

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
APLICADA E SUSTENTABILIDADE

ANÁLISE DE VIABILIDADE DO SISTEMA HÍBRIDO  
BIOGÁS-SOLAR NA GERAÇÃO DE ENERGIA E SEUS  
IMPACTOS NAS EMISSÕES DE GASES

Autor: Aroldo José Teixeira de Souza Filho  
Orientador: Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior

RIO VERDE - GO  
Agosto - 2019

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
APLICADA E SUSTENTABILIDADE

ANÁLISE DE VIABILIDADE DO SISTEMA HÍBRIDO  
BIOGÁS-SOLAR NA GERAÇÃO DE ENERGIA E SEUS  
IMPACTOS NAS EMISSÕES DE GASES

Autor: Aroldo José Teixeira de Souza Filho  
Orientador: Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

RIO VERDE - GO  
Agosto - 2019

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
**Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano**

FAR769  
a Filho, Aroldo José Teixeira de Souza  
Análise da Viabilidade de Sistema Híbrido Biogás-Solar na Geração de Energia e seus Impactos nas Emissões de Gases / Aroldo José Teixeira de Souza Filho; orientador João Areis Ferreira Barbosa Júnior. -- Rio Verde, 2019.  
122 p.

Dissertação ( em Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade) -- Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2019.

1. Avicultura. 2. Desenvolvimento Limpo. 3. Efeito Estufa. 4. Geração Distribuída. 5. Suinocultura. I. Barbosa Júnior, João Areis Ferreira, orient. II. Título.


**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA APLICADA E  
SUSTENTABILIDADE**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DO SISTEMA HÍBRIDO BIOGÁS-  
SOLAR NA GERAÇÃO DE ENERGIA E SEUS IMPACTOS NAS  
EMISSÕES DE GASES**


Autor: Aroldo José Teixeira de Souza Filho  
Orientador: Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior

*TITULAÇÃO:* Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade -  
Área de Concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

APROVADO em 30 de agosto de 2019.

  
Prof. Dr. Bruno Botelho Saleh  
*Avaliador interno*  
IF Goiano / Rio Verde

  
Prof. Dr. Sérgio Batista da Silva  
*Avaliador externo*  
IFG / Itumbiara

  
Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Junior  
*Presidente da Banca*  
IF Goiano / Rio Verde



**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

**Identificação da Produção Técnico-Científica**

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese  | <input type="checkbox"/> Artigo Científico              |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação                      | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização                 | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação                             | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ |   |

Nome Completo do Autor: Aroldo José Teixeira de Souza Filho

Matrícula: 2017202331440056

Título do Trabalho: Análise de Viabilidade do Sistema Híbrido Biogás-Solar na Geração de Energia e seus Impactos nas Emissões de Gases

**Restrições de Acesso ao Documento**

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique: \_\_\_\_\_

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 30/10/2019

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

**DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA**

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

RIO VERDE - GO, 25 / 10 / 2019.  
Local Data

*Aroldo Filho*

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:

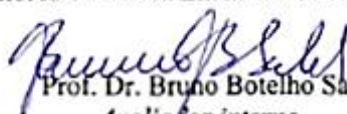
*João Arcis F. Barbosa Jr.*  
Assinatura do(a) orientador(a)




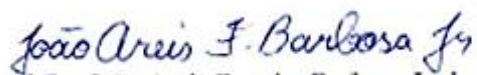
SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO  
CAMPUS RIO VERDE - GO  
DIRETORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO, PESQUISA E INOVAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE

## ATA Nº 11 (ONZE) BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos trinta dias do mês de agosto do ano de dois mil e dezenove, às 09:00 (nove horas), reuniram-se os componentes da Banca Examinadora: Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Junior (orientador), Prof. Dr. Bruno Botelho Saleh (avaliador interno), Prof. Dr. Sérgio Batista da Silva (avaliador externo), via videoconferência, sob a presidência do primeiro, em sessão pública realizada no Laboratório de Energias Renováveis e Instalações Elétricas – Bloco Engenharias I do IF Goiano – Campus Rio Verde, para procederem a avaliação da defesa de Dissertação, em nível de mestrado, da autoria de **Aroldo José Teixeira de Souza Filho**, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Junior, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida ao autor da Dissertação para, em 30 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o examinado, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, e procedida às correções recomendadas, a Dissertação foi **APROVADA**, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE**, na área de concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGEAS da versão definitiva da Dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, a defesa perderá a validade, se não cumprida essa condição, em até 60 (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Dissertação em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de Dissertação de Mestrado, e para constar, eu, Renata Maria de Miranda Rios Resende, secretária do PPGEAS, lavrei a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora em cinco vias de igual teor.

  
Prof. Dr. Bruno Botelho Saleh  
*Avaliador interno*  
IF Goiano / Rio Verde

  
Prof. Dr. Sérgio Batista da Silva  
*Avaliador externo*  
IFG / Itumbiara

  
Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Junior  
*Presidente da Banca*  
IF Goiano / Rio Verde

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e minha namorada Cristina, principal motivo do meu empenho e força durante quaisquer dificuldades, por todo amor, apoio e pelo prazer de compartilhar a vida e mais essa conquista com vocês, pois todos, de diversas formas, contribuíram com a minha formação e caráter e foram meu suporte ao longo da vida e do curso.

A meu orientador e grande amigo João Areis, pelas contribuições valiosas e conhecimento compartilhado, mas, principalmente por não medir esforços para me ajudar, pela confiança no meu potencial, pelo encorajamento, atenção e por ser inspiração para mim em tantos aspectos.

A todos os meus amigos e aos colegas de mestrado pela motivação, apoio e até mesmo pela compreensão quando em momentos de estresse ou ausência. Em especial, àqueles que estiveram mais próximos e contribuíram diretamente com o desenvolvimento do trabalho: Eng. Ricardo Henrique, Eng. Gabriel Paiva, Eng. Gustavo Iannacone, Carla Carvalho, Arilson Leal. Esse trabalho, apesar de individual, teria sido especialmente mais difícil sem a atenção e ajuda destas pessoas.

Agradeço também ao Instituto Federal Goiano, que viabilizou a aquisição de tanto conhecimento, e a toda equipe de professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, em especial ao professor Sérgio Batista pelas orientações no HOMER Energy.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão das bolsas de estudo, pelas verbas de auxílio financeiro ao projeto e fomento à pesquisa. Ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (Fapeg), pelas concessões de bolsas de estudos, pelas verbas de auxílio financeiro ao projeto e fomento à pesquisa de maneira geral.

## BIOGRAFIA DO AUTOR

Aroldo José Teixeira de Souza Filho, filho de Aroldo José Teixeira de Souza e Mauraci de Melo Costa, nascido em 30 de julho de 1991 na cidade de Goiânia – GO. Concluiu o ensino médio no Colégio WR em dezembro de 2009, na cidade de Goiânia – GO. Engenheiro Eletricista pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás em 2015 e Engenheiro de Controle em 2017 pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Goiânia. Pós-Graduado (MBA) em Gestão de Projetos pela Fundação Getúlio Vargas em 2017. Em setembro de 2017, ingressou no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, nível de mestrado profissional, na linha de pesquisa Eficiência Energética e Sustentabilidade, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde – GO. Em agosto de 2019, defendeu sua dissertação, parte indispensável para a obtenção do diploma de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, sob a orientação do Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior.



## ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABELAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES.....	xi
RESUMO.....	xv
ABSTRACT.....	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Geração Distribuída .....	4
1.3 Sistemas Híbridos para Geração de Energia.....	5
1.3.1 Produção de Energia Elétrica a partir do Biogás .....	7
1.3.2 Produção de Energia Elétrica a partir do Potencial Solar Brasileiro .....	8
1.4 Energia Solar Fotovoltaica.....	10
1.5 Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica ...	12
1.6 Taxa de Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos - Performance Ratio (TD).	13
1.7 Biogás e Biomassa .....	14
1.8 Biodigestores .....	17
1.8.1 Equacionamentos de Biodigestores e de Grupo Geradores a Biogás .....	19
1.9 Software HOMER Energy .....	21
1.10 Emissões de Poluentes e Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) ...	24
1.10.1 Mercados de Carbono .....	25
1.11 Ferramentas de Análise Econômica.....	26
1.11.1 Fluxo de Caixa.....	27
1.11.2 Tributação sobre o Fluxo de Caixa Líquido .....	27
1.11.3 Inflação .....	28

1.11.4	Depreciação Contábil dos Equipamentos e Instalações.....	28
1.11.5	Investimento com Recursos Próprios ou Recursos de Terceiros .....	29
1.11.6	Taxa Mínima de Atratividade (TMA) .....	30
1.11.7	Payback.....	30
1.11.8	Valor Presente Líquido (VPL).....	31
1.11.9	Taxa Interna de Retorno (TIR) .....	31
1.11.10	Índice Benefício Custo (IBC) .....	32
1.11.11	Retorno Adicional sobre o Investimento (ROIA).....	32
1.11.12	Valor Presente Líquido Anualizado (VPLA).....	32
1.12	Referências Bibliográficas .....	33
2.	OBJETIVOS .....	39
2.1	Geral.....	39
2.2	Específicos .....	39
3.	CAPÍTULO I.....	40
3.1	Introdução .....	41
3.2	Materiais e Métodos.....	47
3.2.1	Descrição dos Sistema de Geração de Energia em Operação.....	49
3.2.2	Perfil de Carga Diário .....	50
3.2.3	Radiação Solar .....	53
3.2.4	Geração Solar Fotovoltaica.....	53
3.2.5	Sistema Fotovoltaico (FV).....	54
3.2.6	Análise de Composição e Qualidade do Biogás .....	55
3.2.7	Gerador a Biogás .....	56
3.2.8	Biomassa.....	59
3.2.9	Conversores eletrônicos de potência.....	60
3.2.10	Tarifas e disponibilidade da rede .....	61
3.2.11	Dados econômicos e restrições .....	61
3.3	Simulações e Resultados.....	61
3.3.1	Efeito das taxas de juros no Custo da Eletricidade.....	64
3.3.2	Análise do Sistema Híbrido e Individuais Biogás e Fotovoltaico no Custo de Eletricidade e Indicadores Econômicos .....	64
3.3.3	Efeito da Disponibilidade de Biomassa e Slope do Gerador no Custo da Eletricidade e Geração de Energia.....	66
3.3.4	Efeito do Taxa de Desempenho (TD) e da Radiação Solar Global no Custo da Eletricidade e Geração de Energia .....	68
3.4	Conclusões .....	69
3.5	Agradecimentos .....	71
3.6	Referências Bibliográficas .....	71
4.	CAPÍTULO II.....	77
4.1	Introdução .....	78
4.2	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).....	83

4.3	Descrição do Complexo Agropecuário da Fazenda Talhado e Gerador Híbrido de Energia FV-Biogás .....	85
4.3.1	Estudo de Caso Fazenda Talhado - Projeto de Mitigação GHG AWMS ...	88
4.3.2	Estimativa da quantidade dos gases CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub> presentes no biogás .....	91
4.3.3	Estimativa das emissões de CO <sub>2</sub> e CH <sub>4</sub> segundo metodologia pelo EPA ..	91
4.3.4	Determinação do CO <sub>2</sub> equivalente segundo metodologia situada no EPA.	92
4.4	Resultados e discussão .....	93
4.4.1	Quantitativos estimados da geração de gases CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub> e emissões de CO <sub>2</sub> equivalentes .....	93
4.4.2	Mercados de Carbono - Análise de Viabilidade .....	95
4.5	Conclusões .....	96
4.6	Referências Bibliográficas .....	98
5.	CONCLUSÃO GERAL.....	103

