabela 2. Composição do biogás segundo diversos autores	10
Tabela 3. Produção de biogás para suínos em fase de terminação.....	11
Tabela 4. Estruturação tarifária para consumo de energia elétrica	15
Tabela 5. Tarifas de energia elétrica por classe para reajuste de junho de 2014	15
Tabela 6. Dimensões e volume dos biodigestores	18
Tabela 7. Lista de parâmetros monitorados na Granja Colombari	20
Tabela 8. Características do transmissor de vazão.....	24
Tabela 9. Características da termorresistência	24
Tabela 10. Características do analisador de concentração de metano.....	25
Tabela 11. Características do medidor de energia	26
Tabela 12. Características do transformador de corrente	27
Tabela 13. Valores encontrados para o ensaio de eficiência	36
Tabela 14. Saldo de EE e balanço do custo de energia elétrica consumida na propriedade	39
Tabela 15. Principais resultados e correlações no período deste estudo	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	Ciclo Completo
CNPJ	Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
COPEL	Companhia Paranaense de Energia Elétrica
CPF	Cadastro da Pessoa Física
EE	Energia Elétrica
FE	Fundo de escala
GD	Geração Distribuída
ICMS	Imposto sobre circulação de mercadorias e prestação de serviços
ITAI	Instituto de Tecnologia Aplicada e Inovação
NTC	Norma Técnica Copel
PCI	Poder Calorífico Inferior
PIB	Produto Interno Bruto
PIS	Programa de integração social
PVC	Policloreto de vinila
STP	<i>Standard Temperature and Pressure</i>
TC	Transformador de Corrente
TRH	Tempo de retenção hidráulico
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
UPL	Unidade Produtora de Leitões
UPT	Unidade Produtora de Terminação
USDA	United States Department of Agriculture

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampére
atm	Atmosfera
Cec	Consumo específico de combustível
Ceee	Custo evitado de energia elétrica
CH ₄	Metano
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão (0 °C e 1 atm)
CO ₂	Dióxido de carbono
Ctee	Custo da tarifa de energia elétrica
EEC	Energia elétrica consumida
H ₂	Gás Hidrogênio
H ₂ S	Sulfeto de hidrogênio
Hz	Hertz
kcal	Quilocaloria
kg	Quilograma
kV	Quilovolts
kVA	Quilovolt Ampére
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt hora
m ³	Metros cúbicos
mA	Miliampére
MW	Megawatt
Nm ³	Metros cúbicos normais - CNTP
°C	Celsius
P	Potência ativa gerada
Q	Vazão instantânea de biogás
T	Temperatura
Vca	Volts corrente alternada
Vcc	Volts corrente contínua
η	Eficiência
ρ	Densidade

SILVA, Felipe Pinheiro. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Março de 2015. **Eficiência energética de uma unidade de microgeração de energia elétrica a partir do biogás da suinocultura.** Orientador: Prof^o. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

RESUMO

A suinocultura é uma importante atividade no negócio agropecuário brasileiro. A atividade realizada em confinamento gera um grande volume de efluentes que pode ser tratado por meio da digestão anaeróbia. Para aproveitamento do biogás gerado neste processo, é necessário um melhor conhecimento através das variáveis envolvidas. O objetivo deste estudo foi a avaliação dos parâmetros de produção de biogás, geração de energia elétrica, desempenho do grupo gerador na conversão de biogás em energia elétrica e o custo evitado de energia elétrica da propriedade rural. Foram monitorados parâmetros de concentração, produção e consumo biogás; e geração de energia elétrica. O monitoramento foi realizado com a utilização de instrumentos e posterior armazenamento das informações em banco de dados. Os resultados encontrados indicaram uma produção diária média de 443 m³, com uma média de 0,10 m³ de biogás por suíno e uma concentração média de 68% de metano. A geração de energia elétrica média foi de 324,5 kWh.dia⁻¹, e a eficiência do grupo gerador foi de 17% com uma potência média ativa de 70 kW e operação diária de 6,5 horas. O custo evitado pelo autoconsumo da energia elétrica na propriedade gerada foi de R\$ 13.718,20, e durante o período monitorado houve uma geração total de energia elétrica de 70,5 MWh, dos quais 26,6 MWh foram exportados para a rede de distribuição da concessionária local.

Palavras-Chave: digestão anaeróbia, grupo gerador, instrumentos

SILVA, Felipe Pinheiro. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, February 2015.
Monitoring of a Distributed Electrical Energy Micro-generation using Biogas.
Prof^o. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

ABSTRACT

The swine farming is an important Brazilian agricultural business. The activity held in confinement generates a large volume of wastewater that may be treated by anaerobic digestion. To use the biogas generated in the process, it is necessary better knowledge through the variables involved. The objective of this study was the evaluation of biogas production parameters, power generation, generator set performance in biogas conversion into electricity and the avoided cost of electricity from of the farm. Biogas parameters were monitored as methane content, digester production, and the engine consumption in generation of electricity. Monitoring was realized with the use of instruments and storage of information in a database. The results indicated an average daily production of $443 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$, with an average of 0.10 m^3 of biogas per pig and 68% of methane content. The average electricity generation was $324,5 \text{ kWh} \cdot \text{dia}^{-1}$, and efficiency of the generator set was 17% with a power of 70 kW and an average of 6,5 hours of daily operation. The avoided cost by self-consumption of electricity generated was R\$ 13,718.20, and during the monitoring 70.5 MWh of electricity was generated, of which 26.6 MWh were exported to the distribution network.

Keywords: anaerobic digestion, generator set, sensors

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 O AGRONEGÓCIO BRASILEIRO.....	3
2.2 SUINOCULTURA NO CONTEXTO MUNDIAL E BRASILEIRO.....	3
2.3 CARACTERÍSTICAS DA SUINOCULTURA.....	4
2.3.1 Sistemas de criação	4
2.3.2 Fases de desenvolvimento do suíno	4
2.3.3 Manejo de suínos	5
2.4 DIGESTÃO ANAERÓBIA DOS DEJETOS SUÍNOS.....	5
2.5 BIODIGESTORES.....	7
2.5.1 Alimentação de biodigestores	8
2.5.2 Operação e eficiência dos biodigestores	9
2.6 BIOGÁS.....	9
2.6.1 Produção de biogás	11
2.7 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA.....	11
2.8 MICROGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A BIOGÁS.....	12
2.9 GRUPOS GERADORES A BIOGÁS.....	13
2.9.1 Custo da eletricidade	14
3 MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	16
3.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO.....	17
3.2.1 Geração de dejetos	17
3.2.2 Tratamento da biomassa residual	18
3.2.3 Utilização do biogás	19
3.3 PARÂMETROS MONITORADOS.....	20
3.4 COLETA E REGISTRO DE DADOS.....	21
3.4.1 Pontos de coleta e localização dos instrumentos	22
3.5 PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	23
3.6 ACOMPANHAMENTO DA QUALIDADE DO BIOGÁS.....	25
3.7 CONSUMO E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	26
3.8 CONSUMO ESPECÍFICO DE BIOGÁS DO GRUPO GERADOR.....	27
3.9 EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO DE BIOGÁS EM ENERGIA ELÉTRICA.....	28
3.10 CUSTO EVITADO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1 PRODUÇÃO DE BIOGÁS NA UNIDADE.....	32
4.2 ACOMPANHAMENTO DA QUALIDADE DO BIOGÁS.....	33
4.3 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E OPERAÇÃO DO GRUPO GERADOR.....	34
4.4 CONSUMO ESPECÍFICO DO GRUPO GERADOR.....	35
4.5 EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO DE BIOGÁS EM ENERGIA ELÉTRICA.....	36
4.6 BALANÇO DO CONSUMO E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	38
5 CONCLUSÕES GERAIS	41
REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

O agronegócio é um setor em franco desenvolvimento na economia brasileira, e hoje já é responsável por grande parte do PIB (Produto Interno Bruto) brasileiro.

O setor agropecuário vem se consolidando pelas recentes aberturas de mercado exterior, alavancando as exportações e contribuindo cada vez mais para a expansão e abertura de novos negócios no setor.

Além da tradicional bovinocultura, que tem um lugar de destaque na economia mundial, a suinocultura também se destaca com a especialização contínua do agronegócio, tornando um setor competitivo no mercado nacional e internacional.

Com o crescimento deste setor também cresce a preocupação ambiental com relação os dejetos, que são gerados em grandes volumes em espaços confinados, típicos na criação de suínos.

O tratamento destes dejetos por meio da digestão anaeróbia é uma alternativa que tem como um dos produtos a geração do biogás, um gás combustível altamente energético, além do digestato do processo que é um poderoso fertilizante agrícola orgânico.

Com a busca constante por fontes alternativas de energia, o biogás da biomassa residual da agropecuária pode ser uma solução de grande importância na transformação econômica do meio produtivo rural.

Para um bom aproveitamento deste combustível torna-se necessário o monitoramento contínuo dos parâmetros que envolvam os processos, através de sensores, instrumentos e equipamentos de comunicação.

A geração de energia elétrica a partir da produção de biogás são pontos importantes que deverão ser monitorados para avaliação da viabilidade técnica e econômica de empreendimentos.

O monitoramento permite um conhecimento mais aprofundado do processo e portanto uma melhor gestão das condições operacionais das unidades produtoras de biogás, além de fornecer informações para a realização de manutenções preditivas e melhorias no processo.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é avaliar uma unidade de geração de energia elétrica a partir do biogás de dejetos da suinocultura e terá como objetivos específicos:

- Avaliar os parâmetros que são relevantes no estudo do processo de geração e aproveitamento do biogás;
- Realizar correlação e geração de novos índices para a produção e utilização de biogás em propriedades de suinocultura;
- Avaliar a eficiência do grupo gerador na conversão de biogás em energia elétrica;
- Avaliar o consumo de energia elétrica e custo evitado de energia elétrica com base no sistema de compensação da resolução nº 482 da ANEEL.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O AGRONEGÓCIO BRASILEIRO

O setor do agronegócio composto pelas mais diversas atividades agrícolas e pecuárias é fundamental na economia brasileira. Apesar do baixo desempenho da economia no ano de 2014, o setor apresentou um crescimento superior a economia brasileira em 2,6% do PIB do país (CEPEA, 2014).

O PIB do setor agropecuário representou entre 22 e 23% do total do país, cerca de 1,1 trilhão de reais, dividindo-se em 70% para as atividades agrícolas e 30% para a pecuária (MAPA, 2014).

Entre outras cadeias produtivas do agronegócio, a suinocultura brasileira é uma atividade que cresce significativamente a cada ano, quando são analisados os vários indicadores econômicos e sociais, o volume de exportações e o número de empregos (GONÇALVES e PALMEIRA, 2006).

2.2 SUINOCULTURA NO CONTEXTO MUNDIAL E BRASILEIRO

O crescimento na produção mundial da carne suína é constante, e, nos últimos anos sempre ocorre um crescimento em média entre 0,5 e 3%. Segundo a USDA (*United States Department of Agriculture*), no ano de 2014 a produção foi estimada em 110,6 milhões de toneladas de carne (USDA, 2014).

No Brasil, a suinocultura corresponde a uma produção de cerca de 3,4 milhões de toneladas, sendo o estado de Santa Catarina o maior produtor desta carne (ABIPECS, 2014).

As exportações em 2013 sofreram um recuo de 11%, principalmente devido às crises nos países como a Ucrânia e Hong Kong (ESTADÃO, 2014)

No entanto, há grandes perspectivas para os próximos anos no mercado de suinocultura. Em recentes visitas de missão chinesa à frigoríficos brasileiros foi aprovado pela primeira vez as exportações da carne suína brasileira para a China, um forte mercado em expansão e consumidor da carne no mundo (ABCS, 2014).

O Paraná está em terceiro lugar no plantel de suínos com aproximadamente 5,3 milhões de cabeças, correspondendo a 14,5% do total efetivo de cabeças de suínos do país (IBGE, 2013).

2.3 CARACTERÍSTICAS DA SUINOCULTURA

2.3.1 Sistemas de criação

Pode-se dividir o sistema de criação de suínos em três tipos: criação extensiva, sistema de confinamento e criação ao ar livre (CARNE SUÍNA BRASILEIRA, 2012):

- a) Criação Extensiva: realizada sem utilização de qualquer instalação. É a manutenção permanente dos animais no campo, durante todo o processo produtivo;
- b) Sistema de criação em confinamento: realizada em instalações em todas as fases produtivas, sem acesso às pastagens. É utilizado para produção comercial da carne suíno no mercado atual;
- c) Criação ao ar livre: os animais são mantidos em piquetes nas fases de reprodução, maternidade e creche. Durante as fases de crescimento e terminação ficam em confinamento.

2.3.2 Fases de desenvolvimento do suíno

Na suinocultura moderna a maioria das criações é realizada no sistema confinado. Basicamente essa criação é dividida em quatro fases: gestação, maternidade, creche e terminação (TRICHES, 2003):

- a) Gestação: a gestação média de suínos é de 114 dias. A gestação também abriga as matrizes em retorno do cio, as leitoas de reposição de plantel e os machos.
- b) Maternidade: fase onde as matrizes ficam uma semana antes do parto até o desmame dos leitões, que ocorre entre 21 e 28 dias de idade;
- c) Creche: fase que vai do desmame dos leitões até atingirem 25 - 30 kg (60 - 70 dias de idade);
- d) Terminação: compreende a fase que vai da creche (25 - 30 kg) até o abate (100 - 110 kg com idade em torno de 150 - 160 dias).

A partir do sistema de criação, dividem-se em três sistemas diferentes de produção utilizados pelos suinocultores (FAEP, 2010):

- a) Ciclo Completo (CC): os suinocultores criam desde a cobertura até o abate dos animais;

- b) Unidade Produtora de Leitões (UPL): criação de animais até aproximadamente 23 kg;
- c) Unidade Produtora de Terminação (UPT): recebem os leitões das UPL e conduzem até a idade de abate.

2.3.3 Manejo de suínos

- **Criação de suínos em cama sobreposta**

Na criação de suínos em cama sobreposta (*deep litter*), os suínos podem permanecer em todas as fases do sistema criatório sobre uma cama que pode ser de maravalha, casca de arroz, palha de cereais ou serragem (GIACOMINI e AITA, 2008).