## ÍNDICE DE TABELAS

	Página
<b>INTRODUÇÃO</b>	
Tabela 1. Efetivo de suínos em Estados da Federação. Fonte: IBGE 2013.....	6
Tabela 2. Composição do biogás .....	16
 <b>CAPITULO I – ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO SISTEMA HÍBRIDO BIOGÁS-SOLAR EM GRANJAS DE AVES E SUÍNOS</b>	
Tabela 1. Histórico de consumo energético das granjas e casas.....	50
Tabela 2. Medições de energia da GD Solar, Taxas de Desempenho e Irradiação Solar Média da região .....	54
Tabela 3. Levantamento de potências e valores comerciais de Kits Solares para aplicações de médio e grande porte .....	55
Tabela 4. Consumo de biogás e produção diária de energia elétrica em carga .....	58
Tabela 5. Medições da Geração Distribuída e Cálculo Reverso da Geração de Biogás.	59
Tabela 6. Custos de Operação da Produção de Biomassa .....	60
Tabela 7. Resultados otimizados no HOMER .....	63
Tabela 8. Resultados da comparação dos sistemas individuais solar e biogás com sistema híbrido no HOMER .....	65
 <b>CAPITULO II- CRÉDITOS DE CARBONO E EMISSOES DE GEE POR GERADOR HÍBRIDO BIOGÁS-FOTOVOLTAICO EM SUINOCULTURAS</b>	
Tabela 1. Comparação de emissões específicas de CO <sub>2</sub> para diferentes tipos de centrais elétricas .....	80
Tabela 2. Comparação de emissões de poluentes em suinoculturas com uso de biodigestores por granja.....	82
Tabela 3. Custos do ciclo de projeto do MDL.....	84
Tabela 4. Variação estimada de transação do MDL até o registro do estágio do Ciclo do Projeto, em US\$.....	85
Tabela 5. Medições Médias da GD Biogás e da Geração de Biomassa .....	87
Tabela 6. Histórico de consumo energético dos complexos agropecuários e residências .....	87
Tabela 7. Comparação dos sistemas individuais solar e biogás com o sistema híbrido .	87
Tabela 8. Valor correspondente para o GWP dos gases CO <sub>2</sub> e CH <sub>4</sub> .....	93
Tabela 9. Valores estimados da geração anual de CH <sub>4</sub> e de CO <sub>2</sub> a partir do biogás produzido .....	93

Tabela 10. Valores estimados da geração anual de CH <sub>4</sub> e de CO <sub>2</sub> a partir do biogás produzido pelos biodigestores .....	94
Tabela 11. Valores estimados e convertidos a unidade comum de CO <sub>2</sub> equivalente .....	94
Tabela 12. Emissões em CO <sub>2</sub> equivalente por setor no ano de 2014.....	94
Tabela 13. Impactos Ambientais com a Instalação de Sistemas Híbrido para a Fazenda Talhado .....	96

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<b>INTRODUÇÃO</b>	
Figura 1. Estimativa do Potencial de Energia oriundo do Biogás Proveniente de Dejetos suínos, em Toneladas. Fonte: Atlas de Bioenergia Brasil, 2012 .....	7
Figura 2. Média anual da radiação solar global horizontal (PEREIRA et al., 2006).....	9
Figura 3. Ângulos característicos da radiação solar e das superfícies dos módulos. Fonte: Solar Engineering of Thermal Processes (DUFFIE e BECKMAN, 2013). .....	11
Figura 4. Diagrama esquemático de funcionamento dos sistemas de produção de biogás, biofertilizante e energia elétrica. Adaptado de NISHIMURA (2009). .....	15
Figura 5. Grupo Motor Gerador a biogás de 330 kVA da ERBR Renováveis. Fonte: Autor. ....	17
Figura 6. Exigências e vantagens da biodigestão (PEREIRA, 2009) .....	18
Figura 7. Biodigestor modelo canadense. Fonte: Adaptado de AgCert (2005).....	18
Figura 8. Exemplo de biodigestor canadense. Fonte: Autor .....	19
Figura 9. Fluxograma básico de funcionamento do HOMER®. (SILVA, 2010).....	22
Figura 10. Ciclo de projeto do MDL. Fonte: BM&FBOVESPA, 2010. ....	25
Figura 11. Preço contratos futuros ECX EUA. Fonte: adaptado de ECX, 2019. ....	26
 <b>CAPITULO I – ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO SISTEMA HÍBRIDO BIOGÁS-SOLAR EM GRANJAS DE AVES E SUÍNOS</b>	
Figura 1. Produção de animais em 2015 na microrregião sudoeste de Goiás - (a) Suínos; (b) Aves (Rezende, 2017) .....	42
Figura 2. Vista aérea das Suinoculturas (SVT) localizada na zona rural em Rio Verde-GO (Google Earth, 2018).....	48
Figura 3. Granja de Suínos na configuração piso vazado localizada na zona rural em Rio Verde-GO.....	48
Figura 4. Vista aérea dos Aviários (FGO) localizados na zona rural em Rio Verde-GO (Google Earth, 2018) .....	49
Figura 5. (a) Biodigestores (b) Gerador de Energia a Biogás 330 kVA. ....	50
Figura 6. (a) Sistema Fotovoltaico de 114 kWp (b) Galpões de Aviários.....	50
Figura 7. Perfil de carga diário dos aviários em estudo .....	51
Figura 8. Perfil de carga sazonal para os aviários.....	51
Figura 9. Perfil de carga diário das suinoculturas em estudo .....	51
Figura 10. Perfil de carga sazonal para suinocultura .....	52

Figura 11. Perfil médio mensal de radiação solar e índice médio de clareza – Zona rural do Município de Rio Verde. ....	53
Figura 12. (a) Kit de Análise de Biogás (b) Concentração de CO <sub>2</sub> e CH <sub>4</sub> (Poças et al., 2018).....	56
Figura 13. (a) Consumo específico em diferentes cargas (b) Eficiência do Gerador a Biogás (ERBR, 2018).....	58
Figura 14. Recursos disponíveis de Biomassa no HOMER.....	60
Figura 15. Modelo do sistema de energia conectado a rede inserido no HOMER - Gerador Híbrido FV-Biogás.....	62
Figura 16. Distribuição horária anual de energia fotovoltaica para atender a cargas instaladas.....	63
Figura 17. Distribuição horária anual do gerador a biogás para atender a cargas instaladas.....	63
Figura 18. Análise de sensibilidade do COE em função da Taxa de Interesse do projeto.....	64
Figura 19. Comparação dos indicadores econômicos entre os sistemas híbrido e exclusivo.....	65
Figura 20. Análise de sensibilidade do COE em função do Slope e disponibilidade da biomassa.....	67
Figura 21. Análise de sensibilidade do Produção de Energia a Biogás em função do Slope e disponibilidade da biomassa.....	68
Figura 22. Análise de sensibilidade do COE em função do Taxa de Desempenho (TD) e Radiação Global.....	68
Figura 23. Análise de sensibilidade Produção de Energia Solar em função do Taxa de Desempenho (TD) e Radiação Global.....	69
 <b>CAPITULO II- CRÉDITOS DE CARBONO E EMISSOES DE GEE POR GERADOR HÍBRIDO BIOGAS-FOTOVOLTAICO EM SUINOCULTURAS</b>	
Figura 1. Matriz Elétrica Brasileira (EPE, 2019).....	79
Figura 2. Ciclo de projeto do MDL. Fonte: BM&FBOVESPA, 2010.....	84
Figura 3. Vista aérea das Suinoculturas (SVT) localizadas na zona rural em Rio Verde-GO (Google Earth, 2018).....	86
Figura 4. (a) Biodigestores do Projeto AWMS (b) Grupo Gerador a Biogás 330 kVA. 86	
Figura 5. Configurações da atividade do projeto. (AgCert, 2005). ....	89
Figura 6. Escopo do Projeto de Mitigação GHG AWMS (AgCert, 2005).....	90
Figura 7. Preço de contratos futuros EEX EUA. Fonte: adaptado de EEX, 2019.....	95

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
CER	Certificado de Emissão Reduzida
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
COE	Cost of Energy
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GD	Geração Distribuída
GEE	Gases de Efeito Estufa
GHG	Greenhouse Gas
HOMER	Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources
IEA	International Energy Agency
NREL	National Renewable Energy Laboratory
O&M	Operação e Manutenção
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
RCE	Reduções Certificadas de Emissão
ROI	Return on Investment
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
TIR	Taxa Interna de Retorno
VPL	Valor Presente Líquido
SPL	Sistema Produtor de Leitões
SVT	Sistema Vertical de Terminação



## RESUMO

SOUZA FILHO, AROLDO JOSÉ TEIXEIRA. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, agosto de 2019. **Análise da Viabilidade de Sistema Híbrido Biogás-Solar na Geração de Energia e seus Impactos nas Emissões de Gases.** Orientador: Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior. Co-orientador: Dr. Márcio da Silva Vilela.

O desenvolvimento da suinocultura evidenciou a necessidade de maior atenção ao problema do tratamento e da destinação dos dejetos de suínos. Atualmente, com o aumento populacional, o uso crescente de máquinas industriais e agrícolas e também de granjas avícolas e suinícolas para produção de carne gerou um aumento na demanda por energia no agronegócio, especialmente de combustíveis fósseis ou não renováveis. Devido a esse crescimento, surgem alguns problemas socioambientais, pois a maioria das fontes utilizadas para geração de combustíveis e eletricidade é de origem fóssil (petróleo, carvão, gás natural, diesel), e a queima desses combustíveis libera vários gases que são responsáveis pela poluição atmosférica. Muitos países têm investido na produção de energia limpa e renovável. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o uso de um sistema híbrido fotovoltaico-biogás conectado à rede em uma propriedade rural. O biogás é produzido em uma propriedade rural localizada na cidade de Rio Verde/GO, a qual utiliza cinco biodigestores para produção de biogás, cuja conversão em eletricidade é feita por um motor-gerador de 330 kVA ou 210 kW. Foi feita uma análise comparativa dos custos do sistema híbrido após a otimização, usando o software HOMER © (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*). Para uma quantidade média de 12.000 animais alojados, foram produzidos  $772 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$  de biogás, que foram utilizados na geração de  $1690 \text{ kWh} \cdot \text{dia}^{-1}$  de eletricidade. O custo de produção de eletricidade utilizando o biogás-solar foi de  $0,077 \text{ US}\$. \text{kWh}^{-1}$ , por outro lado, o valor da energia pago na concessionária foi de  $0,12 \text{ US}\$. \text{kWh}^{-1}$ , mostrando haver viabilidade. Foi verificado ainda que a venda de créditos de carbono e a mitigação dos gases de efeito estufa da produção de biogás em energia tornam estas tecnologias mais competitivas e viáveis, especialmente pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. No curto prazo, a implementação do sistema híbrido de biogás-solar na região é uma alternativa interessante para os agricultores, considerando a sustentabilidade do agronegócio.

PAVAVRAS-CHAVES: Avicultura; Desenvolvimento Limpo; Efeito Estufa; Geração Distribuída; Suinocultura.

## ABSTRACT

SOUZA FILHO, AROLDO JOSÉ TEIXEIRA. Federal Institute Goiano – Campus Rio Verde – GO, August 2019. **Feasibility Analysis of Biogas-Solar Hybrid System in Power Generation and its Impacts on Gas Emissions.** Advisor: DSc. João Areis Ferreira Barbosa Júnior. Co-advisor: DSc. Márcio da Silva Vilela.