- **Criação de suínos em lâmina d'água**

Trata-se de um reservatório construída ao longo do piso das instalações de crescimento e terminação no lado mais baixo da inclinação. A lâmina objetiva melhorar a higiene das instalações, concentrando as fezes dos animais, e facilitando conseqüentemente o manejo (ALBUQUERQUE et al., 1998).

A lâmina d'água também é utilizada para proporcionar maior conforto térmico aos animais (PAIANO et al., 2007).

2.4 DIGESTÃO ANAERÓBIA DOS DEJETOS SUÍNOS

No manejo de suínos, o volume de dejetos gerados pela suinocultura transforma a atividade em grande potencial poluidor (ROESLER e CESCNETO, 2003). A disposição inadequada dos dejetos causa poluição no ar, na água e no solo, causando diversos impactos ambientais (BARBOSA e LANGER, 2011).

Quando os dejetos são facilmente biodegradáveis, o processo de biodigestão anaeróbia utilizado para tratamento se mostra mais eficiente e mais econômico (CHERNICHARO, 2007).

O processo da digestão anaeróbia consiste na transformação de compostos orgânicos complexos em substâncias mais simples, como metano e dióxido de carbono, através da ação combinada de diferentes microrganismos que atuam na ausência de oxigênio (DIESEL, MIRANDA e PERDOMO, 2002).

Segundo Cortez et al. (2008), o tratamento anaeróbico é um grande produtor de energia, produzindo baixa biomassa celular e necessitando somente 10% dos nutrientes necessários para um processo aeróbico.

Na Figura 1 é ilustrado um fluxograma contendo as diferentes etapas e produtos do processo de biodigestão anaeróbia.

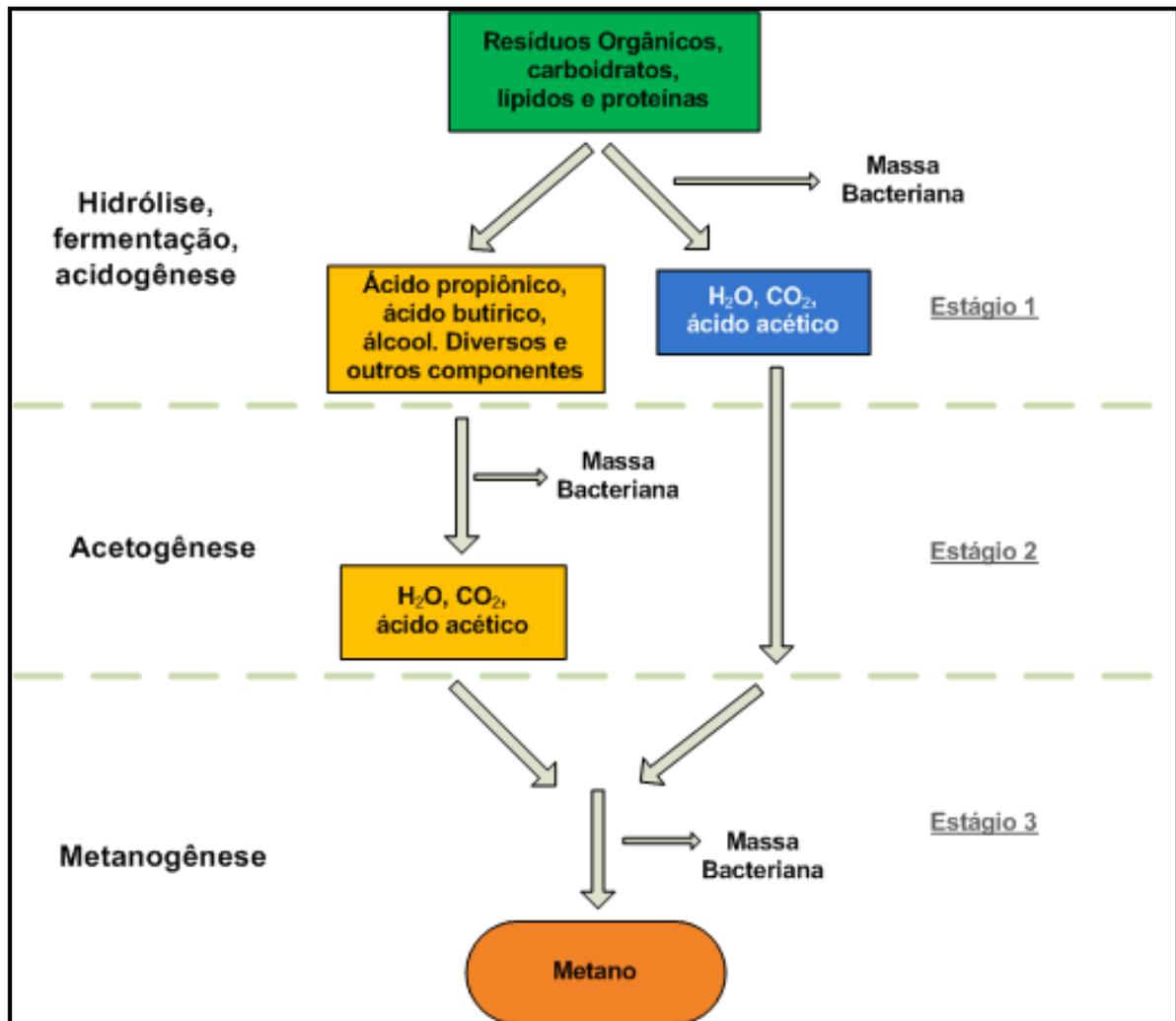


Figura 1. Esquema das etapas de produção de biogás

Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007)

Assim, os processos anaeróbios podem ser divididos nestas quatro fases principais, demonstradas na Figura 1, e resumidamente dispostas a seguir (CHERNICHARO, 2007; OLIVEIRA e HIRAGASHI, 2006):

a) Hidrólise: através das enzimas, as bactérias fermentativas hidrolíticas, os materiais particulados complexos (polímeros) são assimilados e ocorre a hidrólise dos materiais dissolvidos em substâncias mais simples (moléculas menores);

b) Acidogênese: os produtos solúveis oriundos da primeira fase da hidrólise são metabolizados pelas bactérias fermentativas acidogênicas, que convertem os compostos entre outros em ácidos graxos, voláteis, alcóois, ácido láctico, dióxido de carbono, gás hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio;

c) Acetogênese: os principais produtos da fase acidogênica são oxidados pelas bactérias acetogênicas, gerando compostos assimiláveis pelas bactérias acetogênicas, entre eles o gás hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato;

d) Metanogênese: a etapa final transforma os compostos em metano e dióxido de carbono. Os compostos orgânicos como ácido acético, gás hidrogênio/dióxido de carbono, ácido fórmico, metano, metilamida e monóxido de carbono são convertidos pelas bactérias metanogênicas, que podem ser acetoclásticas ou hidrogênionicas, conforme sua afinidade de assimilação.

A digestão anaeróbia com a utilização de biodigestores rurais contribui com a redução das emissões causadas pelos dejetos, bem como da carga orgânica destes, além de gerar o biogás, produto da biodigestão que pode ser aproveitado como fonte de calor e energia (SOUZA e KUNZ, 2010).

Segundo Miranda et al. (2009), além do atendimento da demanda energética pela utilização do biogás e a disposição do biofertilizante no solo, a utilização de biodigestores trazem também como produto, o saneamento no meio rural.

O setor produtivo pecuário, em especial a suinocultura, vem buscando reduzir a poluição ambiental com utilização de biodigestores nas propriedades para realizar o tratamento dos resíduos gerados adequando as necessidades da legislação e saneando o meio ambiente (FERNANDES *et al.*, 2010).

2.5 BIODIGESTORES

Segundo Cortez et al. (2008) os biodigestores podem ser classificados de acordo com o tipo de reação e com as características hidráulicas.

Existem diversos tipos de reatores anaeróbios ou biodigestores, sendo os mais utilizados os seguintes modelos:

a) Modelo indiano: esse modelo é caracterizado por possuir uma cúpula como gasômetro, a qual pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação,

e possui uma parede central que divide o tanque permitindo que o material circule por toda a câmara de fermentação (DEGANUTTI et al., 2002).

b) Modelo chinês: é construído todo em alvenaria, e possui uma cúpula fixa de alvenaria onde é armazenado o biogás, com a pressão regulada por uma válvula de coluna d'água (BARREIRA, 2011).

c) Reatores Holandeses tipo UASB: os reatores *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo) se baseiam no princípio da passagem do efluente por um leite de lodo (bactérias) no sentido ascendente (CHERNICHARO, 2007).

d) Modelo fluxo tubular: também chamado de fluxo pistão (*plug flow*), é um reator de alimentação caracterizado como uma lagoa coberta (relação comprimento/largura de 3:1) (LIMA, 2011). Este modelo pode ser visualizado na Figura 2.

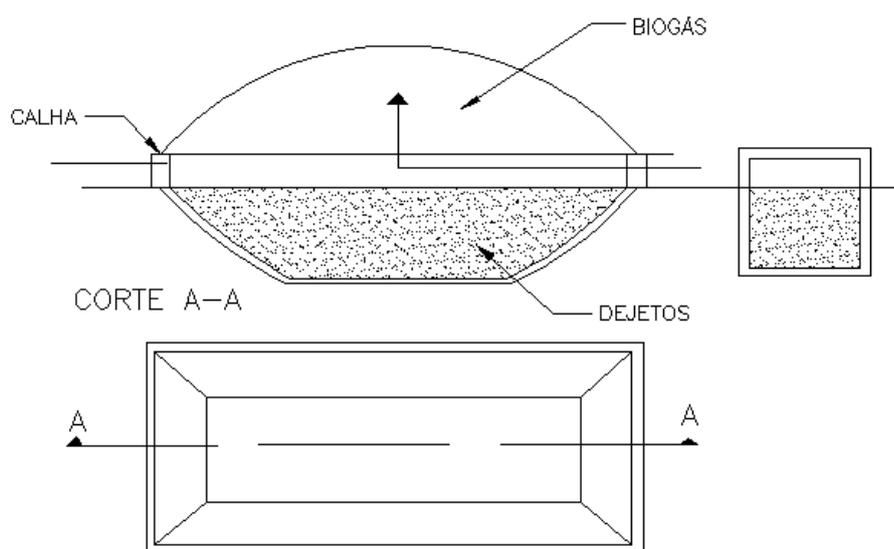


Figura 2. Biodigestor modelo fluxo tubular
Fonte: Adaptado de Cortez et al. (2008)

2.5.1 Alimentação de biodigestores

Os biodigestores podem ser alimentados e operados de maneira contínua, semi-contínua ou batelada (*batch*), sendo mais comum o sistema semi-contínuo em granjas suinícolas (ANDRADE et al., 2002; KUNZ e PALHARES, 2004).

Nos biodigestores do modelo batelada é inserida uma única carga de todos os dejetos a serem tratados. Essa biomassa permanece no reservatório destinado ao tratamento até que todo o ciclo de biodigestão esteja completo, quando

normalmente cessa a produção de biogás (LIMA, 2011).

Quando operados no modo contínuo, ocorre a alimentação do biodigestor sem interrupções sendo que a biomassa é líquida ou semilíquida (COMASTRI FILHO, 1981). Já em regime semi-contínuo ocorre o descarregamento dos dejetos para o biodigestor diariamente de uma só vez (KUNZ e PALHARES, 2004).

2.5.2 Operação e eficiência dos biodigestores

Geralmente, o controle de processos de digestores anaeróbios é difícil, pois inúmeras condições operacionais estão interligadas e mudanças em um dos parâmetros podem afetar indiretamente outros (GERARDI, 2003).

Para um funcionamento adequado do sistema não é somente necessário garantir a eficiência na remoção da carga orgânica e produção constante de biogás, mas também prevenir perturbações e potenciais falhas no sistema de biodigestão (LABATUT e GOOCH, 2012).

A velocidade do tratamento pode aumentar com a temperatura, com uma faixa ótima para as bactérias anaeróbias mesofílicas, entre 30 e 40 °C (GRADY, DAIGGER e LIM, 1999).

O biogás, como produto da biodigestão, tem sua produção ligada a eficiência do biodigestor, sendo que a temperatura e alimentação podem interferir diretamente no processo (OLIVEIRA e HIRAGASHI, 2006).

2.6 BIOGÁS

Nos últimos anos com aumento do preços dos combustíveis fósseis, o biogás tem se tornado uma alternativa entre as energias renováveis, com cada dia mais países criando leis de energias renováveis que incentivam os agricultores à utilização de biodigestores anaeróbios (BRAMBILLA et al., 2012).

O biogás é composto por diversos gases e vapores. Entre eles estão o metano (CH₄); o sulfeto de hidrogênio (H₂S); dióxido de carbono (CO₂); gás hidrogênio (H₂); vapor d'água e; outros gases e vapores em menor quantidade (OLIVEIRA e HIRAGASHI, 2006).

O poder calorífico do biogás é menor quanto maiores forem as proporções de contaminantes na mistura que o compõe. Em linhas gerais este poder calorífico inferior (P.C.I.) é aproximadamente 5.000 kcal/m³ a 60% de metano e 40% de CO₂

(COSTA, 2006).

Na Tabela 1 é apresentado o poder calorífico inferior conforme diferentes concentrações de metano no biogás.

Tabela 1. Variação do P.C.I. conforme composição do biogás

Composição Química Biogás	P.C.I. (kcal/Nm ³)*
40% CH ₄ , 60% CO ₂	3430
50% CH ₄ , 50% CO ₂	4290
60% CH ₄ , 40% CO ₂	5145
65% CH ₄ , 35% CO ₂	5575
70% CH ₄ , 30% CO ₂	6000
75% CH ₄ , 25% CO ₂	6430
99% CH ₄ , 1% CO ₂	8500

Fonte: Adaptado de Mitzlaf (1988), Çengel e Boles (2013)

*STP (*Standard Temperature and Pressure*) – 1 atm e 0 °C

Para aproveitamento em motores a combustão, a qualidade do biogás é de suma importância, pois seu potencial energético é dependente da concentração de metano. Outros gases presentes no biogás podem ser prejudiciais aos motores como o sulfeto de hidrogênio (>1000 ppm) e a amônia (>100 ppm) (RASI, LÄNTELÄ e RINTALA, 2011).

O monitoramento da concentração de metano também pode indicar condições inadequadas de processo quando esta for baixa (BOE et al., 2010).

Em uma planta de biogás experimental utilizando um cromatógrafo, Aburas et al. (1996), encontraram um percentual médio de 67% de metano no biogás, proveniente de dejetos animais.