The development of swine production evidenced the need for greater attention to the problem of treatment and destination of swine manure. Nowadays, with the population increase, the increasing use of industrial and agricultural machines, as well as poultry and pork farms for meat production has generated an increase in the demand for energy in agribusiness, especially of fossil or non-renewable fuels. Due to this growth, some socio-environmental problems arise, as most sources used for fuel and electricity generation are of fossil origin (oil, coal, natural gas, diesel), and the burning of these fuels releases several gases that are responsible for pollution. atmospheric. Many countries have invested in the production of clean and renewable energy. The present work aimed to evaluate the use of a grid-connected photovoltaic-biogas hybrid system in a rural property. Biogas is produced in a rural property located in the city of Rio Verde/GO, which uses five biodigesters for biogas production, which is converted into electricity by a 330 kVA or 210 kW motor generator. A comparative analysis of hybrid system costs after optimization was made using the Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER) software. For an average amount of 12,000 animals housed, 772 m<sup>3</sup>.day<sup>-1</sup> of biogas was produced, which was used to generate 1690 kWh.day<sup>-1</sup> of electricity. The cost of producing electricity using solar biogas was 0.077 US\$.kWh<sup>-1</sup>, on the other hand, the amount of energy paid at the utility was 0.12 US\$.kWh<sup>-1</sup>, showing feasibility. It has also been found that selling carbon credits and mitigating greenhouse gases from energy biogas production make these technologies more competitive and viable, especially through the Clean Development Mechanism. In the short term, the implementation of the solar biogas hybrid system in the region is an interesting alternative for farmers, considering the sustainability of agribusiness.

**KEY WORDS:** Poultry farming; Clean development; Greenhouse effect; Distributed generation; Pig farming.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

O setor de agronegócios se desenvolveu rapidamente no Brasil e hoje corresponde a 23% do Produto Interno Bruto do país (CEPEA, 2018). Dentro deste setor, a suinocultura vem se especializando e obtendo grande destaque no mercado nacional e internacional. Segundo relatórios da Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2018), o agronegócio brasileiro está em ritmo acelerado de crescimento. A produção de frangos de corte em 2018 aumentou 26% em comparação ao ano de 2008, enquanto a produção de suínos aumentou 25% no mesmo período.

Em Goiás a avicultura vem ganhando espaço pelo fato de os produtores de galináceos adquirirem a ração animal a preços baixos, pois o estado está entre os maiores produtores de milho e soja, o que reduz os custos da produção. Rio Verde é o município de Goiás com a maior produção de galináceos, com um efetivo de 14 milhões de cabeças (SIEG; REZENDE, 2017).

Nos últimos anos, o estado de Goiás vivenciou crescimento expressivo na produção de carne suína e aumento na geração de resíduos. Entre 2011 e 2016, este crescimento foi de 38% em termos de cabeças abatidas e 43% em volume de carne (ABCS, 2014). Estudos do ABPA apontam que, em 2018/2019, as exportações de carne suína representarão 21% do comércio mundial de carne. A macrorregião sul de Goiás detém o maior número de rebanho, com 70% do plantel do estado (ABCS, 2014).

Entre as fontes renováveis utilizadas no Brasil no Estado de Goiás, em razão da localização geográfica e da própria atividade produtiva (avicultura e suinocultura), o uso da energia solar fotovoltaica e da energia a partir de biogás de suinocultura é bastante promissora.

Uma preocupação é a automação destes modelos de confinamento (avicultura e suinocultura), que utiliza equipamentos para o manejo e conforto ambiental, demandando maior consumo de energia na produção (BEDIN, 2015). Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA (2018), até 2028, o cenário nacional de produção de frango de corte representará até 26,8 % do mercado mundial de carnes. Esta expectativa de produção para a avicultura brasileira implica a previsão de aumento de demanda por energia elétrica para produção.

Entre os fatores agravantes na composição dos custos variáveis energéticos futuros do investidor avícola e suinícola, estão a política de reajustes tarifários sugerida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a alta carga de impostos inserida nas tarifas praticadas no mercado brasileiro de energia convencional. O aumento de demanda energética, sobretudo na zona rural, onde as redes elétricas são mais vulneráveis, incentivou a busca por novas fontes de energia, de preferência renováveis.

Em Goiás, a radiação solar se destaca como alta, apresentando, na região norte do estado, valores de radiação entre 5.250 e 6.000 Wh/m<sup>2</sup>.dia. Comparando com a máxima nacional (6.250 Wh/m<sup>2</sup>.dia), Goiás tem uma ótima condição para instalação de usinas fotovoltaicas. Segundo a ABSOLAR (2019), atualmente, o estado de Goiás tem cerca de 37,6 MW de potência instalada, o que corresponde a 3,8% da representação nacional, sendo o 9º colocado entre os estados.

Com relação ao potencial do uso do biogás na suinocultura, o Estado de Goiás tinha um rebanho de 1.988.478 matrizes de suínos, o que correspondia a 5,3% da representatividade de Goiás na produção brasileira de carne suína, sendo o sétimo estado no ranking brasileiro em número de cabeças de suínos (IBGE, 2016). Uma grande influência para esses ótimos resultados é a cidade de Rio Verde, situada na região sudoeste do estado de Goiás, que concentra a maior produção de suínos do país, 770 mil cabeças, Jataí contém 613 mil cabeças e Montividiu contém 700 mil cabeças. No cenário nacional, a cidade de Rio Verde tem grande destaque na produção de carne suína em sistema de confinamento. O potencial energético em MW para os municípios da microrregião sudoeste do Estado de Goiás é de cerca de 124MW de geração a biogás. (IBGE, 2016; ABCS, 2014; REZENDE, 2017)

A Resolução Normativa N° 482/2012 da ANEEL, revisada posteriormente pela Resolução Normativa N° 687/2015, estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica,

além do sistema de compensação de energia elétrica (*net metering*), muito utilizado em diversos países. Para os produtores rurais, o sistema de compensação apresenta vantagens referentes à expansão do sistema de distribuição, tendo em vista seus benefícios pela redução dos custos da produção, uma vez que a energia é um dos insumos mais caros. Além de vantagens ambientais, sobretudo relacionadas aos ganhos que o uso dos biodigestores e do biogás por eles produzidos, traz para o meio ambiente outras vantagens em termos de evitar a contaminação de solo, do lençol freático pelos dejetos e de evitar emissões para atmosfera pelo uso dos biodigestores e da sua queima para produção de energia elétrica.

Em alguns casos, a combinação de diferentes fontes de energia renovável pode maximizar o desempenho técnico e o tempo de retorno em comparação com a utilização de fontes individuais. A diversificação da matriz energética e o crescimento da implantação da Geração Distribuída representam potenciais benefícios ao setor elétrico, entre eles, podem-se destacar (ANEEL, 2015b; AZEVEDO, 2017): postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição, baixo impacto ambiental, menor tempo de implantação, redução de carregamento dos condutores e, conseqüentemente, das perdas nas redes, melhora dos níveis de tensão em períodos de maior carregamento, aumento da confiabilidade do sistema e atendimento a comunidades rurais isoladas.

Apesar do potencial regional das duas energias renováveis (biogás e solar) e das suas vantagens técnicas e econômica, sua difusão na região tem enfrentado dificuldades, sobretudo pela falta de domínio da tecnologia e pela falta de mão de obra capacitada. Isso por se tratar de formas de geração de energia que exigem alta capacitação técnica do projetista para obter resultados mais próximos possíveis do ótimo produtivo, visando, assim, a aumentar a viabilidade financeira da tecnologia, por meio de *paybacks* mais favoráveis.

Sistemas híbridos de energias renováveis são caracterizados por um alto grau de complexidade na fase de dimensionamento e de análise financeira, pois a quantidade de parâmetros a serem avaliados torna o processo de planejamento energético consideravelmente mais trabalhoso. Por esta razão, uma forma muito eficiente que pode contribuir para a difusão destas tecnologias é a utilização de ferramentas computacionais para o dimensionamento e estudos de desempenho técnico e econômico das energias renováveis.

No mercado, há vários tipos de programas para simulação de sistemas de energia com diferentes linguagens de programação, precisões e metodologias de cálculo. Entre as ferramentas que auxiliam no planejamento energético, podem-se destacar HOMER, HYBRID2, HOGA, RETScreen, INSEL e TRNSYS. Neste estudo, será utilizado o programa HOMER, versão 2.68 Beta, por ter um algoritmo de análise de sensibilidade e de otimização que permite avaliar a viabilidade técnica e econômica de uma ampla gama de opções tecnológicas, levando em conta a variação de custos e a disponibilidade das fontes de energia para avaliar opções de projeto em sistemas com fontes de energia conectadas ou não à rede, podendo ser empregado em aplicações isoladas, remotas e com geração distribuída (WOTTRICH, 2010; MACHADO, 2013).

Diante do exposto, o presente projeto tem por finalidade avaliar o uso das fontes de energia renovável solar fotovoltaica e biogás de suinocultura para produção de energia elétrica; avaliar a possibilidade de uso individual ou híbrida dessas fontes para isso aplicar o HOMER, que possibilita a realização de estudos de desempenho técnico e econômico; por fim, avaliar os impactos em termos de emissões e créditos de carbono, principalmente do uso do biogás de suinocultura para produção de energia elétrica.

## **1.2 Geração Distribuída**

A Geração distribuída caracteriza-se como um sistema autônomo de produção de eletricidade que tem como finalidade assegurar por meios próprios o fornecimento da energia necessária sem recorrer à rede elétrica nacional. Um sistema autônomo de produção de energia elétrica pode basear-se em módulos fotovoltaicos, aerogeradores, hidroelétricas, geradores a diesel ou a biogás, entre outros (MACHADO, 2013). Os sistemas distribuídos que se têm revelado mais eficientes e equilibrados são os híbridos, porque utilizam mais do que uma fonte de energia. Como exemplo, os módulos fotovoltaicos não produzem de noite e os biodigestores só produzem se houver dejetos.

Segundo o Balanço Energético Nacional (2019), no Brasil, cerca de 65% da oferta total de energia elétrica é proveniente de usinas hidrelétricas, havendo vários fatores que induzem o interesse em geração distribuída, como, por exemplo:

- Redução no pico de demanda, permitindo postergar ou até mesmo evitar investimentos em transmissão e distribuição;
- Redução das perdas;
- Aumento na confiabilidade do sistema; e

- Atendimento a comunidades isoladas ou remotas.

De acordo com o Decreto 5.163 Art. 14, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo aqueles tratados pelo art. 8º da Lei no 9.074, de 1995, conectados diretamente ao sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento: (a) hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e (b) termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento, conforme regulação da ANEEL a ser estabelecida até dezembro de 2004. Os empreendimentos termelétricos que utilizam biomassa ou resíduos de processo como combustível não estarão limitados ao percentual de eficiência energética prevista no inciso II do caput (BRASIL, 2004).

O crescimento da implantação da Geração Distribuída representa potenciais benefícios ao setor elétrico, entre eles podem-se destacar (ANEEL, 2015b): (a) o adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição; (b) o baixo impacto ambiental; (c) a redução no carregamento das redes; (d) a minimização das perdas; e (d) a diversificação da matriz energética.

### **1.3 Sistemas Híbridos para Geração de Energia**

No Brasil existem diversas fontes primárias de geração de energia. Dessa forma, a geração distribuída no contexto atual surge como uma realidade de fonte de geração conectada à rede de distribuição (AZEVEDO, 2017).

Sistemas híbridos bem projetados evitam desperdício de geração e contribuem para redução dos custos do kWh e de projeto, tornando a geração combinada mais competitiva em relação aos sistemas de geração tradicionais. Cada sistema híbrido deve ser adaptado para atender às necessidades de geração de energia e dos recursos energéticos específicos disponíveis no local (VIANA, 2009).

Como o enfoque deste trabalho é para uma zona rural, as fontes de geração distribuída que serão utilizadas serão painéis fotovoltaicos e biodigestores. Para os painéis fotovoltaicos, é necessário definir a potência, tendo sido escolhidas várias potências diferentes, de forma a deixar que o processo de otimização defina qual será a utilizada assim como o capital investido para cada potência, podendo ser linear ou não. Outro fator importante para o estudo é a definição correta do índice de insolação da área definida para a instalação dos painéis.

Já para a composição do sistema de geração de biogás, considerou-se que para a alimentação do biodigestor tem-se uma fonte de produção de combustível sem custos de aquisição da matéria-prima, tendo em vista que uma área na zona rural pode usar dejetos suínos. O biodigestor atuará de forma otimizada, funcionando para obter o melhor aproveitamento do biogás, atuando nas horas mais necessárias, sendo o gerador a biogás aquele que atuará nos momentos em que a energia solar não atuar.

A ampliação do uso dos recursos energéticos renováveis, associado às possibilidades de complementariedade das fontes de energia, desponta como possibilidade para a integração de sistemas de geração como solar/eólica, solar/biogás, biogás/eólica, pequena central hidrelétrica/eólica e outras fontes atuando de forma complementar.

O ciclo da cadeia produtiva de suínos tem alcançado cenário de destaque no setor agroindustrial brasileiro. Esse fato é decorrente dos avanços na escala de produção e dos altos investimentos do setor (ITAI, 2012).

Para o IBGE (2013), o efetivo total de suínos ultrapassou a quantia de 36 milhões de cabeças ao término de 2013. A Tabela 1 elenca os seis maiores produtores de suínos no Brasil até o período de 31 de dezembro de 2013.

**Tabela 1. Efetivo de suínos em Estados da Federação.**

Unidades da Federação	Efetivo de suínos (Cabeças)	Participação Relativa no efetivo total (%)
Brasil	36.743.593	100
Rio Grande do Sul	6.320.797	17,2
Santa Catarina	6.270.797	17,1
Paraná	5.322.607	14,5
Minas Gerais	5.073.897	13,8
Goiás	2.060.360	5,6

Fonte: IBGE, 2013.

A Figura 1 apresenta o potencial de geração de energia, em toneladas, a partir do biogás proveniente da suinocultura oriundo dos municípios da Região Centro-Oeste. Sendo que, os cálculos foram realizados pelo Centro Nacional de Referência em Biomassa em 2011.



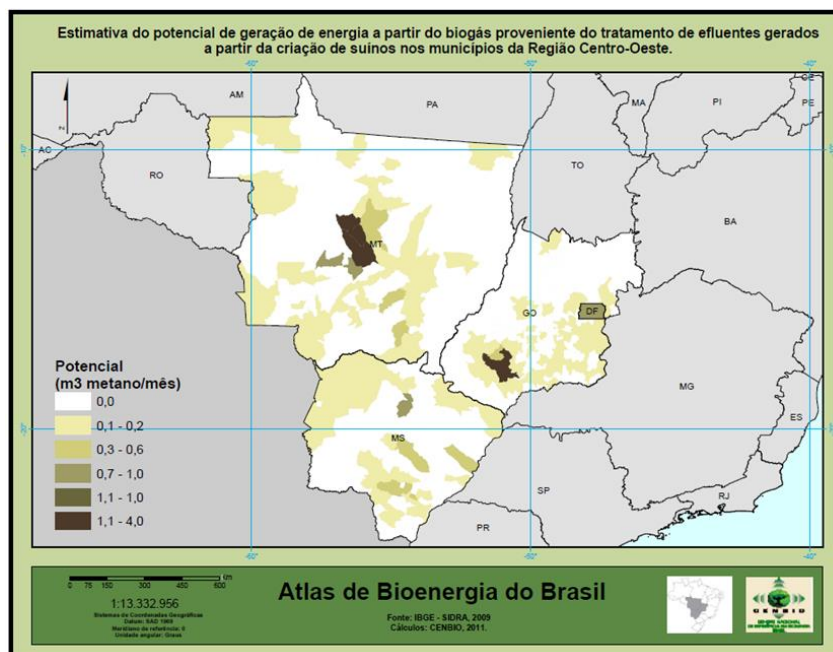


Figura 1. Estimativa do Potencial de Energia oriundo do Biogás Proveniente de Dejetos suínos, em Toneladas. Fonte: Atlas de Bioenergia Brasil, 2012

Percebe-se, pelos dados apresentados, que o Brasil tem considerável capacidade de produzir biogás proveniente de dejetos suínos e, conseqüentemente, possibilidade de produzir energia elétrica.

A geração de energia oriunda do biogás tem potencial considerável para alavancar a economia local, fomentando, assim, diversos setores da indústria e de outros serviços.

### 1.3.1 Produção de Energia Elétrica a partir do Biogás

No Brasil e no mundo, a produção de energia a partir do biogás oriundo de rejeitos da agricultura, como, por exemplo, os dejetos suínos, ainda é bastante incipiente. Porém, na atual conjuntura do setor elétrico, é favorável seu desenvolvimento em função dos elevados custos da energia elétrica e das crescentes pressões ambientais (LEMOS et al., 2008).

O uso do biogás oriundo da biomassa como combustível para geração de energia elétrica não apenas se restringe ao aproveitamento dessa forma sustentável, deste subproduto oriundo dos resíduos sólidos, como também evita a emissão do gás metano na atmosfera, resultante de sua decomposição.

Como matéria-prima para a produção de biogás no Brasil, pode-se citar o aproveitamento de resíduos da cana-de-açúcar, de aterros sanitários e de resíduos rurais

tais como esterco de animais, derivados do cultivo de milho, orgânicos secos derivados da madeira e outros. Os resíduos da pecuária, citados como exemplo de produção rural, são constituídos por dejetos e outros produtos resultantes da atividade biológica do bovino, suíno, aves e outros, cuja relevância local justifica seu aproveitamento energético.

Em julho de 2018, conforme dados da EPE/ANEEL (2018), a biomassa, no contexto do sistema elétrico, contribui com apenas 8,5% na matriz energética brasileira. Dentro deste percentual, o Biogás proveniente de atividades agrícolas representa menos de 1% da geração de energia elétrica em nosso País.

### **1.3.2 Produção de Energia Elétrica a partir do Potencial Solar Brasileiro**

Com um alto potencial e como uma tecnologia bastante promissora, nos últimos anos a energia fotovoltaica vem se destacando internacionalmente. Para EPE/ANEEL (2019), o Brasil tem, atualmente, aproximadamente 2,2GW de capacidade em geração fotovoltaica instalada, o que representa 1,2% da matriz energética brasileira, sendo que 99% se destina ao atendimento de sistemas remotos e isolados, principalmente no que se refere à não disponibilidade de redes de distribuição, que, em muitos casos, não se mostra economicamente viável.

Para a EPE (2012), a Irradiação Global Horizontal (GHI) é a de maior interesse, pois ela quantifica a radiação recebida por uma superfície horizontal plana. A GHI é composta pela Irradiação Difusa Horizontal (DIF), que representa a dispersão e a atenuação da irradiação provocada por reflexões em nuvens, vapores de água, poeiras e outros elementos em suspensão na atmosfera, e pela Irradiação Normal Direta (DNI), parcela que atinge o solo de maneira direta, ou seja, sem reflexões.

O Atlas de Irradiação Solar do Brasil, publicado em 1998 pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em parceria com o Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), foi um dos precursores na avaliação de forma consistente do potencial de energia solar no território brasileiro. Na mesma linha, o Atlas Solarimétrico do Brasil, de 2000, foi elaborado pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), com parceria do Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL). Produzido no âmbito do projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment, SWERA*, em 2006, sob supervisão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Atlas Brasileiro de Energia Solar é outro instrumento para estimar o potencial solar brasileiro.

A energia solar fotovoltaica no Brasil é empregada especialmente em pequenos sistemas isolados ou autônomos instalados em locais não atendidos pela rede elétrica ou em regiões de difícil acesso. Entretanto, como mostra a média anual da radiação solar global horizontal no Brasil, o potencial solar energético do Brasil é substancial, conforme mostra a Figura 2 (PEREIRA et al., 2006). É importante ressaltar que a média anual de insolação do Estado de Goiás, em horas, caso particular desse trabalho, é de 6 horas (ANEEL, 2014).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2018 a Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) chegou a 636,4 TWh, montante 1,7% superior ao de 2016 (625,7 TWh), com crescimento de 1,94% em relação a 2014. A supremacia da geração hidráulica ficou menos acentuada em 2018, ficando com 66,6% na estrutura da OIEE, incluindo a importação de Itaipu, contra os 65,1% verificados em 2017 e os 64%, em 2015 (BEN, 2018).

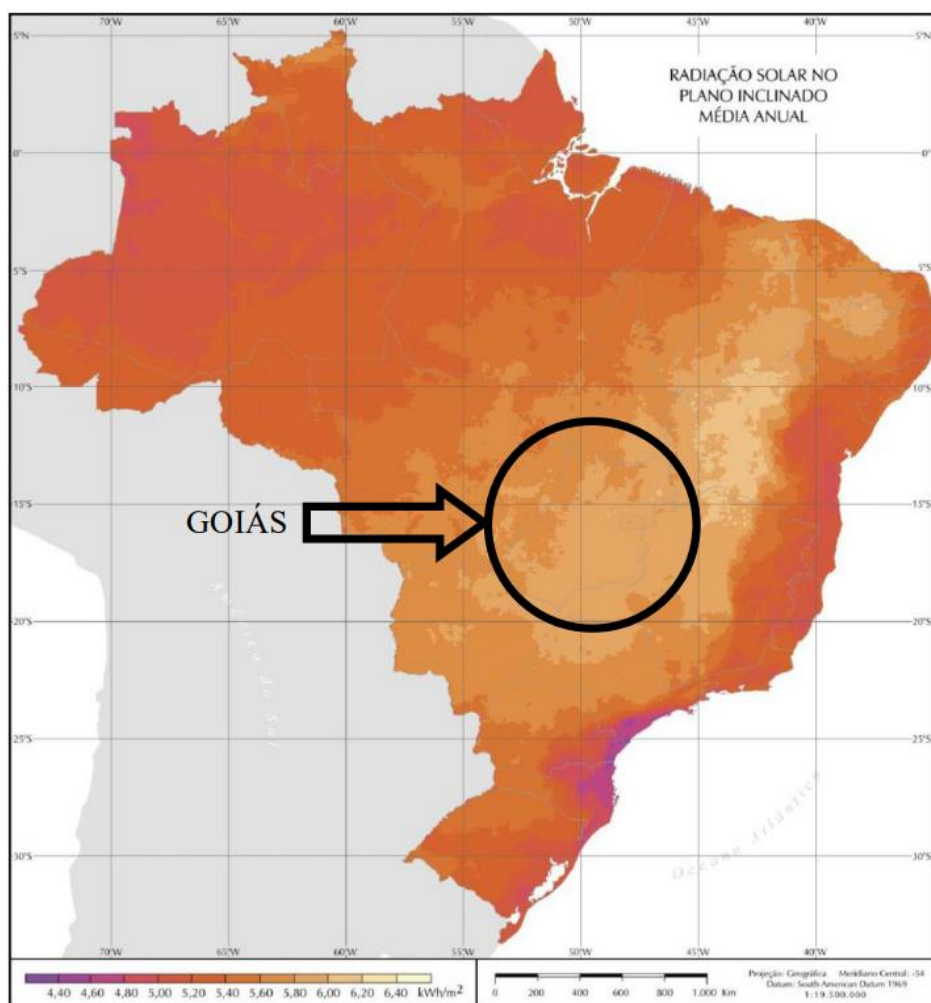


Figura 2. Média anual da radiação solar global horizontal (PEREIRA et al., 2006).

Dois obstáculos para uso da energia solar no Brasil merecem destaque: o custo de compra e instalação dos módulos e a falta de uma política oficial de subsídios. O primeiro já está sendo transposto graças aos avanços tecnológicos, que têm reduzido o custo e aumentado a eficiência dos painéis fotovoltaicos. Já o segundo obstáculo depende da vontade política dos governantes e da conscientização da sociedade - principal fator de pressão junto ao poder público.

#### **1.4 Energia Solar Fotovoltaica**

Um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) é composto basicamente pelo gerador fotovoltaico, inversor solar e rede elétrica local. Isso ocorre porque um SFCR opera em paralelo com a rede de distribuição e dispensa sistema de armazenamento de energia (existem SFCR híbridos com sistema de armazenamento de energia). Além do gerador e do inversor solar, componentes auxiliares são necessários para a composição completa de um SFCR, de acordo com seu tamanho ou sua aplicação específica. Entre os componentes auxiliares, destacam-se estruturas de fixação, cabeamento CC, cabeamento CA, dispositivos de proteção, dispositivos de supervisão e controle, dispositivos de aquisição e armazenamento de dados e equipamentos de transformação de tensão (CRESESB, 2014).