Na Tabela 2 é demonstrada a composição de biogás com a biodigestão de resíduos da suinocultura.

Tabela 2. Composição do biogás segundo diversos autores

Parâmetros	Autores				
	Gusmão (2008)	Dal Mago (2009)	Miranda et al. (2008)	Oliveira e Hiragashi (2006)	ITAI (2012)
Metano (CH ₄)	50 - 72%	23 - 70%	64-67%	69%	60 – 67%
Dióxido de Carbono (CO ₂)	26 – 52%	39 - 75%	-	-	31 – 38 %
Oxigênio (O ₂)	0,23 - 0,97%	0,43 -1,99%	-	-	0,3 – 1,2%
Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S)	> 0,1%	> 0,1 %	-	-	0,08 - 0,4%
Gás hidrogênio (H ₂)	-	-	-	-	1.700 - 1.800 ppm

2.6.1 Produção de biogás

A medição do volume de biogás produzido nos experimentos de campo com a utilização de medidores confiáveis pode evitar os erros de cálculo de volume normalmente atribuídos aos biodigestores de bancada, como apontado por Walker et al. (2009).

Na Tabela 3 é apresentada uma relação da produção de biogás por animal segundo alguns estudos realizados para criação de suínos em fase de terminação.

Tabela 3. Produção de biogás para suínos em fase de terminação

Parâmetros	Autores / Trabalhos			
	Kunz e Oliveira (2006)	Dal Mago (2009)	Gusmão (2008)	ITAI (2012)
Biogás ($m^3.animal^{-1}.dia^{-1}$)	0,24	0,224	0,264	0,125

2.7 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA

Em seu estudo sobre Geração Distribuída (GD), Ackerman et al. (2001) discutiram sobre as diversas definições e a consideraram como sendo a geração de energia elétrica do lado do cliente das redes de distribuição.

Segundo Jenkins et al. (2000), a definição para GD não é universal e, no atual momento, não há nada consistente que a diferencia da geração de energia convencional. O que tem são definições em cada país de acordo com seu sistema de distribuição. Sabe-se que algumas características da GD são:

- Não possui planejamento centralizado;
- Não possui distribuição centralizada;
- Normalmente menor que 50 MW;
- Normalmente conectada ao sistema de distribuição.

No ano de 2004, a Lei Nº 10.848 foi considerada como novo marco regulatório do setor elétrico. Esta lei introduziu a geração distribuída oficialmente no país (SILVA FILHO, 2005).

Já a definição de GD veio legalmente através do Decreto Federal Nº 5.163 de 30 de julho de 2004, que a definiu como a energia elétrica proveniente de empreendimentos conectados ao sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aqueles: hidrelétricos com capacidade superior a 30 MW e termelétricos, inclusive com cogeração, com eficiência inferior a 75%, à exceção termelétricos que

utilizem biomassa ou resíduos do processo, que não estão limitados a este percentual (BRASIL, 2004).

Através de resoluções autorizativas, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) autorizou a GD pela primeira vez em 2008, tendo como projeto piloto com a COPEL a geração distribuída em baixa tensão (HACHISUCA et al., 2010).

No ano de 2012, foi publicada a Resolução Normativa Nº 482 que estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2012).

No Paraná, a COPEL (Companhia Paranaense de Energia Elétrica) estabelece os requisitos para conexão de mini e microgeradores à rede de distribuição através da NTC 905200 de agosto de 2014 (COPEL, 2014).

2.8 MICROGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A BIOGÁS

Segundo a Resolução Normativa Nº 482 de 2012 da ANEEL, a definição de micro e minigeração distribuída é dada como uma central geradora que utilize energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conectada à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Podem ser classificadas em (ANEEL, 2012):

- Microgeração distribuída – $P_{instalada} \leq 100 \text{ kW}$;
- Minigeração distribuída – $100 \text{ kW} < P_{instalada} \leq 1 \text{ MW}$.

Esta resolução da ANEEL também define o sistema de compensação de energia elétrica que hoje é o principal utilizado na micro e minigeração. Este sistema é definido como:

“[...] sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração distribuída ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade da unidade consumidora onde os créditos foram gerados, desde que possua o mesmo Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou Cadastro de Pessoa Jurídica (CNPJ) junto ao Ministério da Fazenda (ANEEL, 2012)”.

Para obter este acesso, o Prodist (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica) elaborado pela ANEEL estabelece critérios para os procedimentos

operativos, obrigações requeridas e outras informações pertinentes para liberar o acesso de conexão em geração distribuída (ANEEL, 2012).

No estado do Paraná, as regras de acesso ao sistema de concessionária local, a COPEL descreve os requisitos para acesso de geradores de energia elétrica conectados através de unidades consumidoras e optantes pelo Sistema de Compensação de Energia Elétrica (COPEL, 2014).

2.9 GRUPOS GERADORES A BIOGÁS

Os motores a combustão revolucionaram a humanidade desde sua invenção, porém há uma pressão por mudanças na eficiência e na emissão de gases. Neste contexto a utilização de biocombustíveis é uma das soluções viáveis para este fato (ALAGUMALAI, 2014).

Segundo Çengel e Boles (2013), as eficiências térmicas para motores de ignição por centelha variam de cerca de 25% até 30%, enquanto nos motores ciclo Diesel, as eficiências variam entre 35 e 40%.

Os geradores elétricos acoplados no motor, no entanto, possuem eficiências maiores na conversão da energia mecânica para energia elétrica, variando entre 82 e 92%, que são apresentadas no manual do fabricante (MITZLAFF, 1988).

Para utilização com biogás, tradicionalmente vem sendo utilizados motores a diesel convertidos para biogás (LEÃO ENERGIA, 2015).

Segundo Pereira et al. (2005), na conversão do ciclo Diesel para o sistema Otto, o sistema de injeção de Diesel é retirado e, em seu lugar, instala-se um sistema de carburação do gás ao ar de admissão e o sistema elétrico com velas para a ignição, feita com centelha. A taxa de compressão também é alterada para se adequar às taxas dos motores ciclo Otto.

A qualidade do biogás pode interferir no funcionamento dos motores, podendo ocorrer detonação com diferentes composições de gás, devendo ser assegurado uma concentração de metano de pelo menos 45% (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2011).

Utilizando um microgerador para geração de eletricidade a partir de biogás de dejetos suíno, Pipatmanomai et al. (2009) obtiveram uma eficiência global na conversão em eletricidade de 20,8%.

Em uma adaptação para biogás, utilizando um motor a gasolina, Souza et al. (2010) obtiveram com uma potência de aproximadamente 1 kW uma eficiência média do conjunto de 8,22%.

Em um experimento testando a eficiência de grupos geradores de energia elétrica a biogás, Souza et al. (2013) encontraram uma eficiência de 17,29% com 50% de carga, enquanto em carga total a eficiência subiu para 22,21%.

Segundo Pecora (2006), na conversão para energia elétrica os motores possuem maior eficiência, já as turbinas possuem maior eficiência global de conversão quando operadas em cogeração (energia térmica e elétrica).

Martins e Oliveira (2011) afirmaram que na geração de energia elétrica a partir de biogás da digestão de dejetos suínos, embora seja possível sua comercialização, os seus resultados demonstraram que é mais vantajoso economicamente o uso da energia na propriedade rural, reduzindo o uso da energia elétrica da concessionária.

2.9.1 Custo da eletricidade

Cada companhia de distribuição de energia elétrica possui suas regras de tarifação. No estado do Paraná, a distribuidora de energia elétrica COPEL divide essa tarifação quanto ao fornecimento por níveis de tensão e quanto a estruturação tarifária (COPEL, 2014).

Na Tabela 4 são apresentadas as diferenças dos grupos conforme o nível de tensão.

Com a definição dos grupos, a estruturação tarifária é dividida em binômica para o Grupo A, conforme energia elétrica ativa consumida e demanda tarifária e monômica para o Grupo B, ou seja, tarifa unicamente ligada ao consumo de energia elétrica ativa (COPEL, 2014).

Na Tabela 5 são apresentadas algumas tarifas utilizadas com e sem imposto para o Grupo B (baixa tensão), considerando o reajuste aplicado no mês de junho de 2014 pela concessionária do estado do Paraná.

Tabela 4. Estruturação tarifária para consumo de energia elétrica

Grupo	Tensão
Grupo A	Entre 2,3 e 230 kV ou inferior a 2,3 kV
A1	230 kV ou mais
A2	88 a 138 kV
A3	69 kV
A3a	30 a 44 kV
A4	2,3 a 13,8 kV
AS (Subterrânea)	> 2,3 kV – sistema subterrâneo somente
Grupo B	Inferior a 2,3 kV
B1 – Residencial	
B1 – Residencial Baixa Renda	
B2 – Rural	
B2 – Cooperativa de utilização rural	< 2,3 kV
B2 – Serviço público de irrigação	
B3 – demais classes	
B4 – Iluminação pública	

Fonte: COPEL (2014)

Tabela 5. Tarifas de energia elétrica por classe para reajuste de junho de 2014

Classe Tarifária	Tarifa em R\$/kWh	
	Sem impostos	Com impostos ICMS e PIS/COFINS
Residencial		
B1 – Convencional	0,32637	0,49078
B1 – Convencional Baixa Renda*	0,1120 - 0,32001	0,11727 – 0,48121
Rural		
B2 – Convencional Rural	0,20562	0,3092
B2 – Convencional rural serviço de irrigação	0,08224	0,12366
Comercial		
B3 – Demais Classes	0,32637	0,49078

Fonte: COPEL (2014)

*Valor variável conforme faixa de consumo

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O local escolhido para realizar a implantação do estudo está localizado na área rural do município de São Miguel do Iguaçu, no oeste do estado do Paraná.

As temperaturas médias encontradas no município nos meses mais frios ficam entre 14 e 16°C, e nos meses mais quentes entre 25 e 35 °C, possuindo uma temperatura média anual de 22°C (SÃO MIGUEL DO IGUAÇU, 2014).

A propriedade suinícola chama-se Granja São Pedro, também chamada de Granja Colombari e está localizada nas coordenadas geográficas 25°29'53" S e 54°13'29" O, com aproximadamente 250 m de altitude.

Na Figura 3 é apresentada uma vista do local da propriedade com os galpões onde está abrigada a atividade de suinocultura.



Figura 3. Vista aérea da Granja Colombari

Além da atividade de suinocultura que utiliza uma área de aproximadamente 50 hectares da propriedade, ainda há criação de bovinos em confinamento e extensivamente, e também áreas destinadas a agricultura convencional.

3.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

A granja trabalha com o sistema de crescimento e terminação de suínos. O ciclo compreende a engorda do animal de, em média, 25 kg até 110 kg, quando o animal é entregue para a integradora, processo que leva em torno de 100 dias.

Na Figura 4 é ilustrado um fluxograma com o sistema produtivo da Granja Colombari.

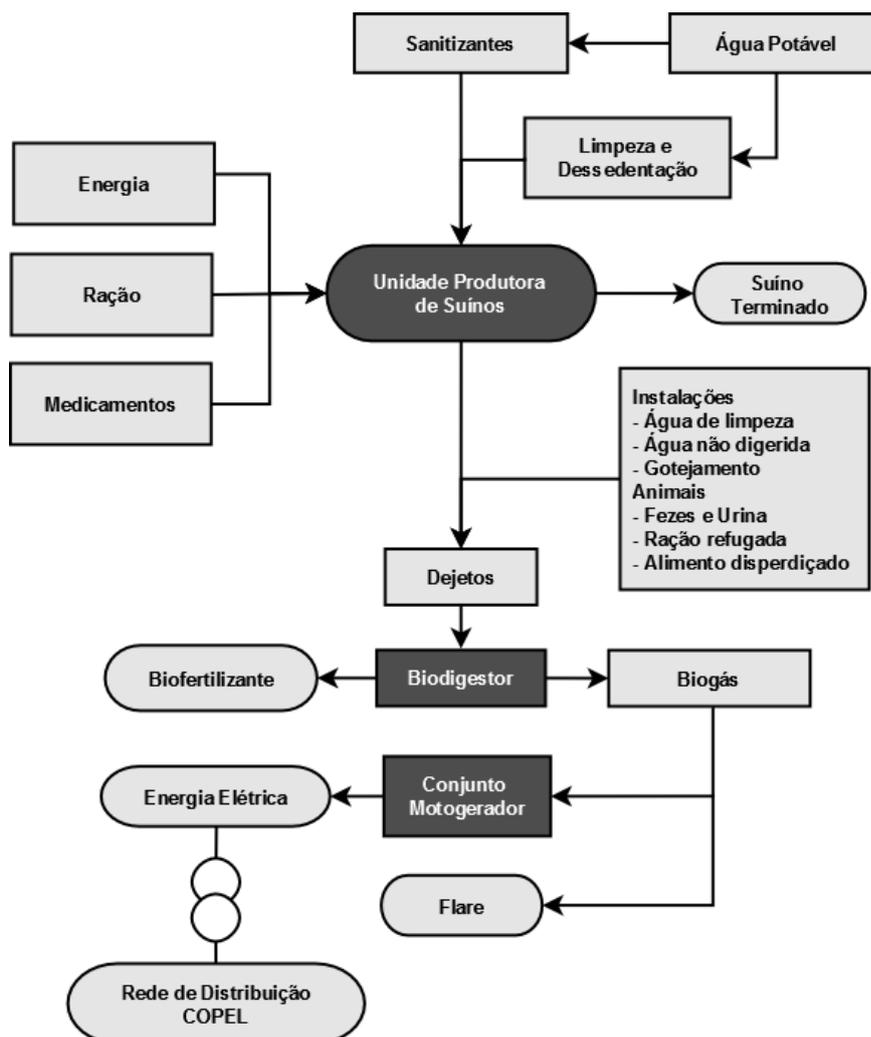


Figura 4. Fluxograma do processo produtivo

3.2.1 Geração de dejetos

A geração de dejetos ocorre nos galpões de criação da granja. Cada galpão é composto por diversas baias que possuem aproximadamente 42 m² e comporta 42 suínos cada, utilizando o sistema de criação em lâminas d'água.

A limpeza ocorre sempre que necessário por raspagem após monitoramento visual, sendo realizada durante todo o ciclo de terminação,

praticamente todos os dias durante a manhã.

No final do ciclo de terminação, ocorre a limpeza sanitária, quando é realizada a desinfecção das baias e dos galpões com aspersão de sanitizantes.