Os geradores de SFCRs são compostos por associações de módulos fotovoltaicos. Os módulos fotovoltaicos, por sua vez, são compostos por células fotovoltaicas conectadas em arranjos para produzir tensão e corrente suficientes para a utilização prática da energia ao mesmo tempo em que promovem a proteção das células (CRESESB, 2014).

Villalva & Gazoli (2012) expressam que o potencial de exploração dessa energia é imenso para a aplicação em micro e minissistemas de geração distribuída, bem como em parques de geração, que funcionam como grandes usinas de eletricidade.

Por determinação da ANEEL, os consumidores podem produzir excedente de energia e serem compensados pela concessionária local. No caso do Estado de Goiás, a Especificação Técnica no. 122 da Enel Goiás define os requisitos para a RN 687 (2015).

A intensidade da radiação solar, denominada de irradiância ( $W/m^2$ ), é definida pela densidade de potência que incide sobre uma superfície plana perpendicular aos raios solares. O Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, elaborado pelo CRESESB (2014), apresenta as relações geométricas entre a incidência dos raios solares e a

geometria da terra através de ângulos, que devem ser levados em conta para definir a radiação incidente em determinado local:

- Ângulo Zenital ( $\Theta_z$ ): Ângulo formado entre os raios solares e a vertical (Zênite)
- Altura Solar ( $\alpha$ ): ângulo compreendido entre o raio solar e sua projeção sobre um plano horizontal;
- Ângulo Azimutal do Sol ( $\gamma_s$ ): ângulo entre a projeção do raio solar no plano horizontal e a direção Norte-Sul. Obedece à mesma convenção acima;
- Ângulo de azimutal da superfície ( $\gamma$ ): ângulo formado entre os raios do Sol e a normal à superfície de captação;
- Inclinação ( $\beta$ ): ângulo entre o plano da superfície em questão e a horizontal; e
- Ângulo de incidência da Superfície ( $\Theta$ ): ângulo formado entre os raios do Sol e a normal à superfície de captação.

A Figura 3 mostra a posição do sol em relação ao plano horizontal (ângulos  $\Theta_z$ ,  $\alpha$  e  $\gamma_s$ ) e a orientação de uma superfície inclinada em relação ao mesmo plano (ângulos  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\gamma_s$  e  $\Theta$ ).

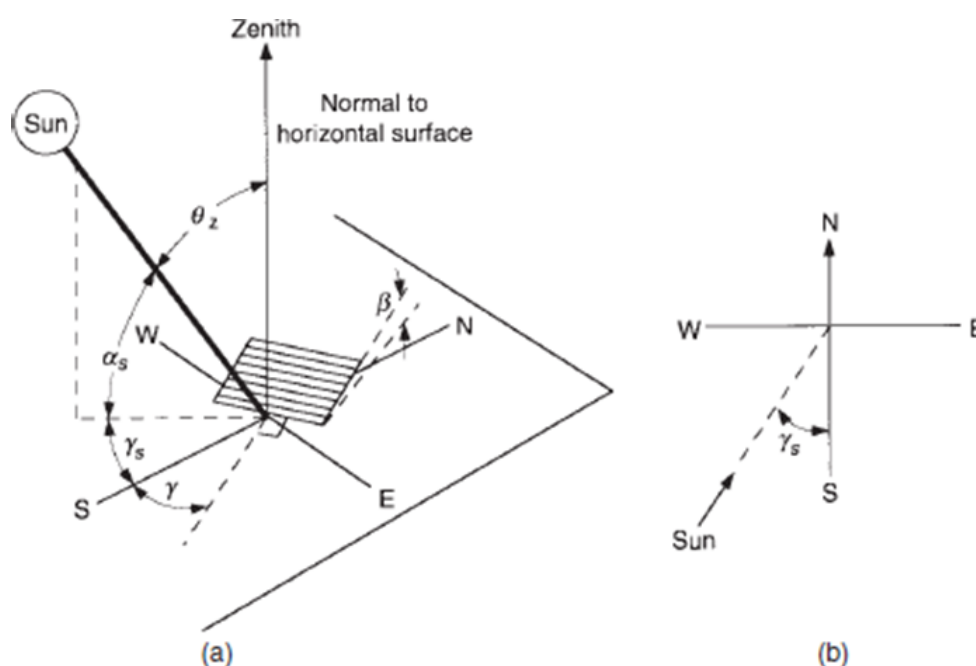


Figura 3. Ângulos característicos da radiação solar e das superfícies dos módulos. Fonte: Solar Engineering of Thermal Processes (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

Além dos ângulos supramencionados, pode-se citar também o ângulo  $\omega$  (Ângulo Horário do Sol ou Hora Angular), que representa o deslocamento angular Leste-Oeste do meridiano do Sol, a partir do meridiano local, devido ao movimento de rotação da Terra.

Cada hora solar corresponde a um deslocamento de 150. Quanto mais distante de 900 a radiação estiver em relação à superfície, menor seu valor. Sendo assim, as horas do dia interferem diretamente na energia que será gerada.

Conforme prescrito em CRESESB (2014), a radiação solar que atinge a superfície terrestre e incide sobre uma superfície receptora para geração de energia pode ser dividida em uma componente direta, que é aquela que provém diretamente da direção do sol e produz sombras nítidas, e uma componente difusa, que é proveniente de todas as direções e que atinge a superfície após sofrer espalhamento sobre a superfície terrestre. Além destas duas, se a superfície estiver inclinada em relação à horizontal, haverá uma terceira componente, chamada de Albedo, que representa a parcela refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, rochas, entre outros), considerada no valor de 20%.

### 1.5 Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica

Para a realização do dimensionamento tradicional, é necessário ter os dados técnicos dos módulos fotovoltaicos que serão utilizados, de forma a determinar a quantidade de energia produzida pelo painel no local de sua instalação.

O número de módulos fotovoltaicos a serem implementados pode ser calculado pela seguinte fórmula (VILLALVA; GAZOLI, 2012):

$$N_p = \frac{E_{sistema}}{E_{módulo}} \quad (1)$$

onde:

$N_p$  é o número de módulos da instalação fotovoltaica;

$E_{sistema}$  é a energia produzida pelo sistema [kWh] no intervalo de tempo considerado; e

$E_{módulo}$  é a energia produzida por um módulo [kWh] no intervalo de tempo.

Considere que:

$$E_{módulo} = E_s * A_M * \eta_M \quad (2)$$

onde:

$E_{módulo}$  é a energia produzida por um módulo [kWh] no intervalo de tempo;

$E_s$  é a insolação diária [W h/m<sup>2</sup>/dia];

$A_M$  é a área da superfície do módulo; e

$\eta_M$  é a eficiência do módulo.

Considere ainda que:

$$\eta_M = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_M * 1000} \quad (3)$$

onde:

$\eta_M$  é a eficiência do módulo;

$A_M$  é a área da superfície do módulo; e

$P_{m\acute{a}x}$  é a potência máxima ou de pico do módulo [W].

Substituindo a Equação 1 e a Equação 2 na Equação 3, e considerando um período de 1 mês (30 dias), obtém-se:

$$N_P = \frac{E_{sistema} * 1000}{E_S * P_{m\acute{a}x} * 30} \quad (4)$$

Buscando uma maior proximidade com a realidade e com as tendências do mercado, é necessária a introdução de uma nova variável na Equação 4, sendo nossa nova Equação definida por:

$$N_P = \frac{E_{sistema} * 1000}{E_S * P_{m\acute{a}x} * 30 * \eta} \quad (5)$$

$\eta$  é a eficiência do projeto fotovoltaico (inferência padrão de 83% (ATOMRA, 2014) (perdas na geração e transmissão de potência).

Para o dimensionamento do inversor a ser instalado no sistema deve-se levar em consideração os seguintes critérios (VILLALVA; GAZOLI, 2012):

- A tensão de circuito aberto da string não deve ultrapassar a tensão máxima permitida na entrada do inversor; e
- O inversor deve ser especificado para uma potência de mesmo ou maior valor que a potência de pico do conjunto de módulos (Fator de Diversidade do Inversor).

## 1.6 Taxa de Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos - Performance Ratio (TD)

A taxa de desempenho, do inglês Performance Ratio (PR), é um indicador aceito globalmente para analisar o desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Diversos países vêm utilizando a taxa de desempenho para avaliar o desempenho de seus sistemas fotovoltaicos, auxiliando tais países a aumentar continuamente o desempenho de seus sistemas fotovoltaicos, corrigindo falhas do sistema e, assim, planejando melhores decisões de investimento (KHALID et al., 2016).

A taxa de desempenho (TD) é definida na IEC 61724 (IEC, 2013), sendo uma métrica comumente usada para medir o desempenho da planta fotovoltaica (FV) solar para testes de aceitação e operação. O cálculo do TD pode ser feito por diversas fórmulas, algumas consideram a razão entre a energia produzida pelo sistema fotovoltaico e a energia que deveria ser produzida teoricamente (IEC, 2013), outras apresentam fórmulas mais robustas com fatores de correção que ajustam o valor de TD.

Muitos desses fatores são indicadores da qualidade de projeto e construção da planta fotovoltaica, sendo o TD uma taxa bastante utilizada por empresas e financiadores para avaliar contratos de plantas fotovoltaicas. No entanto, alguns desses fatores também são dependentes do tempo. Mais notavelmente, as condições climáticas afetam o TD, afetando a temperatura do módulo. Para muitos financiadores, esta é uma característica atraente do TD porque ajuda a entender quais locais fornecerão as plantas mais produtivas. Por exemplo, um local mais frio proporcionará um TD mais elevado, implicando mais geração de eletricidade se tudo o mais for igual (DIERAUF et al., 2013).

O valor percentual da taxa de desempenho varia de acordo com as condições locais de instalação e com a qualidade do sistema fotovoltaico. Diversos autores na literatura retratam estudos e previsões de intervalos do valor de TD. Segundo Decker e Jahn (1997), as taxas de desempenho podem variar de 60% a 79%, já para Reich et al. (2012), o valor de TD pode variar entre 70% e 90%. Buscando uma estimativa deste intervalo, o Laboratório Nacional de Energias Renováveis (RNEL) conduziu um levantamento bibliográfico, encontrando um intervalo típico de TD entre 60% e 90% (DIERAUF et al., 2013).

## **1.7 Biogás e Biomassa**

A biomassa, como fonte de combustível renovável, é definida por Sousa (2012) como sendo material biológico de organismos vivos ou que até recentemente eram vivos. Como fonte de energia renovável, ela pode ser usada de forma direta ou indireta, sendo convertida em biocombustíveis. De acordo com o autor, a geração de energia através da biomassa residual vem sendo muito empregada, com destaque para a geração originada por aterros sanitários municipais, resíduos de indústrias, lodos de esgoto e gases de aterros.

As propriedades agrícolas estão se preocupando recentemente com o aumento de seus custos de produção e manutenção, causados pelos acréscimos dos valores de tarifa



de energia elétrica. Além disso, o custo com fertilizantes também tem aumentado. Isto, somado à poluição causada pelos dejetos das atividades agrícolas, cria um cenário para que os agricultores possam avaliar a opção de autoprodução de energia elétrica a partir dos dejetos.

De acordo com Nogueira (2004), existem diversos processos de conversão da biomassa, sendo que a digestão anaeróbica, por ser um processo simples de conversão, não precisa de elevadas temperaturas. O processo ocorre em biodigestores e utiliza dejetos de animais como fonte de biomassa (Figura 4).