Após a limpeza das baias, os dejetos são encaminhados via tubulação para o sistema de tratamento de dejetos. Este sistema é composto por dois biodigestores modelo de fluxo tubular (*plug flow*) em série e com alimentação semi-contínua. .

3.2.2 Tratamento da biomassa residual

Em 2006, a produção de suínos na Granja Colombari possuía somente um biodigestor para o tratamento de dejetos de cerca de 4.000 suínos, com uma vazão que era de aproximadamente $29 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$, e tempo de retenção hidráulico (TRH) de 30 dias.

Com a ampliação do plantel para capacidade de criação de 5.000 suínos, surgiu a necessidade da construção de um segundo biodigestor com o objetivo de manter o mesmo TRH para a nova vazão de aproximadamente $36 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$.

O segundo biodigestor iniciou sua operação no ano de 2010, e não houve manutenções até o término deste estudo. No entanto, o primeiro biodigestor devido ao maior tempo de implantação (2006), necessitou de uma manutenção em 2011 para remoção do excesso de lodo, e retorno às condições operacionais de projeto.

Os biodigestores ligados em série possuem dimensões diferenciadas, e na Tabela 6 são apresentadas estas dimensões, o volume útil de projeto e o TRH de cada um deles.

Tabela 6. Dimensões e volume dos biodigestores

Biodigestores	Dimensões (m)			Volume útil (m ³)	TRH (dias)
	Comprimento	Largura	Profundidade		
Biodigestor 1	25	10	4	845	23
Biodigestor 2	16	8,5	2	245	7

Ressalta-se que os volumes estimados são determinados em projeto e podem diferir da verdadeira realidade pois é natural que ocorra o assoreamento neste tipo de biodigestor devido às suas características hidrodinâmicas. Os biodigestores instalados são apresentados na Figura 6.

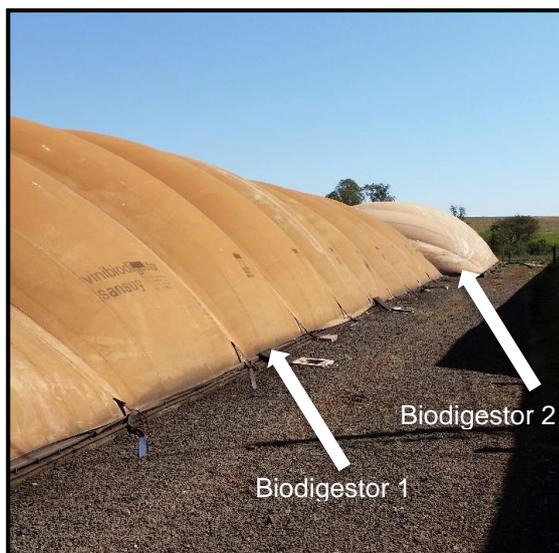


Figura 5. Biodigestores em série no tratamento de dejetos

Após a passagem pelo sistema de biodigestão, o efluente é encaminhado a uma lagoa de decantação e, posteriormente, é utilizado como biofertilizante na pastagem da granja.

3.2.3 Utilização do biogás

O aproveitamento do biogás na propriedade é realizado por uma tubulação de PVC de 100 mm que realiza a ligação dos biodigestores ao grupo gerador.

O grupo gerador instalado possui capacidade nominal de 104 kVA, porém atualmente está gerando em média de 50 kWh de energia elétrica e um consumo de $43 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de biogás. Na Figura 6 é ilustrado o grupo gerador instalado para geração de energia elétrica a partir do biogás.

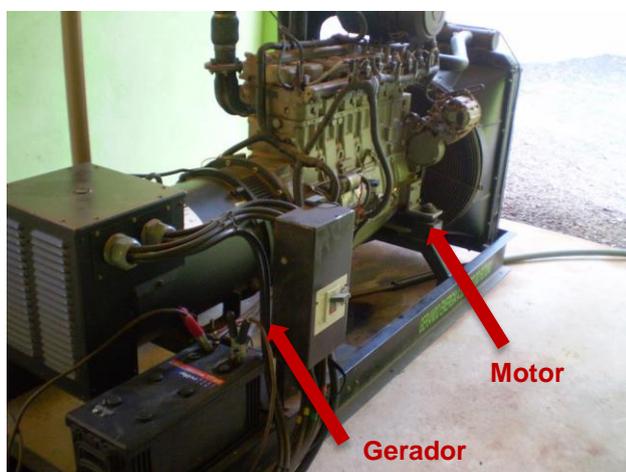


Figura 6. Grupo gerador a biogás de 104 kVA

As características técnicas do grupo gerador estão descritas abaixo:

- Motor Diesel convertido para biogás (Otto) - MWM 6.12T;
- Rotação: 1800 rpm;
- Gerador Gramaco G2R 200 MB4;
- Número de pólos: 4 ;
- Tensão regulada Fase-Neutro: 127 V;
- Potência nominal: 104 kVA;
- Eficiência (η) para $\cos \varphi = 1$: 92,9%.

A energia elétrica produzida pelo grupo gerador visa suprir a demanda interna da propriedade e o excedente é exportado para rede de distribuição em regime de compensação.

O consumo total de combustível do grupo gerador geralmente é inferior a produção diária de biogás nas propriedades, sendo necessário a realização do controle de pressão nos biodigestores, pois essa pressão pode exceder os valores suportados pelas lonas de cobertura, danificando o sistema.

Assim, quando a pressão interna dos biodigestores atinge cerca de 17 mmH₂O, aciona-se o *flare* que realiza a queima dos gases para realizar o alívio da pressão. O queimador mantém-se acionado até a pressão chegar em aproximadamente 13 mmH₂O.

3.3 PARÂMETROS MONITORADOS

Para desenvolvimento deste estudo foram monitorados alguns parâmetros que são ambientais, mecânicos ou elétricos.

Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros que foram monitorados, suas unidades e respectivos instrumentos de medida.

Tabela 7. Lista de parâmetros monitorados na Granja Colombari

Parâmetro	Unidade	Instrumento
Biogás		
Concentração de metano	%	Analisador de gases
Consumo do motor	Nm ³ .h ⁻¹	Transmissor de vazão termal
Consumo do <i>flare</i>	Nm ³ .h ⁻¹	Transmissor de vazão termal
Temperatura	°C	Termorresistências PT100

Parâmetro	Unidade	Instrumento
Energia Elétrica		
Geração de energia elétrica	kWh	Multimedidores de energia elétrica
Consumo de energia elétrica	kWh	
Funcionamento motor	h	Relé com contador digital
Ambiente		
Temperatura ambiente	°C	Termorresistência PT100

3.4 COLETA E REGISTRO DE DADOS

Os dados obtidos do biogás, do ambiente e de energia elétrica são coletados e enviados automaticamente para um banco de dados remoto a cada minuto. Este sistema coletou informações das diferentes variáveis do mês de abril até o mês de dezembro de 2014.

O sistema supervisorio utiliza como subsídio as informações armazenadas no banco de dados para exibir na sua interface, gerar os gráficos correspondentes, ter uma visualização *online* da situação da produção de biogás, geração de energia elétrica e outras informações da propriedade.

Na Figura 7 é ilustrado como foi realizada a rotina de coleta dos dados até o armazenamento em banco e utilização pelo sistema supervisorio.

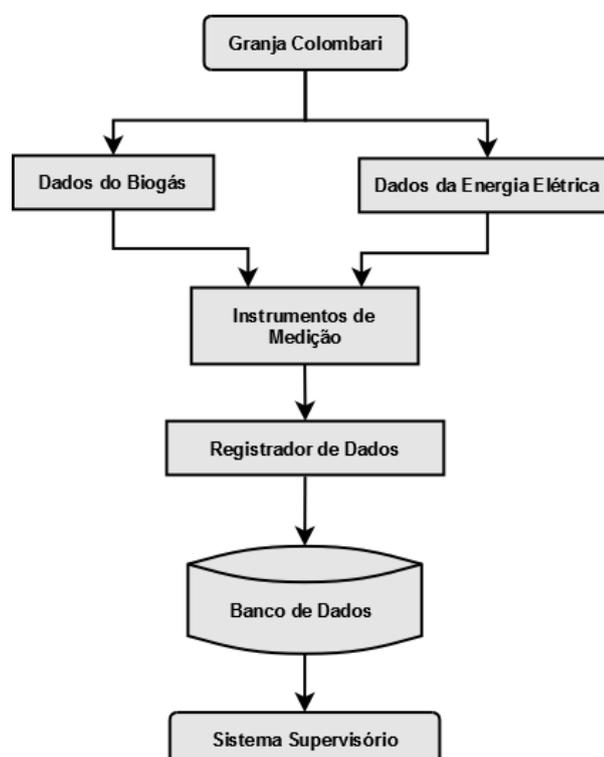


Figura 7. Fluxograma da coleta e armazenamento dos dados na propriedade

O painel de monitoramento foi montado nas instalações do ITAI (Instituto de Tecnologia Aplicada e Inovação) e depois levado ao local de estudo.

Este painel abriga um registrador de dados com interface *ethernet* e um roteador que faz a interligação com a máquina de envio ao banco de dados localizado remotamente. O painel de monitoramento utilizado no estudo é ilustrado na Figura 8.

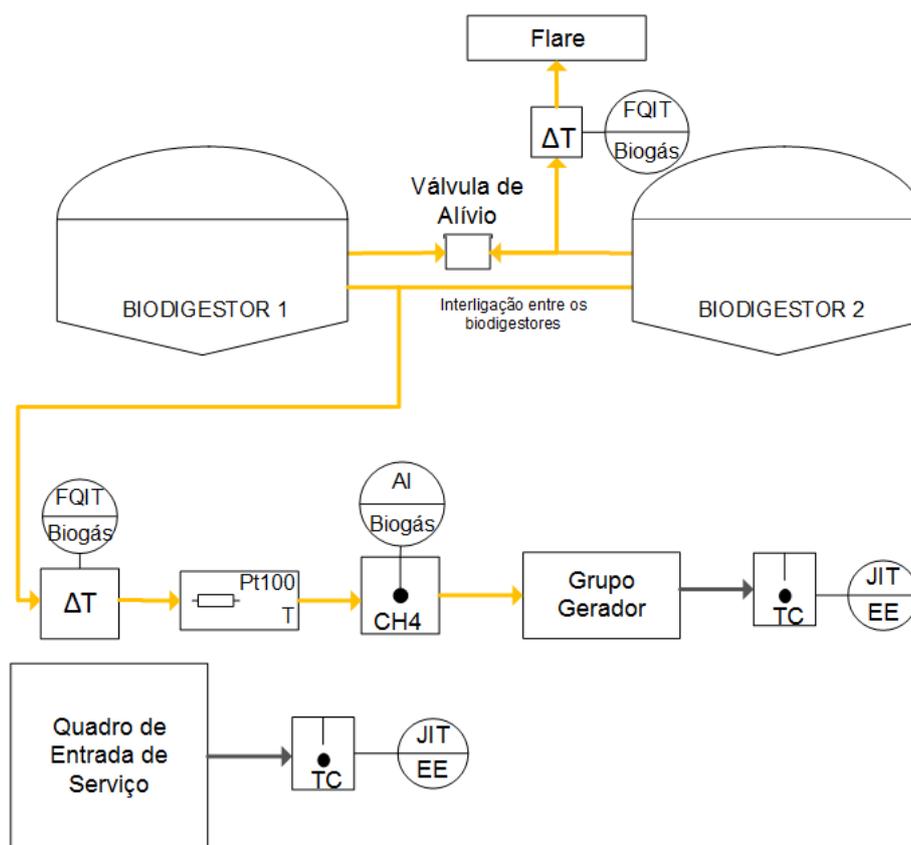


Figura 8. Painel de monitoramento instalado na propriedade

3.4.1 Pontos de coleta e localização dos instrumentos

Os pontos de coleta de dados envolvem os mais diversos parâmetros de biogás, energia elétrica e do ambiente. Todos eles estão localizados em pontos específicos na propriedade da granja, desde a produção de biogás até geração de energia elétrica.

Na Figura 9 é ilustrado um diagrama esquemático com a localização dos pontos de medição e os instrumentos utilizados no estudo.



Legenda:

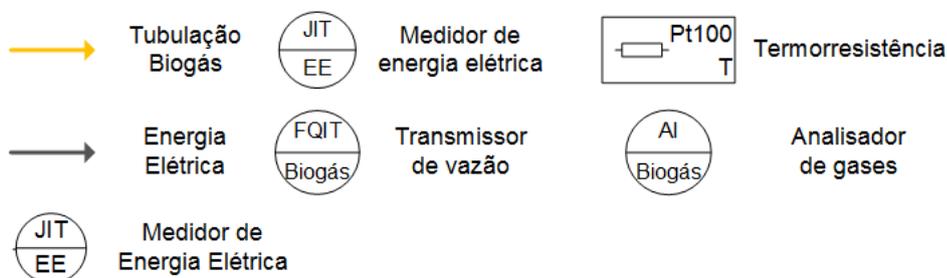


Figura 9. Diagrama esquemático da localização dos instrumentos de medição

3.5 PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Para medição de vazão ou fluxo de biogás foram utilizados dois transmissores de vazão da marca Magnetrol®, modelo Thermanel® TA2. O transmissor realiza a medição de vazão mássica através da dispersão térmica, já compensando as diferenças de temperatura e pressão.

Na Tabela 8 são apresentadas as especificações técnicas do sensor de vazão utilizado.

Tabela 8. Características do transmissor de vazão

Característica	Valor
Grandeza	Vazão
Método de medição	Medição de fluxo mássico através da diferença de temperatura
Exatidão (vazão)	$\pm 1\%$ da leitura + 0,5% do F.E.
Faixa de medição (vazão)	0 a 116 Nm ³ .h ⁻¹
Alimentação	24 Vcc
Sinal	Analógico (4-20 mA)

Na Figura 10 é ilustrado o medidor de fluxo de biogás utilizado para medir o biogás consumido no *flare* e no grupo gerador.

**Figura 10.** Medidor de vazão da marca Magnetrol

Para realizar as comparações na produção de biogás com a temperatura ambiente foi instalada uma termorresistência Pt100 à 3 fios, marca Alutal®. O sensor foi instalado externamente à casa de força em um local protegido da luz solar e de outras intempéries. Na Tabela 9 são apresentadas as especificações técnicas deste sensor de temperatura utilizado.