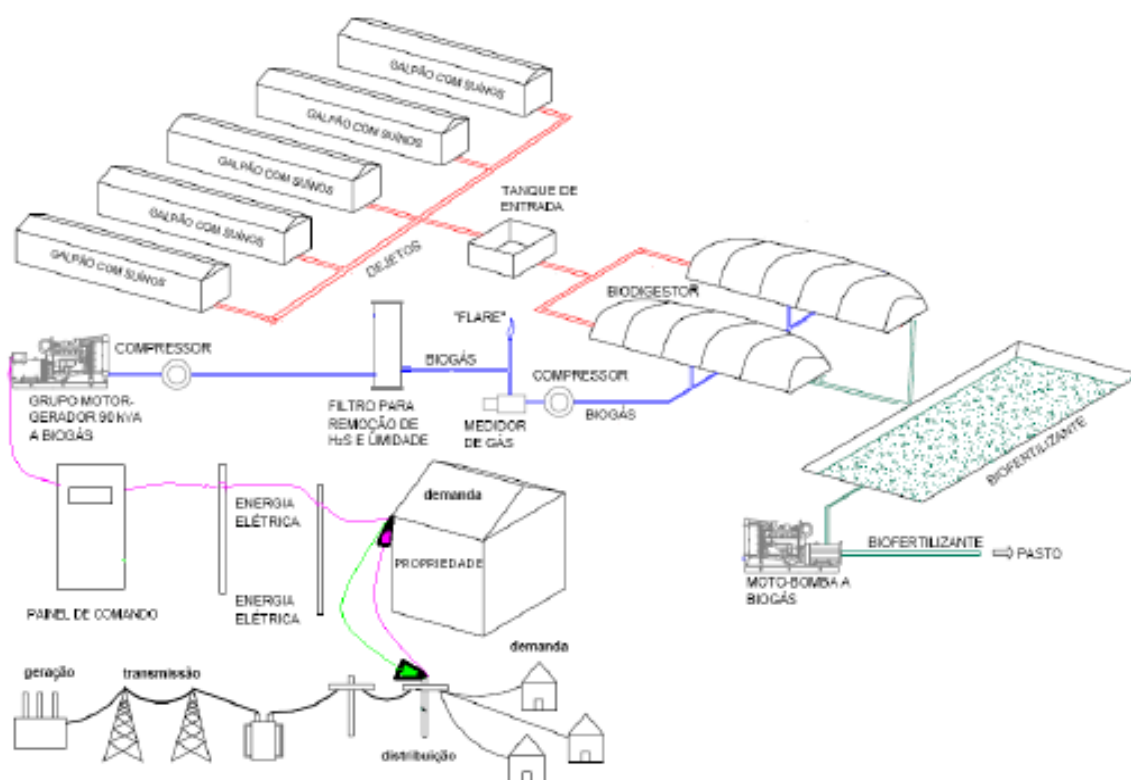


Figura 4. Diagrama esquemático de funcionamento dos sistemas de produção de biogás, biofertilizante e energia elétrica. Adaptado de NISHIMURA (2009).

O biogás é um gás resultante da fermentação anaeróbica de dejetos de animais, resíduos vegetais, lixo industrial ou residencial, em condições adequadas. É constituído principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Geralmente o biogás apresenta em torno de 50% a 80% metano e PCI entre 4,95 e 7,92 kWh/m<sup>3</sup>, sendo o restante composto na maior parte por dióxido de carbono e alguns outros gases, porém, em menores concentrações. A Tabela 2 apresenta a faixa de concentração típica dos componentes do biogás.

**Tabela 2. Composição do biogás**

<b>Gás</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Concentração no Biogás (%)</b>
Metano	CH <sub>4</sub>	50 - 80
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	20 - 40
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	1 - 3
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	0,5 - 3
Gás Sulfídrico e outros	H <sub>2</sub> S, N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , CO, O <sub>2</sub>	1 - 5

Fonte: (CGEE, 2010; BROZZATI, 2008).

No âmbito deste estudo, a geração de energia elétrica a partir do biogás será avaliada por Grupos de Motores Geradores (GMG) com motores de combustão interna de ciclo Otto. Segundo Çengel e Boles (2013), as eficiências térmicas para motores de ignição por centelha variam de cerca de 25% a 30%, enquanto nos motores ciclo Diesel, as eficiências variam entre 35 e 40%.

Os geradores elétricos acoplados no motor, no entanto, têm eficiências maiores na conversão da energia mecânica para energia elétrica, variando entre 82 e 92%, que são apresentadas no manual do fabricante (MITZLAFF, 1988). A qualidade do biogás pode interferir no funcionamento dos motores, podendo ocorrer detonação com diferentes composições de gás, devendo ser assegurada uma concentração de metano de pelo menos 45% (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2011).

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

O sistema proposto no projeto é composto por uma máquina primária e um gerador elétrico de corrente alternada montados em uma mesma plataforma, dotada de equipamentos eletrônicos para supervisão e controle. O GMG deverá suprir a energia elétrica requerida pela carga e ter a unidade de supervisão de corrente alternada (USCA). A USCA tem os recursos de controle e monitoração de partidas e paradas, leituras de tensão, corrente, frequência e temperatura de operação, além de sinalizar excesso de temperatura, excesso de carga e o nível de combustível. A Figura 5 ilustra um exemplo de GMG a biogás, com potência de geração de até 330 kVA, da empresa ERBR Renováveis.



Figura 5. Grupo Motor Gerador a biogás de 330 kVA da ERBR Renováveis. Fonte: Autor.

Os GMG a biogás, biodiesel e biomassa, projetos de fonte de geração de energia elétrica renovável, são uma solução para atender à instabilidade de fontes de energias alternativas, como eólicas, fotovoltaicas e pequenas centrais hidrelétricas, e estão dentro dos propósitos do Mecanismo Desenvolvimento Limpo (MDL) (PINHO, 2008).

Ressalta-se que as principais dificuldades de se usar o biogás no Brasil para a geração de energia elétrica são os altos investimentos iniciais necessários para implantar uma planta de geração de biogás, poucas pesquisas na área de digestão anaeróbica e a falta de um plano nacional de biogás com incentivo do governo federal (SOLOMON, 2009).

### 1.8 Biodigestores

O biodigestor é um tanque protegido do contato com o ar atmosférico, onde a matéria orgânica contida nos efluentes é metabolizada por bactérias anaeróbicas. Neste processo, os subprodutos obtidos são o gás (biogás), uma parte sólida que decanta no fundo do tanque (biofertilizante), e uma parte líquida que corresponde ao efluente mineralizado (tratado).

Os biodigestores são equipamentos apropriados ao recebimento dos dejetos que são formados pela urina e fezes, restos de alimentação, sendo assim, há inúmeras vantagens em sua instalação junto às propriedades rurais.

Para Pereira (2009), as exigências são mínimas em relação às vantagens de instalação do biodigestor de dejetos suínos nas propriedades rurais (Figura 6).

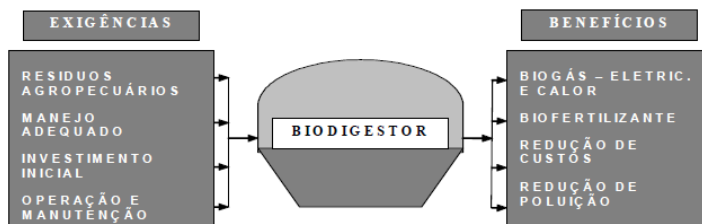


Figura 6. Exigências e vantagens da biodigestão (PEREIRA, 2009)

O processo de geração do metano em biodigestores pode ocorrer em três níveis de temperatura. Com temperatura entre 45 e 60° C, o processo é considerado termofílico; de 20 a 45° C, é mesofílico; e a digestão anaeróbia de matéria orgânica em temperaturas menores que 20° C é chamada de digestão psicofílica. A maioria dos biodigestores anaeróbios tem sido projetada na faixa mesófila. Destaque-se que mudanças bruscas de temperatura podem afetar o desempenho da digestão adversamente, segundo Parkin & Owen (1986).

O tipo de biodigestor mais utilizado é o modelo canadense, caracterizado por ter uma base retangular construída de alvenaria, onde é depositado o substrato, e o gasômetro feito em manta flexível de PVC fixa sobre uma valeta coberta de água que circunda a base (Figuras 7 e 8). No Brasil, foram feitas simplificações do modelo canadense original (Figura 7).

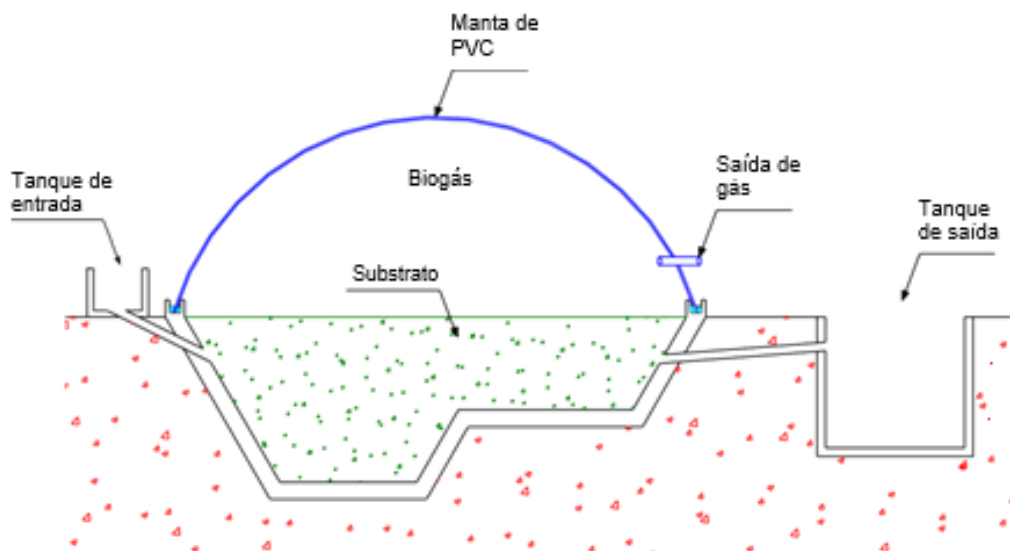


Figura 7. Biodigestor modelo canadense. Fonte: Adaptado de AgCert (2005).



Figura 8. Exemplo de biodigestor canadense. Fonte: Autor

A cobertura consiste de uma geomembrana sintética de polietileno de alta densidade (PEAD), que é fixada por um sistema de ancoragem ao redor de todo o perímetro do biodigestor. Registre-se que biodigestores com grandes gasômetros podem representar risco à segurança dos produtores, em razão da ação mecânica dos ventos. Essa ação pode provocar vazamentos de gás e ocorrência de combustão fora de controle.

Muitas vezes, os biodigestores adotados entre os produtores de suínos não passam de “simples esterqueiras cobertas”, que nem sempre são adequadamente projetadas. Além disso, os dejetos tendem a ser extremamente liquefeitos, com baixa concentração de sólidos voláteis. Isso geralmente ocorre por excesso de água em bebedores, pela entrada de água de chuva e pela lavagem inadequada das baias (OLIVEIRA, 2006).

Uma grande preocupação referente ao crescimento e expansão do setor de suínos é o tratamento e a destinação adequada dos dejetos, que têm alta carga poluente. A falta de tratamento adequado e destinação incorreta pode ocasionar contaminação do solo, dos lençóis freáticos, de rios e do ar, podendo também trazer doenças para a população.

Sendo assim, o uso de biodigestores para tratamento destes dejetos, em alternativa a processos convencionais de lagoas ou tanques de estabilização, pode trazer grande melhoria para o meio ambiente e ser uma fonte de renda para o produtor, que pode gerar energia a partir do biogás gerado na digestão anaeróbia dos dejetos. Além disso, o resíduo formado ao fim do processo de digestão pode ser aplicado como fertilizante (OLIVEIRA et al., 2011).

### 1.8.1 Equacionamentos de Biodigestores e de Grupo Geradores a Biogás

Se o gerador funcionar em uma hora específica, é calculado o consumo de combustível para essa hora, usando a Equação 6.

$$F = F_0 Y_{gen} + F_1 P_{gen} \quad (6)$$

onde:

$F$  = Consumo de Combustível em Determinado Horário (L);

$F_0$  = Coeficiente de Interceptação da Curva de Combustível do Gerador (L/hr/kW);

$F_1$  = Inclinação da Curva de Combustível do Gerador (L/hr/kW);

$Y_{gen}$  = Capacidade Nominal do Gerador (kW);

$P_{gen}$  = Saída do Gerador em Determinado Horário (kW).

Define-se a eficiência elétrica do gerador à medida que a energia elétrica é distribuída e dividida pela energia química do combustível que entra. A Equação 7 dá essa relação.

$$\eta_{gen} = \frac{3.8 * P_{gen}}{\dot{m}_{fuel} * LHV_{fuel}} \quad (7)$$

onde:

$P_{gen}$  = Potência de Saída (kW);

$\dot{m}_{fuel}$  = Taxa de Fluxo Bruta do Combustível (kg/hr);

$LHV_{fuel}$  = Menor Valor de Aquecimento do Combustível (MJ/kg).

A taxa de fluxo de massa do combustível está relacionada a  $F$ , o consumo de combustível do gerador, mas a relação exata depende das unidades do combustível. Se as unidades de combustível são de kg, então  $\dot{m}_{fuel}$  e  $F$  são iguais, então a equação para combustível é a Equação 8.

$$\dot{m}_{fuel} = F = F_0 Y_{gen} + F_1 P_{gen} \quad (8)$$

Se a unidade de combustível for Litro (L), a relação entre  $\dot{m}_{fuel}$  e  $F$  envolve a densidade. A equação para  $\dot{m}_{fuel}$  é a Equação 9.

$$\dot{m}_{fuel} = \rho_{fuel} * \frac{F}{1000} = \frac{\rho_{fuel} * F_0 Y_{gen} + F_1 P_{gen}}{1000} \quad (9)$$

em que  $\rho_{fuel}$  é a densidade do combustível em kg/m<sup>3</sup>. Se as unidades de combustível forem em m<sup>3</sup>, o fator de 1000 é desnecessário, e a Equação 10 para o combustível móvel é apresentada a seguir:

$$\dot{m}_{fuel} = \rho_{fuel} * F = \rho_{fuel} * F_0 Y_{gen} + F_1 P_{gen} \quad (10)$$

Desenvolvendo ainda mais a equação de eficiência para o caso em que as unidades de combustível são em Litros, neste caso, a Equação 11 surge:

$$\eta_{gen} = \frac{3.600 * P_{gen}}{\rho_{fuel} * (F_0 Y_{gen} + F_1 P_{gen}) * LHV_{fuel}} \quad (11)$$

Se dividir o numerador e o denominador por  $Y_{gen}$ , a capacidade do gerador, e definir um novo símbolo  $p_{gen}$  para a saída relativa do gerador, então teremos a Equação 12.

$$\eta_{gen} = \frac{3600 * P_{gen}}{\rho_{fuel} * (F_0 + F_1 P_{gen}) * LHV_{fuel}} \quad (12)$$

Essa equação dá a eficiência do gerador em função de sua saída relativa. E essa relação é traçada na curva de eficiência quando as unidades de combustível são em L. Se as unidades de combustível forem em  $m^3$ , teremos a Equação 13.

$$\eta_{gen} = \frac{3.6 * P_{gen}}{\rho_{fuel} * (F_0 + F_1 P_{gen}) * LHV_{fuel}} \quad (13)$$

Por fim, se as unidades de combustível forem em kg, a equação de eficiência torna-se a Equação 14.

$$\eta_{gen} = \frac{3.6 * P_{gen}}{(F_0 + F_1 P_{gen}) * LHV_{fuel}} \quad (14)$$

Todo o equacionamento foi utilizado para alcançar os valores obtidos nas tabelas do Capítulo 3 (LILIENTHAL; LAMBERT e GILMAN, 2017).

## 1.9 Software HOMER Energy

O HOMER®, desenvolvido pela *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), permite a seus usuários uma comparação de diferentes opções de projetos de sistemas (renováveis ou não renováveis), com base na análise técnica e econômica. O programa pode executar três importantes tarefas: a simulação, a otimização e a análise de sensibilidade. Neste trabalho, será utilizado o HOMER, Version 2.68 beta.

O processo de simulação determina as configurações possíveis para o Sistema Híbrido GD, avaliado pela combinação das capacidades disponíveis dos componentes do Sistema Híbrido GD e da estratégia de operação, que define como os componentes operam em conjunto. A cada hora do dia, o programa compara a potência requerida pela carga e a capacidade do sistema em fornecer a energia, decidindo como as fontes definidas

pele usuário são despachadas. A medida que o HOMER® utiliza para representar o custo do sistema durante a vida útil dele é o valor presente líquido (VPL). Esse valor inclui todos os custos de aquisição, reposição, de manutenção e operação durante a vida útil do projeto, considerando os fluxos de caixa futuros no valor presente (SILVA, 2010; MACHADO, 2013). A Figura 9 apresenta o fluxograma básico geral do programa.

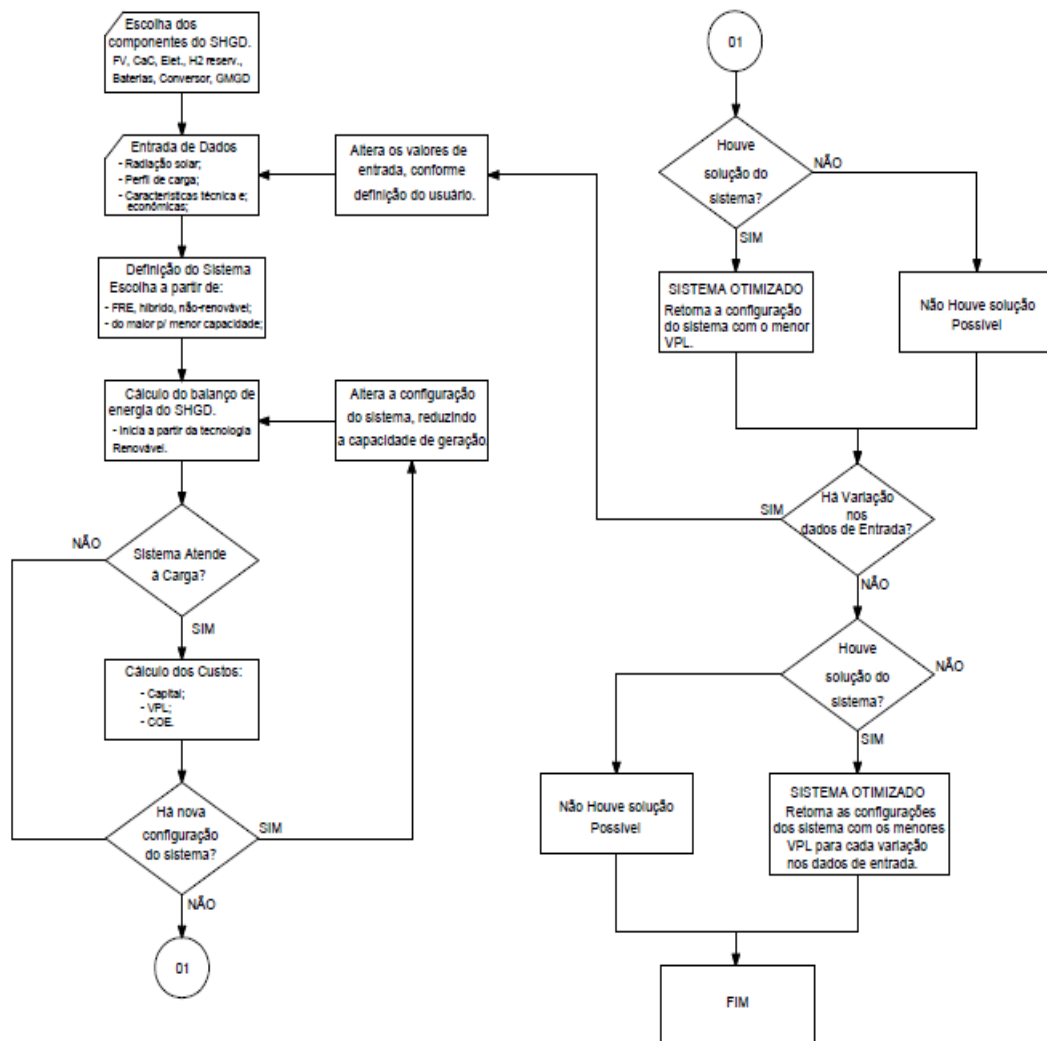


Figura 9. Fluxograma básico de funcionamento do HOMER®. (SILVA, 2010).

A otimização determina o valor ótimo das variáveis, sobre o qual o usuário tem o controle no sistema, como os diferentes componentes, capacidades e quantidades de cada componente. No HOMER®, a solução ótima é considerada aquela que satisfaz as restrições impostas pelo usuário com menor VPL. No processo de otimização, o programa simula várias configurações diferentes do Sistema Híbrido GD, descartando aquelas em



que as soluções não são factíveis, criando uma lista das soluções possíveis ordenadas do menor para o maior VPL (SILVA, 2010; MACHADO, 2013).

A análise de sensibilidade ajuda a estimar os efeitos das incertezas ou mudanças nas variáveis sobre as quais o usuário não tem controle, como média da radiação solar ou preço futuro de um combustível ou componente. A análise de sensibilidade pode ajudar o projetista do Sistema Híbrido GD a compreender os efeitos de incertezas inerentes a esse tipo de projeto, auxiliando na tomada de decisões sobre diferentes condições de incertezas, tais como preço de componentes, combustível, taxas de investimentos ou variações climáticas.

Para calcular o VPL, o HOMER® calcula o custo de cada componente para o período de um ano, denominado custo anualizado ( $C_{ann}$ ). O custo anualizado de um componente é igual a seu custo anual de operação, mais o custo do capital e o custo de reposição anualizado sobre a vida útil do projeto. O HOMER® soma o valor anualizado de cada componente para encontrar o custo total anualizado ( $C_{total\_ann}$ ). A seguinte equação é utilizada para o cálculo do valor presente líquido:

$$VPL = \frac{C_{total\_ann}}{FRC(t, i)} \quad (15)$$

Onde:

$C_{total\_ann}$  custo total anualizado;

$FRC(t, i)$  fator de recuperação de capital;

$t$  tempo estimado do projeto;

$i$  taxa de juro real.

O fator de recuperação do capital pode ser calculado por (CAMARGO, 1998):

$$FRC = \frac{i(1+i)^t}{(1+i)^t - 1} \quad (16)$$

O HOMER® define o custo de energia (COE) como a média do custo por kWh de energia elétrica útil produzida pelo sistema. Para o cálculo do COE, HOMER® divide o custo total anualizado de produção de eletricidade pela energia útil consumida pela carga no ano ( $E_{total}$ ).

$$COE = \frac{C_{total\_ann}}{E_{total}} \quad (17)$$

Adicionalmente, o programa possibilita análises de sensibilidade que avaliam o impacto da variação de parâmetros de carga, da disponibilidade de recursos e do custo dos equipamentos e dos combustíveis.

#### **1.10 Emissões de Poluentes e Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)**

Atualmente, o setor elétrico brasileiro é suprido basicamente por fontes hidrelétricas e termelétricas. A geração de energia proveniente das usinas hidrelétricas corresponde a mais da metade da matriz geradora de eletricidade no Brasil. Já as usinas termelétricas ocupam o segundo lugar na matriz energética brasileira, que utiliza variados combustíveis, sendo os mais relevantes carvão, óleo, gás natural e biomassa (ANEEL, 2017). Por estar disponível em abundância e pelo custo, o carvão tem se tornado uma importante opção no sistema energético no Brasil (EPE, 2015). Entre os combustíveis fósseis, as termelétricas a gás natural ganham espaço por serem consideradas a fonte mais limpa. O gás natural é considerado combustível de queima limpa por emitir menos dióxido de carbono e outros gases poluentes (AZENHA, 2010; EPE, 2015).