Tabela 9. Características da termorresistência

Característica	Valor
Grandeza	Temperatura
Método de medição	Diferença de resistência
Exatidão	$\pm 0,65\%$ para o F.E.
Faixa de medição	-200 a 200 °C
Alimentação	-
Sinal	Três fios (Resistência)

As medições de temperatura ambiente e produção de biogás compreenderam o período entre abril e dezembro de 2014.

3.6 ACOMPANHAMENTO DA QUALIDADE DO BIOGÁS

Para determinar a qualidade do biogás, ou seja, a concentração de metano presente foi utilizado um medidor de concentração de metano (CH₄) com sensor de infravermelho. O transmissor, modelo Guardian® Plus, realiza a medição constante da concentração, numa faixa de 0 a 100% do volume de gás.

Na Tabela 10 são apresentadas as especificações técnicas do analisador de gás utilizado.

Tabela 10. Características do analisador de concentração de metano

Característica	Valor
Grandeza	Concentração de metano
Método de medição (CH ₄)	Célula infravermelho (NDIR)
Exatidão (CH ₄)	± 2 % para o F.E.
Faixa de medição (CH ₄)	0 a 100 %
Alimentação	127 Vca
Sinal	Analógico (4-20 mA)

Na Figura 11 é ilustrado o medidor de qualidade do biogás instalado para monitoração contínua da concentração de metano.



Figura 11. Transmissor de concentração de metano

As medições da concentração de metano foram realizados continuamente durante os meses de junho, julho, agosto e dezembro de 2014. Nos meses de

setembro, outubro e novembro, o medidor foi retirado para manutenção e calibração e portanto não houve medições neste período.

3.7 CONSUMO E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O consumo e geração de energia elétrica foram monitorados por dois multimedidores de grandezas elétricas. Estes medidores foram instalados em dois locais, no quadro de carga de propriedade e no painel do grupo gerador.

Na Figura 12 é ilustrado o diagrama de conexão da propriedade rural com a rede e a localização dos medidores.

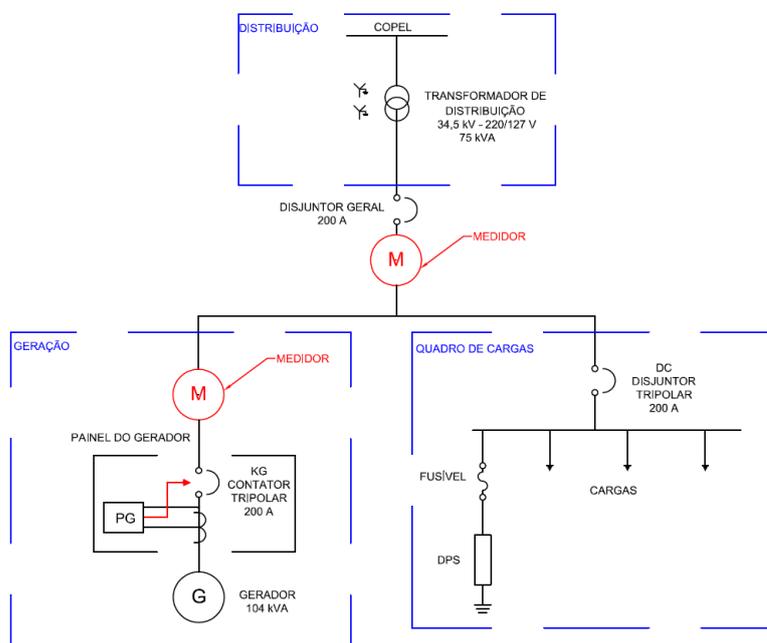


Figura 12. Diagrama esquemático das ligações e local dos medidores de energia

Na Tabela 11 são apresentadas as especificações técnicas do multimedidor de grandezas elétricas utilizado no estudo.

Tabela 11. Características do medidor de energia

Característica	Valor
Grandezas	Tensão, Corrente e Potência
Exatidão (tensão e corrente)	0,5% da medição \pm 2 dígitos
Exatidão (potências)	1% da medição \pm 2 dígitos
Faixa de medição (tensão)	0 a 300 Vca. (Fase – Neutro)
Faixa de medição (corrente)	0 a 5 A
Frequências	50/60 Hz
Alimentação	220 Vca
Sinal	Digital (RS-485)

Na Figura 13 é ilustrado o modelo UPD200, marca Ciber, que foi utilizado para monitorar as grandezas elétricas.



Figura 13. Multimedidor de grandezas elétricas

A corrente máxima suportada pelo multimedidor é de apenas 5 A, deste modo é necessário a utilização de transformadores de corrente. O transformador de corrente utilizado é da marca Siemens. Na Tabela 12 são apresentadas as especificações técnicas básicas do transformador de corrente (TC) utilizado.

Tabela 12. Características do transformador de corrente

Característica	Valor
Grandezas	Corrente
Relação de transformação	200 / 5 A
Exatidão	0,6%
Sinal	Corrente (0 a 5 A)

O tempo de operação dos grupos geradores também foi monitorado. Para isso um relé com contato seco foi instalado e era acionado quando o grupo gerador era ligado, e com auxílio de um contador digital foram contabilizadas as horas de operação.

3.8 CONSUMO ESPECÍFICO DE BIOGÁS DO GRUPO GERADOR

Um das maneiras de descrever a eficiência de um grupo gerador é pelo consumo específico de combustível. Com a obtenção dos dados de consumo instantâneo de biogás ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) e a potência instantânea ativa gerada (kW) pode-se

calcular o consumo específico (ÇENGEL e BOLES, 2013).

Na Equação (1) é apresentado como deve-se calcular o consumo específico de combustível (cec), em $m^3.kWh^{-1}$.

$$cec = \frac{Q}{P} \quad (1)$$

onde Q = vazão instantânea de biogás do grupo gerador ($m^3.h^{-1}$)

P = potência ativa gerada (kW)

Nesta avaliação do estudo foram utilizados como instrumentos de medição de vazão instantânea de biogás o transmissor de vazão termal, Thermatel® TA2, descrito no item 3.5, e também o multimedidor de energia elétrica UPD200, descrito no item 3.7.

3.9 EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO DE BIOGÁS EM ENERGIA ELÉTRICA

O desempenho de um motor-gerador varia com a carga, ou seja, quanto maior a carga do motor maior a eficiência global. Para conhecer melhor este desempenho deve-se calcular esta eficiência.

O cálculo da eficiência global de conversão de biogás em energia elétrica (η) é dada pela Equação (2) (MITZLAFF, 1988).

$$\eta = \frac{P}{Q \cdot PCI_{biogás,comp.}} \quad (2)$$

onde $PCI_{biogás,comp.}$ = poder calorífico inferior do biogás compensado ($kWh.m^{-3}$)

Para o cálculo de eficiência do motor (η_{motor}), deve-se considerar a eficiência do gerador ($\eta_{gerador}$) na conversão mecânica para energia elétrica. Essa eficiência é designada pelo fabricante do gerador. Na Equação (3) é apresentado o cálculo realizado.

$$\eta_{motor} = \frac{\eta}{\eta_{gerador}} \quad (3)$$

O teste de eficiência energética foi realizado no dia 17 de dezembro de 2014. No controlador do grupo gerador foram realizados os ajustes para variar a carga do grupo gerador com incrementos de 5 kW a cada 10 minutos de 15 a 70 kW. As medições foram realizadas a cada minuto pelo sistema remoto de coleta de dados.

Para obtenção dos valores de potência ativa (kW), foi utilizado o multimedidor de energia elétrica UPD200 descrito no item 3.7, e para obtenção dos valores de consumo instantâneo de biogás foi utilizado o transmissor de vazão, Thermatel® TA2, descrito no item 3.5.

No entanto, para realizar a obtenção do poder calorífico inferior (PCI) do biogás, em kWh.m⁻³, deve-se realizar a compensação da densidade do metano, (parte combustível do biogás), pela temperatura desejada com os valores padrões do poder calorífico do metano (MITZLAFF, 1988). Na Equação (4) é descrito como obter a densidade do metano compensada pela temperatura ($\rho_{CH_4,comp.}$).

$$\rho_{CH_4,comp.} = \rho_{CH_4,padr\tilde{a}o} \cdot \frac{T_{padr\tilde{a}o}}{T_{medida}} \quad (4)$$

onde $\rho_{CH_4,comp}$ = densidade do metano compensada (kg.m⁻³)

$\rho_{CH_4,padr\tilde{a}o}$ = densidade do metano nas condições padrões (0,71746 kg.m⁻³)

$T_{padr\tilde{a}o}$ = temperatura do metano nas condições padrões (273 K)

T_{medida} = temperatura do metano nas condições medidas (K)

Em posse da informação da densidade calculada para a temperatura desejada obtém-se o poder calorífico do biogás com a concentração de metano e o PCI padrão para o gás metano. Na Equação (5) é demonstrado o cálculo utilizado.

$$PCI_{biog\tilde{a}s,comp.} = \%_{CH_4} \cdot \rho_{CH_4,comp.} \cdot PCI_{padr\tilde{a}o} \quad (5)$$

onde $\%_{CH_4}$ = concentração de metano no biogás (%)

$\rho_{CH_4,comp.}$ = densidade do metano compensada (kg.m⁻³)

$PCI_{CH_4,padr\tilde{a}o}$ = poder calorífico inferior do metano padrão (13,9 kWh.kg⁻¹)

No entanto, a vazão coletada está em Nm³.h⁻¹ (metros cúbicos normais) de biogás, e deve ser corrigida para temperatura de medição trabalhada. A partir da Equação (4) que realiza a compensação da densidade, pode-se calcular a vazão de biogás corrigida, como demonstrada na Equação (6).

$$Q_{biog\tilde{a}s,comp} = Q_{biog\tilde{a}s,padr\tilde{a}o} \cdot \frac{T_{medida}}{T_{padr\tilde{a}o}} \quad (6)$$

onde $Q_{biog\tilde{a}s,comp.}$ = vazão de biogás compensada (m³.h⁻¹)

$Q_{biog\tilde{a}s,padr\tilde{a}o}$ = vazão de biogás normalizada (Nm³.h⁻¹)

Para obtenção dos valores de temperatura foi instalado na tubulação de biogás próximo ao grupo gerador um sensor de temperatura de mesmo modelo do

sensor de temperatura ambiente, uma termorresistência PT100, descrita no item 3.5.

Na Figura 14 é ilustrado o sensor de temperatura utilizado na medição da temperatura do biogás na entrada do grupo gerador.



Figura 14. Termorresistência Pt100

Para as informações de concentração de metano, foi utilizado o transmissor de concentração de metano Guardian® Plus, descrito no item 3.6.

3.10 CUSTO EVITADO DE ENERGIA ELÉTRICA

A Granja Colombari adota como sistema de geração distribuída de energia elétrica o regime de compensação, instituído pela resolução ANEEL Nº 482 de 2012 e com acesso regulamentado pela NTC 905200 da COPEL.

A tarifa adotada pela COPEL é a B2 – convencional rural, que possui como custos tarifários o valor R\$ 0,20562/kWh mais impostos resultando num valor de R\$ 0,30920 por kWh (COPEL, 2014).

Porém com a isenção de ICMS para produtores rurais, o valor da tarifa fica com somente a adição dos impostos PIS/COFINS (0,8% e 3,7%), resultando num valor médio de R\$ 0,21581.

Na Equação (7) é apresentado o cálculo realizado para obter o custo evitado de energia elétrica autoconsumida (*ceee*), ou seja, a energia elétrica que foi aproveitada enquanto o grupo gerador estava operando.

$$ceee = (EEC_{total} - EEC_{rede}) \cdot ctee \quad (7)$$

onde EEC_{total} = energia elétrica consumida total (kWh)

EEC_{rede} = energia elétrica consumida da rede (kWh)

$ctee$ = custo da tarifa de energia elétrica (R\$.kWh⁻¹)

A energia elétrica exportada para a rede, poderá retornar em forma de compensação, ou seja, irá abater os valores de consumo da rede. Caso a quantidade de energia exportada seja maior que o valor consumido da rede de distribuição, o valor é acumulado em um banco de energia elétrica, e poderá ser utilizado quando o valor de energia consumida for maior que a energia obtida da rede.

De acordo com resolução ANEEL N° 414 de 2010, os consumidores responsáveis por unidade consumidora do grupo B deverão arcar com um custo de disponibilidade do sistema elétrico, que no caso da Granja Colombari, por ser uma rede trifásica, equivale a 100 kWh por mês, ou seja, deve-se pagar um valor mínimo de R\$ 21,58 (impostos incluídos) (ANEEL, 2010).

Na Equação (8) é apresentado o cálculo realizado para o valor da conta de luz paga pelo produtor rural, considerando que a quantidade de energia exportada no mês seja maior que o consumida.

$$ccl = (EEC_{rede} \cdot Impostos) + tm \quad (8)$$

onde ccl = custo conta de luz (R\$)

EEC_{rede} = energia elétrica consumida da rede (kWh)

Impostos = tributação referente ao PIS/COFINS (0,0092934 R\$.kWh⁻¹)

tm = tarifa mínima - disponibilidade (21,581 R\$)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PRODUÇÃO DE BIOGÁS NA UNIDADE

A produção de biogás foi registrada dos meses de abril a dezembro de 2014. Na Figura 15 é apresentado um gráfico com a produção total de biogás por mês (m^3), a produção diária média e a quantidade média de cabeças de animais por dia no período monitorado.

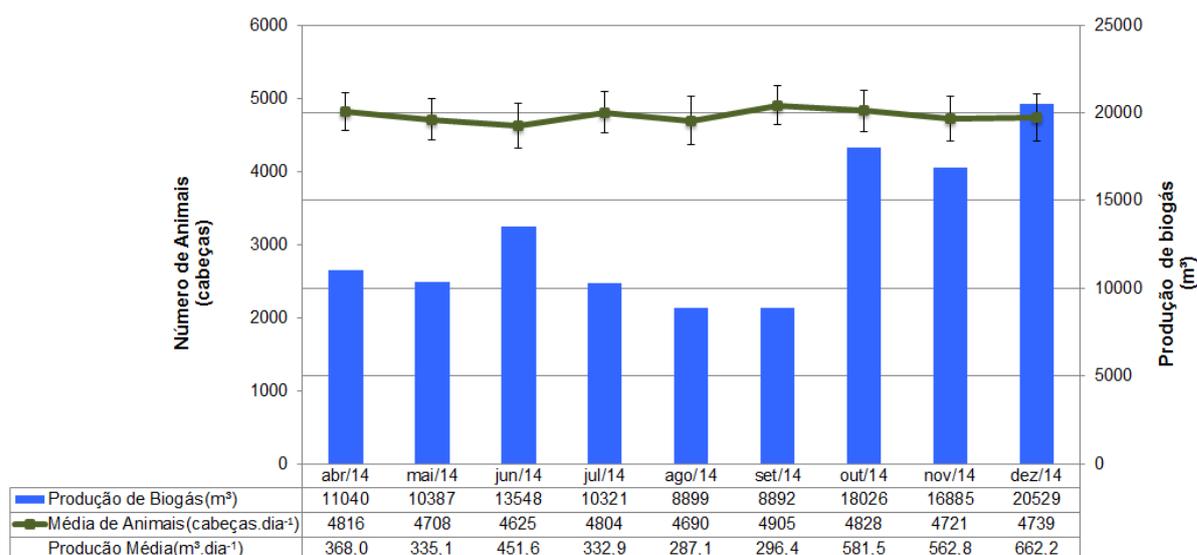


Figura 15. Produção mensal de biogás, produção diária média de biogás e quantidade média de animais

A produção mensal média de biogás foi de $13.169,5 \pm 4063,6 m^3$. Considerando os dias monitorados, a produção diária média foi de $430,8 \pm 139,4 m^3$ com uma quantidade diária média de 4760 ± 86 animais, ou seja, uma produção média de $0,10 \pm 0,03 m^3$ de biogás por suíno em terminação alojado. Este valor está bem abaixo de Dal Mago (2009) e Gusmão (2008) que encontraram valores de $0,22$ e $0,26 m^3$.animal⁻¹.dia⁻¹, respectivamente. Ambos estudaram a produção de biogás em biodigestores tubulares a partir de dejetos de suínos em terminação.

Observa-se que nos meses subsequentes aos meses de setembro e agosto houve uma maior produção de biogás, o que pode estar relacionado ao aumento da temperatura e também da produção de dejetos.

Na Figura 16 é apresentado um gráfico com a produção média diária de biogás relacionando com duas faixas de temperatura ($20 - 25 ^\circ C$ e $25 - 30 ^\circ C$) com as médias dos meses monitorados.

A temperatura média durante os meses do estudo foi de $24,7 \pm 3,6 ^\circ C$. O

mês de julho foi o mais frio com uma temperatura média de 20,6 °C, enquanto o mês de abril foi o mais quente com um média de 30,4 °C.

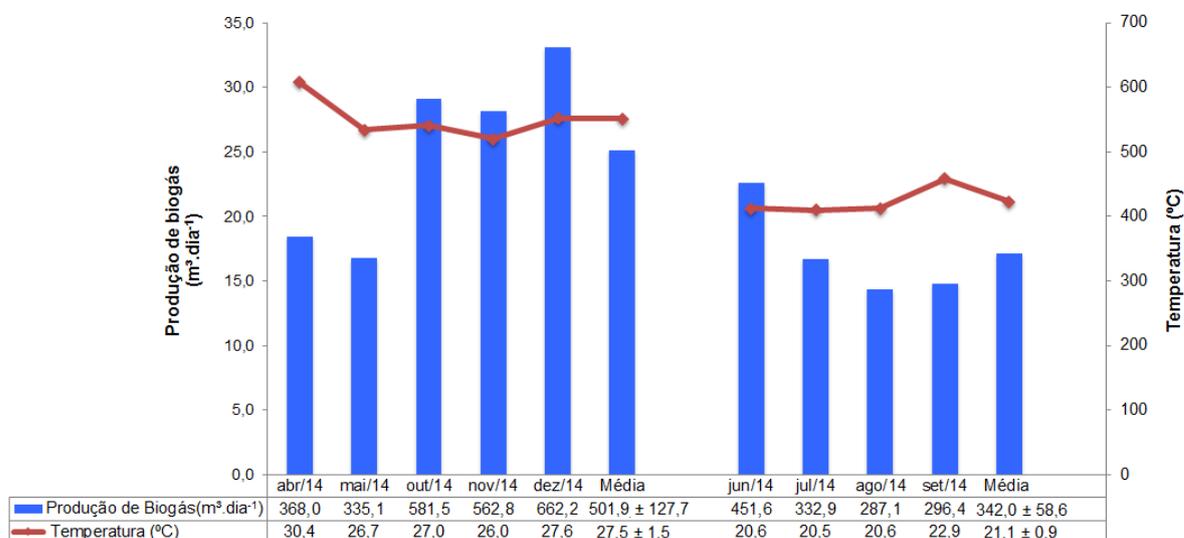


Figura 16. Produção média diária de biogás e temperatura média mensal

Nos meses de julho, agosto e setembro, as temperaturas médias foram mais baixas, e conseqüentemente a produção de biogás foi menor. Esta diminuição na produção, segundo Chernicharo (2007), está relacionada a diminuição na atividade microbiana em função temperatura, típica de tratamentos biológicos.

A temperatura influencia diretamente na eficiência dos biodigestores, e conseqüentemente na produção de biogás, conforme relatado por Kunz et al. (2005) que avaliou a remoção de carga orgânica em biodigestores tubulares.

Considerando essas duas faixas de temperatura e a quantidade de suínos nos respectivos meses do ano, obteve-se uma média de produção diária de biogás por cabeça de suíno de $0,11 \pm 0,03 \text{ m}^3$ nos meses mais quentes e $0,07 \pm 0,02 \text{ m}^3$ nos meses mais frios.

4.2 ACOMPANHAMENTO DA QUALIDADE DO BIOGÁS

Na Figura 17 é apresentado um gráfico com a concentração média de metano no biogás ao longo dos meses de estudo.

A concentração média de metano foi de $68,3 \pm 3,7\%$ ao longo dos meses monitorados. O menor valor medido foi no mês de julho, 60,5%, e o maior valor encontrado foi no mês de dezembro, 74,9%. O valor médio encontrado corresponde a um poder calorífico inferior de aproximadamente $6,1 \text{ kWh.m}^{-3}$ de biogás, segundo

Mitzlaf (1988) e Çengel e Boles (2013).

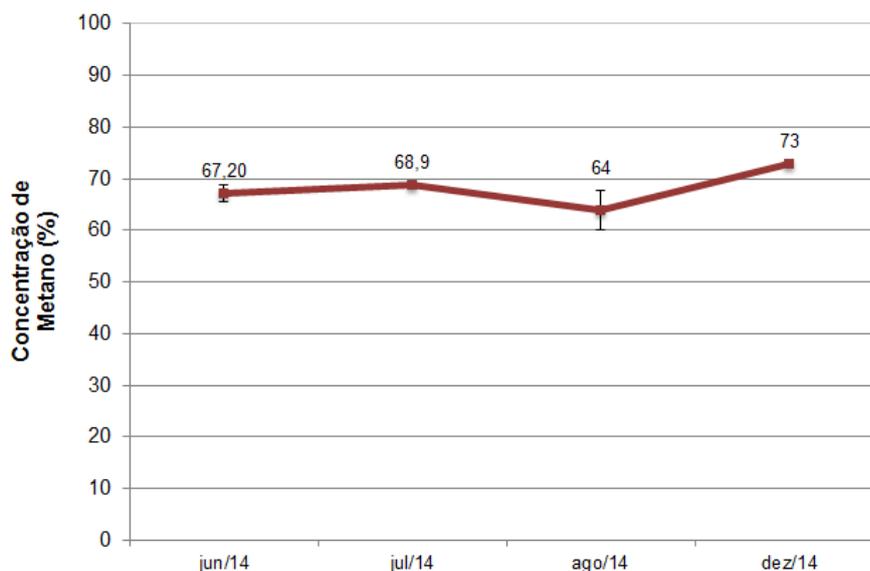


Figura 17. Concentração média de metano no biogás

Este valor médio de 68,3% é superior ao valor encontrado por Miranda et al. (2008) que obteve concentrações de metano entre 64,5 e 67,3% para suínos em crescimento e terminação, porém está muito próximo a concentração de 69%, resultado encontrado por Oliveira e Hiragashi (2006), a partir de dejetos deste mesmo tipo de criação de suínos.

Nos meses de setembro, outubro e novembro não houve medições pois o medidor foi retirado para manutenção e calibração.

4.3 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E OPERAÇÃO DO GRUPO GERADOR

Para avaliação da geração de energia elétrica, na Figura 18 é apresentado um gráfico com uma média mensal da produção diária de energia elétrica e operação do grupo gerador.

A média de operação do grupo gerador foi de $6,5 \pm 1,2$ horas por dia, enquanto a produção média de energia elétrica foi de $324,5 \pm 70$ kWh.dia⁻¹, durante todo o período monitorado. Nos meses de agosto e setembro de 2014, a geração de energia elétrica foi quase nula. Isto aconteceu devido a problemas mecânicos do grupo gerador e dificuldade de conseguir as peças de reposição paralisando totalmente a operação.

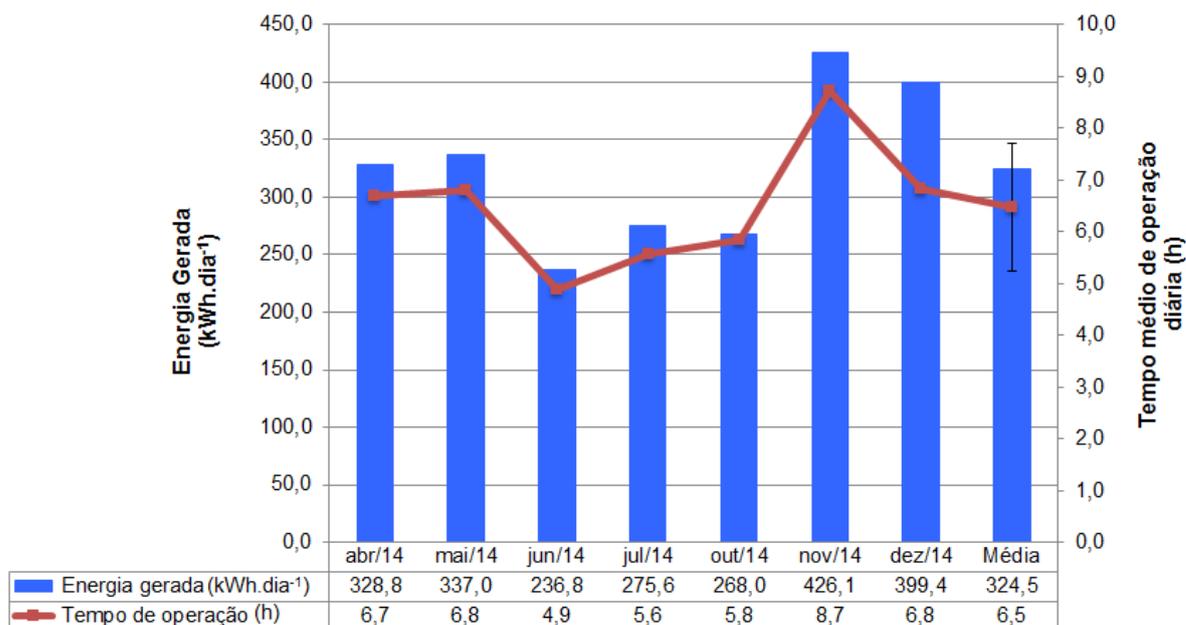


Figura 18. Tempo médio de operação diário e energia média gerada

4.4 CONSUMO ESPECÍFICO DO GRUPO GERADOR

Na Figura 19 pode ser observado um gráfico com uma relação entre o consumo específico de combustível (cec) e a média de potência ativa gerada durante a operação do grupo gerador.

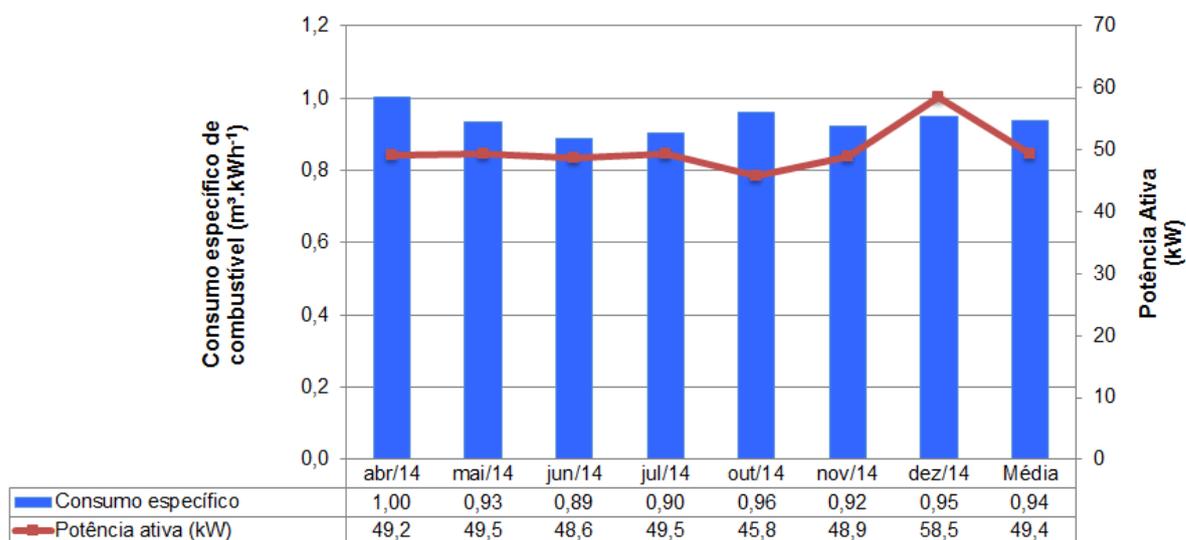


Figura 19. Consumo específico de biogás e potência ativa média

A média de consumo específico de biogás foi de $0,94 \pm 0,04 \text{ m}^3.\text{kWh}^{-1}$ de energia para uma potência ativa de $49,4 \pm 4,0 \text{ kW}$. A capacidade do grupo gerador é maior porém o produtor achou mais conveniente ajustar o controlador do grupo para gerar somente 50 kW, e suprir somente a demanda de energia elétrica interna.

No mês de dezembro, com o aumento de consumo da propriedade e também uma maior disponibilidade de biogás, o grupo gerador foi ajustado para 60 kW, obtendo uma média de 58,5 kW, ainda abaixo de sua capacidade nominal.

4.5 EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO DE BIOGÁS EM ENERGIA ELÉTRICA

No dia 17 de dezembro de 2014 foi realizado o ensaio de eficiência do grupo gerador. Na Tabela 13 são apresentados os resultados obtidos a partir dos medidores instalados e o valor do poder calorífico compensado ($PCI_{\text{biogás,comp.}}$).

Tabela 13. Valores encontrados para o ensaio de eficiência

Potência (kW)	Vazão corrigida ($m^3 \cdot h^{-1}$)	Concentração de metano (%)	Temperatura do biogás ($^{\circ}C$)	$PCI_{\text{biogás,comp.}}$ ($kWh \cdot m^{-3}$)
15	28,9	72,0	30,2	6,5
20	31,4	72,5	30,4	6,5
25	34,6	72,6	30,4	6,5
30	38,3	72,6	29,9	6,5
35	41,3	72,7	29,3	6,5
40	44,9	72,7	29,3	6,6
45	47,5	72,9	29,3	6,6
50	50,3	72,9	29,3	6,6
55	53,8	72,9	29,3	6,6
59	56,5	72,9	29,3	6,6
64	58,8	72,9	29,3	6,6
70	62,2	73,0	29,2	6,6

A partir das informações pode ser realizado o cálculo de eficiência global do sistema e do motor. Na Figura 20 pode ser observado um gráfico com as eficiências conforme as diferentes cargas aplicadas.

A eficiência global do grupo gerador na conversão de energia do biogás em energia elétrica a carga máxima (100%) foi 17 %, enquanto a 50 % da carga foi de 14,3%. Pipatnomanai et al. (2009) utilizou um gerador de pequeno porte a biogás (1,6 kW), conseguiu uma eficiência de 20,8%.

Retirando-se a eficiência média do gerador, que segundo o fabricante é de 92,9%, obteve-se uma eficiência de 18,3% somente do motor, para conversão do biogás em energia mecânica.

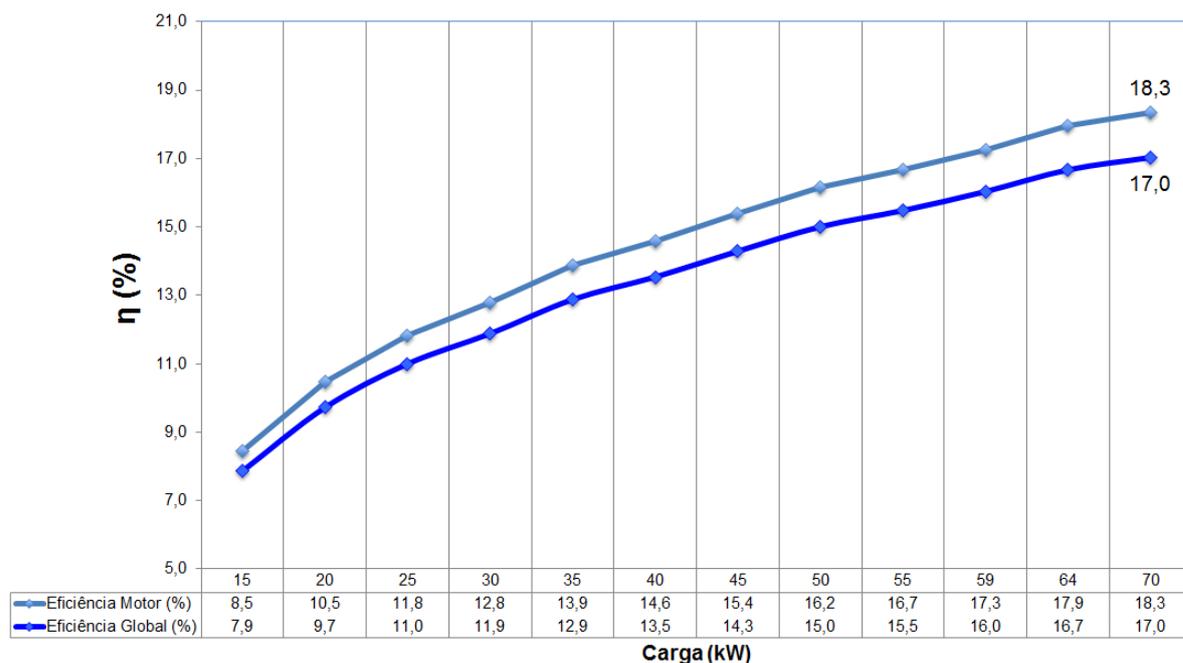


Figura 20. Eficiência global do conjunto motogerador e do motor

Para Çengel e Boles (2013), em motores a combustão interna com ignição por centelha, como utilizado neste estudo, as eficiências variam entre 25 e 30%, superior em mais de 25% ao rendimento encontrado neste estudo.

Na Figura 21 é ilustrado um gráfico com o consumo específico de biogás do grupo gerador conforme diferentes cargas

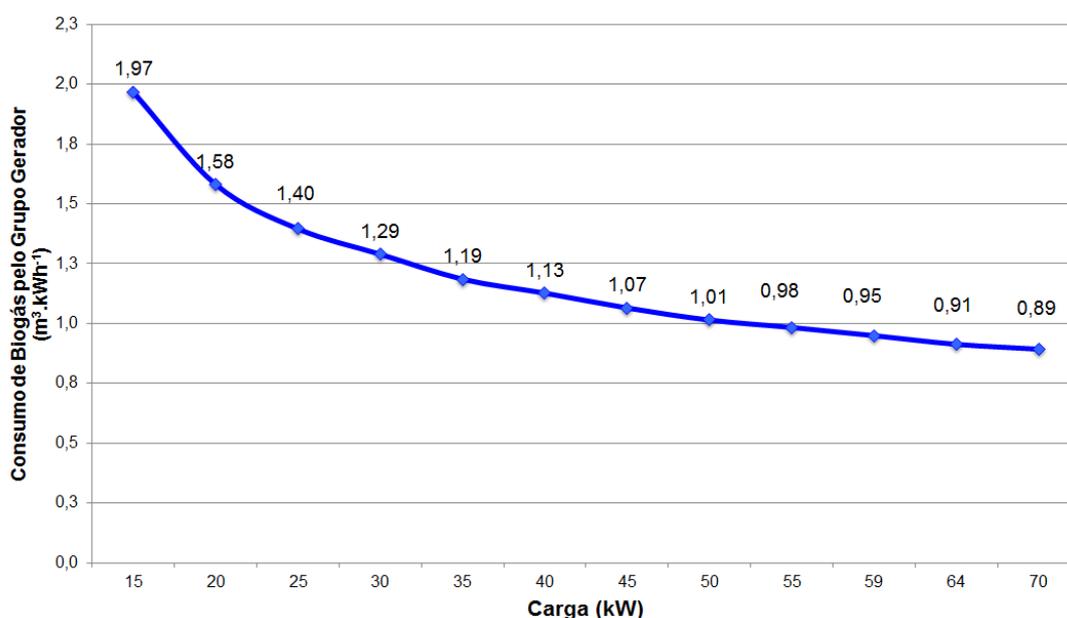


Figura 21. Consumo específico em diferentes cargas

O consumo específico de biogás foi de $1,97 \text{ m}^3.\text{kWh}^{-1}$ para a menor carga do ensaio, de 15 kW. A plena carga (70 kW) o consumo foi de $0,89 \text{ m}^3.\text{kWh}^{-1}$, um

aumento de 46% de eficiência.

Segundo Mitzlaff (1988), em motores a combustão interna do tipo Otto, diferentemente do tipo Diesel, o consumo específico de combustível é maior a cargas parciais pois o fluxo de ar é reduzido (*throttled*), e como foi observado neste estudo, quanto maior a carga maior a eficiência do motor a combustão.

4.6 BALANÇO DO CONSUMO E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Na Figura 22 é ilustrado um gráfico com os valores da geração de energia elétrica e o balanço com o consumo interno e geração da propriedade, sendo que a energia consumida (evitada) é a subtração da energia consumida total e energia consumida da rede.

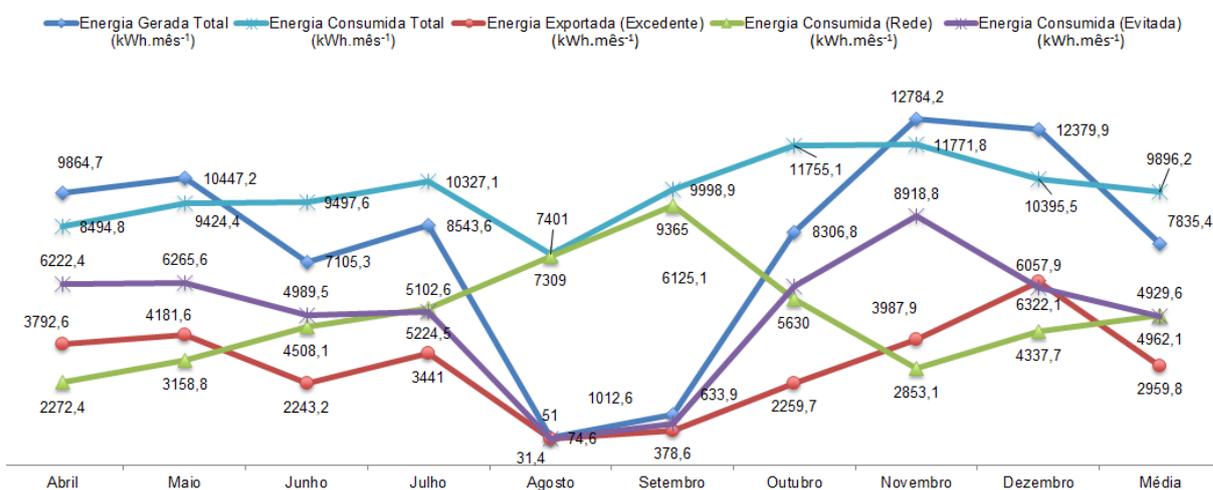


Figura 22. Valores em kWh da energia elétrica da Granja Colombari, incluindo geração total, consumo total, energia exportada, energia consumida evitada e energia consumida da rede.

A geração média de energia elétrica nos meses monitorados foi de 7.835,4 kWh por mês. A energia média consumida pela propriedade da rede de distribuição foi de 4.962,1 kWh.mês⁻¹. A média de energia elétrica autoconsumida, ou seja, a energia elétrica evitada, foi de 4.929,6 kWh.mês⁻¹. A média de energia elétrica exportada ou excedente foi de 2.959,8 kWh.mês⁻¹.

Observa-se que nos meses de agosto e setembro de 2014, quando não houve geração de energia elétrica significativa, o consumo médio da rede foi bem alto, 7.309 e 9365 kWh.mês⁻¹, respectivamente.

Nos meses que houve a operação do grupo gerador durante todo o mês, o consumo total de energia elétrica foi na maioria das vezes superior à geração de energia elétrica.

O consumo total de energia elétrica pela propriedade durante os meses monitorados foi de cerca de 89 MWh. A energia elétrica (EE) total exportada para a rede, ou seja, a energia excedente foi de 26,6 MWh. A energia elétrica total consumida da rede e a evitada, ambas foram de aproximadamente 44,6 MWh.

O montante total de energia elétrica gerada foi de 70,5 MWh durante os nove meses. Este montante de EE equivale ao abastecimento de aproximadamente 35 residências de baixa renda com consumo de até 220 kWh mensais (COPEL, 2014).

Na Tabela 14 é apresentado um balanço do custo de energia elétrica evitada e do custo evitado total, considerando as tarifas adotadas pela COPEL para o mês de junho de 2014.

Tabela 14. Saldo de EE e balanço do custo de energia elétrica consumida na propriedade

Mês	Saldo de EE (kWh)	Contratação mínima (kWh)	Saldo de EE final (kWh)	Custo EE evitado (R\$)	Custo da conta (R\$)*	Custo evitado total (R\$)
março	33.327	-	33.327,0	-	-	-
abril	1.520,2	100	1.620,2	1.924,0	51,1	1.872,9
maio	1.022,8	100	1.122,8	1.937,3	59,3	1.878,0
junho	-2.264,9	100	-2.164,9	1.542,8	71,9	1.470,9
julho	-1.783,5	100	-1.683,5	1.577,7	78,5	1.499,2
agosto	-7.277,6	100	-7.177,6	15,8	97,9	-82,1
setembro	-8.986,4	100	-8.886,4	196,0	117,0	79,0
outubro	-3.370,3	100	-3.270,3	1.893,9	82,3	1.811,6
novembro	1.134,8	100	1.234,8	2.757,7	56,5	2.701,2
dezembro	1.984,4	100	2.084,4	1.873,1	70,3	1.802,8
Total	15.306,5	900	16.206,5	13.718,2	684,9	13.033,3

**Com a taxa mínima da conta de EE (R\$ 21,58) + impostos da EE consumida da rede

Para o sistema atual de compensação, o produtor teve um custo evitado total de energia elétrica de R\$ 13.718,20 cerca de R\$ 1.524,25 por mês.

O saldo de energia elétrica disponível para compensação foi de 15,3 MWh no final do ano de 2014. No mês de março de 2014, anteriormente ao estudo, o saldo a compensar era de 33 MWh. Portanto, os meses que não houve geração de energia elétrica foram compensados pelos meses anteriores quando houve um excedente de geração.

Caso não houvesse o saldo anterior, o banco de compensação estaria com -18 MWh, o que equivaleria a um custo de energia elétrica para o produtor de cerca de R\$ 5.571,00.

Observa-se que mesmo com um saldo positivo de EE, o produtor teve um custo total de R\$ 684,90 com a concessionária de energia elétrica, que considera o

custo mínimo que o mesmo tem com o acesso à rede de distribuição, que é atualmente de R\$ 21,58 por mês, já somado os impostos pela energia consumida da rede.

Neste sistema implantado pela resolução nº 482/2012 da ANEEL, o custo da energia evitada leva em conta os valores da energia elétrica mais os impostos embutidos, porém a concessionária na hora de compensar a energia excedente que foi injetada anteriormente, realiza desconto dos créditos de EE somente com base na EE consumida, desconsiderando os impostos que foram cobrados devido a utilização de EE da rede pelo produtor.

Se não houvesse a isenção do ICMS na tarifa de luz para produtores rurais, como não ocorre na área urbana, o sistema poderia inviabilizar a geração de EE distribuída a partir de microgeradores, pois muitas vezes o saldo de EE exportada é superior ao consumo da propriedade da rede, gerando um banco de compensação que não será utilizado, caso a geração de EE seja constante durante todo o ano.

Assim, esse sistema de compensação de EE beneficia o produtor que utilizar mais a energia elétrica gerada, em vez de realizar a utilização (compra) dessa energia elétrica da rede de distribuição, conforme também relatado por Martins e Oliveira (2011).

Na Tabela 15 são apresentados resumidamente os principais resultados e correlações obtidas neste estudo.

Tabela 15. Principais resultados e correlações no período deste estudo

Indicador	Valor
Produção média de biogás (dia)	430,8 ± 139,4 m ³
Produção de biogás por suíno	0,10 ± 0,03 m ³
Produção de biogás por suíno (meses frios)	0,11 ± 0,03 m ³
Produção de biogás por suíno (meses quentes)	0,07 ± 0,02 m ³
Concentração média de metano no biogás	68,3 ± 3,7%
Geração média de energia elétrica (dia)	324,5 ± 70 kWh
Operação média do grupo gerador (dia)	6,5 ± 1,2 horas
Consumo específico médio do grupo gerador	0,94 ± 0,04 m ³ .kWh ⁻¹
Eficiência do grupo gerador a 70 kW	17%
Geração total de energia elétrica no período	70,5 MWh
Total de energia elétrica exportada para rede	26,6 MWh
Custo evitado de energia elétrica no período	R\$ 13.718,20

5 CONCLUSÕES GERAIS

Durante o período de monitoramento, que foi de abril a dezembro de 2014, o sistema realizou o registro de diversas variáveis do processo de geração de energia elétrica a partir do biogás de dejetos suínos.

A produção média diária foi de 430,8 m³, com uma média de 0,10 m³ de biogás por suíno em terminação alojado. Esta produção teve variações durante os meses, possuindo menor atividade nos meses mais frios.

A qualidade do biogás manteve-se de, uma maneira geral, bem constante ao longo do tempo, tendo um valor médio de 68% de concentração de metano.

A geração de energia elétrica teve uma média de 324,5 kWh.dia⁻¹, com 6,5 horas de operação por dia do grupo gerador. Essa geração poderia ter sido mais alta, caso o grupo gerador não tivesse ficado fora de operação durante quase dois meses por falta de peças de reposição.

A eficiência do grupo gerador realizada durante um ensaio no mês de dezembro encontrou um valor de 17% para uma potência ativa de 70 kW.

O balanço da geração e consumo energia elétrica demonstrou que o produtor teve um custo evitado de R\$ 13.718,20 com a autoprodução de energia elétrica, e que poderia ser integral caso o sistema de compensação não realizasse a cobrança da tarifa mínima de energia elétrica e os impostos sobre a energia consumida da rede.

A utilização de instrumentos e um sistema de monitoramento para medição constante dos parâmetros envolvidos apresentou resultados importantes no estudo da geração de energia elétrica a partir do biogás.

Estes resultados, em geral, indicaram novos valores que poderão ser utilizados na suinocultura, e também deixa aberta a possibilidade para novos estudos que poderão incorporar o monitoramento de mais variáveis, como por exemplo, a geração de dejetos.

Observou-se também que, para assegurar que o monitoramento seja confiável, é necessária uma manutenção constante dos equipamentos e instrumentos de medição inseridos, e um acompanhamento constante da geração de dados no processo.

REFERÊNCIAS

ABCS. **China: oportunidade de negócios para os suinocultores brasileiros.** Disponível em: <<http://www.abcs.org.br/informativo-abcs/1775-china-oportunidade-de-negocios-para-os-suinocultores-brasileiros>>. Acesso em: 30 jul. 2014.

ABIPECS. **Produção Mundial de Carne Suína.** Disponível em: <<http://www.abipecs.org.br/pt/estatisticas/mundial/producao-2.html>>. Acesso em: 1 ago. 2014.

ABURAS, R. *et al.* Construction and operation of a demonstration biogas plant, problems and prospects. **Energy Conversion and Management**, v. 37, n. 5, p. 611–614, 1996.

ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: a definition. **Electric Power Systems Research**, v. 57, n. 3, p. 195–204, abr. 2001.

ALAGUMALAI, A. Internal combustion engines: Progress and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 561–571, out. 2014.

ALBUQUERQUE, N. I. DE *et al.* **Manual sobre criação de suínos na agricultura familiar: noções básicas.** Belém: Embrapa-CPATU, 1998.

ANDRADE, M. A. N. *et al.* **Biodigestores rurais no contexto da atual crise de energia elétrica brasileira e na perspectiva da sustentabilidade ambiental.** In: IV Encontro de Energia no Meio Rural - AGRENER. **Anais...**Campinas, SP: UNICAMP/NIPE, 2002

ANEEL. **Resolução Normativa N° 414 de 2010. Estabelece Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada.** Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2010.

ANEEL. **Resolução Normativa N° 482 de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de micro geração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de**

energia elétrica, e dá outras providên. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2012.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) - Módulo 3.** 5. ed. Brasília: ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), 2012.

BARBOSA, G.; LANGER, M. Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental. **Unoesc e Ciência**, v. 2, n. 1, p. 87–96, 2011.

BARREIRA, P. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural.** 3. ed. São Paulo: Ícone, 2011.

BOE, K. *et al.* State indicators for monitoring the anaerobic digestion process. **Water Research**, v. 44, n. 20, p. 5973–5980, 2010.

BRAMBILLA, M. *et al.* Monitoring of the startup phase of one continuous anaerobic digester at pilot scale level. **Biomass and Bioenergy**, v. 36, p. 439–446, 2012.

BRASIL. Decreto Federal Nº 5.163 de 30 de julho de 2004. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 30 jul. 2004.

CARNE SUÍNA BRASILEIRA. **Criação de Suínos.** Disponível em: <<http://www.carnesuinabrasileira.org.br/producao2.html>>. Acesso em: 10 jan. 2013.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica.** 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CEPEA. **Perspectivas para o agronegócio em 2015.** Disponível em: <<http://cepea.esalq.usp.br/pib/>>. Acesso em: 7 jan. 2015.

CHERNICHARO, C. A. DE L. **Reatores Anaeróbios.** 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2007.

COMASTRI FILHO, J. A. Biogás: Independência energética do pantanal mato-grossense. **Comunicado Técnico Embrapa**, p. 53, out. 1981.

COPEL. **NTC 905200 - Acesso de micro e minigeração distribuída ao sistema da COPEL**. Curitiba, PR: Companhia Paranaense de Energia Elétrica, 2014.

COPEL. **Taxas e Tarifas**. Disponível em: <<http://www.copel.com>>. Acesso em: 13 dez. 2014.

CORTEZ, L. A. B. *et al.* Biodigestão de Efluentes. *In: Biomassa para Energia*. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2008. .

COSTA, D. F. **Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás do Tratamento de Esgoto**. São Paulo: PIPGE/USP, 2006.

DAL MAGO, A. **Avaliação de biodigestores com o uso de dejetos de suínos, em Braço do Norte e em Concórdia**. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

DEGANUTTI, R. *et al.* **Biodigestores Rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. *In: IV Encontro de Energia no Meio Rural - AGRENER. Anais...*Campinas: 2002

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources**. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2011.

DIESEL, R.; MIRANDA, C. R.; PERDOMO, C. C. Coletânea de tecnologias sobre dejetos suínos. **BIPERS**, n. 14, p. 29, 2002.

ESTADÃO. **Exportações da carne suína caem 11% em 2013**. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/geral,exportacoes-brasileiras-de-carne-suina-caem-11-em-2013-abipecs,1118314>>. Acesso em: 1 ago. 2014.

FAEP. Uma radiografia da suinocultura paranaense suinocultura. **Boletim Informativo do Sistema FAEP**, v. 1107, p. 2–5, ago. 2010.

FERNANDES, D. M. *et al.* **Eficiência da biodigestão anaeróbia no manejo da biomassa residual na Unidade Granja Colombari**. *In: I Congresso Sul Brasileiro de Produção Animal Sustentável. Anais...*Chapecó, SC: 2010

GERARDI, M. H. **The Microbiology of Anerobic Digesters**. New Jersey: Wiley-

Interscience, 2003.

GIACOMINI, S. J.; AITA, C. Cama sobreposta e dejetos líquidos de suínos como fonte de nitrogênio ao milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 195–205, fev. 2008.

GONÇALVES, R. G.; PALMEIRA, E. M. Suinocultura Brasileira. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 71, n. Diciembre, 2006.

GRADY, C. P. L.; DAIGGER, G. T.; LIM, H. C. **Biological Wastewater Treatment**. 2. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999.

GUSMÃO, M. M. F. E C. DE C. **Produção de biogás em diferentes sistemas de criação de suínos em santa catarina**. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

HACHISUCA, A. M. M. *et al.* **Geração Distribuída: Biomassa Residual Utilizada Como Fonte Alternativa de Energia em Unidades de Demonstração**. In: III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. **Anais...**Belém: SBSE, 2010

IBGE. Produção Pecuária Municipal - 2013. **Produção Pecuária Municipal**, v. 41, p. 1–108, 2013.

ITAI. **Relatório Técnico Final de Acompanhamento das Unidades de Geração Distribuída**. Foz do Iguaçu: Instituto de Tecnologia Aplicada e Inovação, 2012.

JENKINS, N. *et al.* **Embedded Generation**. London: IET, 2000.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. **Reunião Técnica sobre Biodigestores para Tratamento de Dejetos de Suínos e Uso de Biogás**. Concórdia, SC: Embrapa Suínos e Aves, 2006.

KUNZ, A.; PALHARES, J. C. P. A importância do correto procedimento de amostragem para avaliação das características dos dejetos de suínos. **Comunicado Técnico Embrapa**, p. 1–4, jul. 2004.

LABATUT, R. A.; GOOCH, C. A. **Monitoring of Anaerobic Digestion Process to**

Optimize Performance and Prevent System Failure. *In: Got Manure? Enhancing Environmental and Economic Sustainability Conference. Anais...* New York: AgSTAR, 2012

LEÃO ENERGIA. **Geradores a biogás.** Disponível em: <<http://www.leaoenergia.com.br/produto/126/geradores-a-biogas>>. Acesso em: 10 jan. 2015.

LIMA, H. Q. **Avaliação dos Modelos Hashimoto e AMS-III.D para produção de metano com dejetos suínos.** Dissertação (Mestrado em Energia). Santo André: Universidade Federal do ABC, 2011.

MAPA. **Produto Interno Bruto da Agropecuária.** Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/comunicacao>>. Acesso em: 4 jan. 2015.

MARTINS, F. M.; OLIVEIRA, P. A. V. DE. Análise Econômica na Geração de Energia Elétrica a partir do biogás na suinocultura. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 3, p. 477–486, 2011.

MIRANDA, A. P.; LUCAS JÚNIOR, J. DE; THOMAZ, M. C. **Teor de metano em biogás de suínos em diferentes fases de crescimento alimentados com milho ou sorgo como fonte energética.** *In: Simpósio Brasileiro de Agroenergia. Anais...* Botocatu: FCA, 2008

MIRANDA, A. P.; LUCAS JÚNIOR, J. DE; THOMAZ, M. C. **Redução de sólidos e produção de biodigestores abastecidos com dejetos de suínos alimentados com dietas formuladas com milho ou sorgo.** *In: I Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Animais. Anais...* Florianópolis, SC: SIGERA, 2009

MITZLAFF, K. VON. **Engines for biogas.** Eschborn: GTZ, 1988.

OLIVEIRA, P. A. V. DE; HIRAGASHI, M. M. **Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos.** Concórdia, SC: Embrapa Suínos e Aves, 2006.

PAIANO, D. *et al.* Comportamento de suínos alojados em baias de piso parcialmente ripado ou com lâmina d'água. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 29, n. 3, p.

345–351, 18 dez. 2007.

PEREIRA, R. H. *et al.* **Geração Distribuída de Energia Elétrica - Aplicação de Motores Bicombustível Diesel/Gás Natural**. In: III Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. **Anais...**Salvador: IBP, 2005

PIPATMANOMAI, S.; KAEWLUAN, S.; VITIDSANT, T. Economic assessment of biogas-to-electricity generation system with H₂S removal by activated carbon in small pig farm. **Applied Energy**, v. 86, n. 5, p. 669–674, maio. 2009.

RASI, S.; LÄNTELÄ, J.; RINTALA, J. Trace compounds affecting biogas energy utilisation – A review. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 12, p. 3369–3375, 2011.

ROESLER, M. R. VON B.; CESCNETO, E. A. A produção de suínos e as propostas de gestão de ativos ambientais: o caso da região de Toledo – Paraná. **Informe GEPEC**, v. 7, n. 2, p. 1–19, 2003.

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU. **A Cidade - Geografia e População**. Disponível em: <<http://saomiguel.hospedagemdesites.ws/geografia>>. Acesso em: 30 jul. 2014.

SILVA FILHO, A. **Análise Regulatória das Condições de Interconexão da Geração Distribuída: Requisitos para os Procedimentos da Distribuição**. Dissertação de Mestrado (Pós-graduação em Engenharia da Energia). Itajubá: UNIFEI, 2005.

SOUZA, M. V. N.; KUNZ, A. Dispositivo Indicador de Troca de Filtro para Biogás (Embrapa Biogás TF-01). **Comunicado Técnico Embrapa**, v. 478, n. Julho, p. 1–4, 2010.

SOUZA, R. G.; SILVA, F. M.; BASTOS, A. C. Desempenho de um conjunto motogerador adaptado a biogás. **Ciências Agrotecnológicas**, v. 34, n. 1, p. 190–195, 2010.

SOUZA, S. N. M. DE *et al.* Electric energy micro-production in a rural property using biogas as primary source. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p.

385–391, dez. 2013.

TRICHES, G. P. **A suinocultura e o desenvolvimento regional: o caso do alto vale do Itajai - SC**. Cascavel, PR: Universidade Regional de Blumenau, 2003.

USDA. **Livestock and Poultry**. Washington, DC: United States Department of Agriculture, 2014.

WALKER, M. *et al.* Potential errors in the quantitative evaluation of biogas production in anaerobic digestion processes. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 24, p. 6339–6346, 2009.