O setor elétrico é responsável por 41,44% das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) do mundo (IEA, 2017), sendo assim, é importante não negligenciar as emissões de tais gases. As estimativas das emissões de hidrelétricas têm oscilações que mostram desde valores negativos até valores superiores àqueles encontrados para a termelétricidade a carvão mineral. Grande parte das emissões das hidrelétricas está relacionada com a decomposição da biomassa submersa em seus reservatórios, não havendo consenso para medir tais emissões, pois elas dependem das características dos reservatórios. O fator de emissão estimado para a matriz brasileira é de 104,4gCO<sub>2</sub>eq/kWh, segundo a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (MIRANDA, 2012; BEN, 2018).

O mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) representa uma alternativa interessante para estimular a implementação de empreendimentos sustentáveis sob os aspectos econômico, ambiental e social, principalmente em setores considerados potencialmente poluidores. As RCEs (Reduções Certificadas de Emissão) obtidas com projetos de MDL foram iniciadas no ano de 2009, em queda, ao longo do ano apresentou algumas oscilações e fechou o ano com o valor aproximado de €11.

Segundo Breyer (2015), em um mundo limitado pela mudança climática, é de extrema relevância que as tecnologias de energia ofereçam um baixo nível de emissões de gases de efeito estufa, em um nível de custo comparativamente baixo.

Para que resultem em Certificados de Emissão Reduzida (CER), as atividades de projeto do MDL devem necessariamente passar por diversas etapas no ciclo de projeto, cada qual com um custo distinto. Discrimina-se na Figura 11 o fluxo de sete processos presentes no ciclo completo

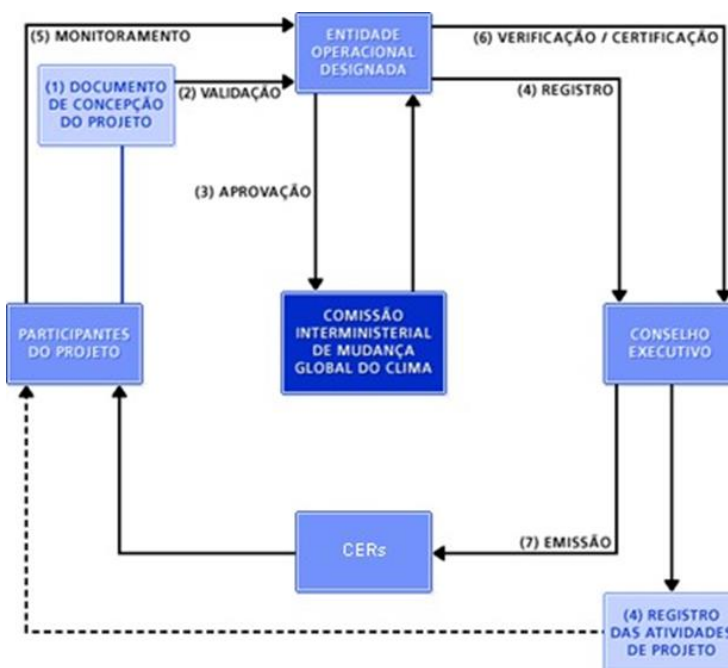


Figura 10. Ciclo de projeto do MDL. Fonte: BM&FBOVESPA, 2010.

### 1.10.1 Mercados de Carbono

Existem atualmente uma variedade de referências de preços, formas de comercialização e maneiras de contratação no mercado de carbono para venda e compra de sua moeda: os Certificados de Emissão Reduzida (CER). A oferta e a demanda são encontradas de diferentes maneiras: através de flexíveis acordos bilaterais, negociação de balcão entre as partes (instituições financeiras, comercializadoras independentes, empresas privadas, entidades jurídicas federais e municipais, entre outras); e através de negociações em bolsas internacionais por meio de contratos futuros, de opções e à vista.

Existindo diferentes custos de abatimento de Gases de Efeito Estufa (GEE), passam a existir incentivos econômicos para que empresas comecem a oferecer este tipo de serviço, denominado comércio de emissões (*emissions trade*). Cria-se, portanto, um

valor de mercado para o carbono. O nível de incerteza do mercado é bem ilustrado na Figura 11, mostrando a volatilidade dos preços desde junho de 2018 na bolsa EEX EUA. Atualmente o valor é de €25 t/ CO<sub>2</sub>

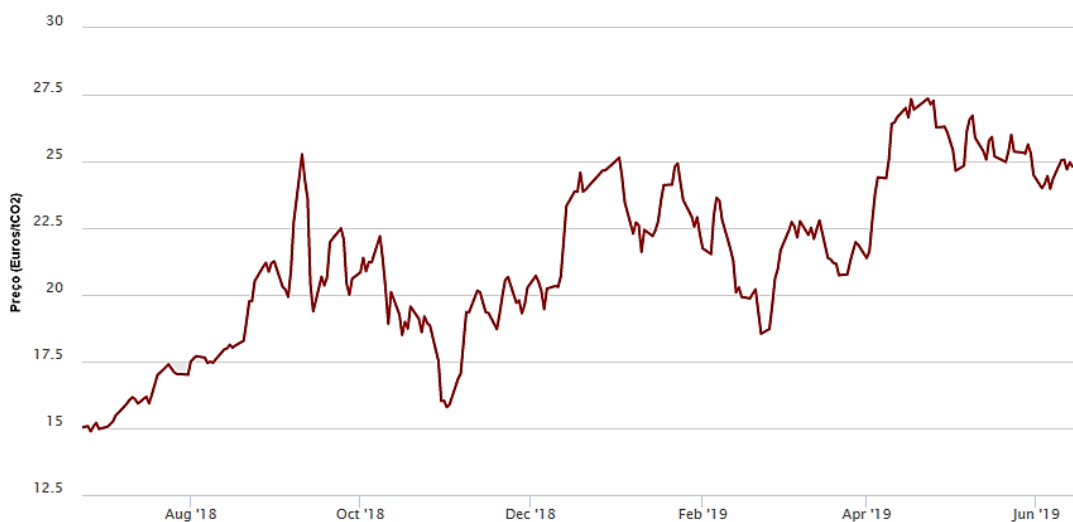


Figura 11. Preço contratos futuros ECX EUA. Fonte: adaptado de ECX, 2019.

### 1.11 Ferramentas de Análise Econômica

Sabe-se que algumas alternativas tecnológicas que apresentam maior eficiência técnica muitas vezes não trazem maior economia financeira ou maior lucro para as organizações, pois são tecnologias que exigem altos investimentos, valor esse que não retorna ao investidor durante o horizonte de planejamento.

Nesse caso, as organizações definem algumas prioridades para o sistema (maior eficiência ou maior economia financeira). Para efetuar essa análise, a matemática financeira permite realizar um estudo de viabilidade econômica com ferramentas de engenharia econômica que servem aos propósitos de racionalização de recursos que auxiliam na tomada de decisão nos investimentos.

Ao analisar as referências citadas neste trabalho, percebe-se que muitos autores tratam as ferramentas econômicas de formas diferentes, ou seja, compreendem os projetos de forma simplificada ou mais detalhada, porém todas as leituras possíveis visam a verificar a viabilidade de um investimento. Na análise econômica simplificada, utilizada por muitos pesquisadores, são apresentados dois ou três indicadores (VPL, TIR e Payback em geral) para estudo do projeto. Nesse caso, não há uma separação com relação aos indicadores de risco ou de retorno (SOUZA; CLEMENTE, 2000).

Para Kreuz, Souza e Clemente (2008), na análise detalhada (análise de multi-indicadores), são apresentados dois grupos de indicadores: os de rentabilidade do projeto e os de risco do mesmo. Nos indicadores de rentabilidade, estão incluídos o Valor Presente Líquido (VPL), o Valor Presente Líquido Anualizado (VPLA), o Índice Benefício Custo (IBC) e o Retorno Adicional sobre o Investimento (ROIA). Nos indicadores de risco, estão incluídos a Taxa Interna de Retorno (TIR), o Período de Recuperação do Investimento (Payback) e o Ponto de Fisher.

Nas subseções deste capítulo, são apresentadas as ferramentas econômicas e as configurações de parâmetros econômicos utilizadas nesta pesquisa com o intuito de verificar a viabilidade econômica de pequenas centrais de geração de energia térmica e elétrica com o aproveitamento energético da cama de aviário. São considerados parâmetros econômicos os custos dos equipamentos (investimento inicial), a aquisição dos sistemas com recursos próprios ou financiados, o fluxo de caixa (receitas e despesas), a depreciação dos equipamentos/instalações, a tributação (imposto de renda) sobre o fluxo de caixa e a correção da inflação. Frente a esses indicadores a serem considerados na análise, as ferramentas econômicas permitem uma avaliação adequada dos investimentos a serem realizados pelo investidor, tendo em vista que, em muitos casos, esses investimentos envolvem grandes quantias monetárias.

### **1.11.1 Fluxo de Caixa**

O fluxo de caixa é uma das muitas ferramentas econômicas utilizadas para verificar a viabilização de um projeto. Trata-se de uma representação gráfica de recursos monetários que entram e saem do caixa ao longo de um determinado horizonte de planejamento. Também se pode definir fluxo de caixa como uma demonstração das receitas e despesas distribuídas em um período (KREUZ; SOUZA; CLEMENTE, 2008).

### **1.11.2 Tributação sobre o Fluxo de Caixa Líquido**

Para calcular corretamente o fluxo de caixa de uma organização, é necessário conhecer as tributações às quais ela está sujeita. Os encargos tributários são definidos pelo código tributário nacional. De acordo com esse código, o imposto deve ser aplicado sobre os lucros de qualquer natureza de todas as pessoas jurídicas, sendo uma tributação de competência da união. O Imposto de Renda (IR) incide sobre a apuração dos resultados contábeis de pessoas físicas e jurídicas. Para a pessoa jurídica, a forma de tributação pode

ser simples, lucro presumido, lucro real e lucro arbitrado para um período de apuração (RECEITA FEDERAL, 2012).

Segundo a Receita Federal (2012), a alíquota do imposto de renda em vigor é de 15% sobre o lucro real, presumido ou apurado pelas pessoas jurídicas em geral, seja comercial ou civil o seu objeto. Para os valores dos investimentos que são financiados, também se paga a alíquota de 15% de IR sobre o valor pago que corresponde à amortização do saldo devedor.

A consideração da tributação sobre o fluxo de caixa é fundamental para fazer uma análise adequada dos projetos a serem viabilizados. Muitos estudos de viabilidade econômica são realizados, mas não consideram a tributação. Assim, a análise não confere com a realidade do projeto por não considerar a alíquota de IR (KREUZ; SOUZA; CLEMENTE 2008).

### **1.11.3 Inflação**

As decisões de empresas para um determinado investimento consideram a inflação um indicador de risco para o negócio, pois ela é a variação da moeda ao longo do tempo, ocasionada pela elevação dos preços dos produtos e serviços. A inflação afeta diretamente o fluxo de caixa no qual a moeda de única data precisa fazer a correção da inflação no período analisado (HJI, 2010). Para este trabalho, foi utilizado como valor inflacionário o valor médio do Índice Nacional de Preços ao Consumidor (IPCA) dos anos de 2004 a 2011.

### **1.11.4 Depreciação Contábil dos Equipamentos e Instalações**

A depreciação é caracterizada como a diminuição de valor de equipamentos e instalações ocasionada em decorrência de desgaste ou perda de utilidade pelo uso, pela ação da natureza ou por obsolescência (RECEITA FEDERAL, 2012).

A depreciação dos bens é computada como custos ou despesas operacionais. Atualmente, a depreciação dos bens e instalações é tabelada de acordo com a Instrução Normativa SRF (Secretaria da Receita Federal) nº162, de 31 de dezembro de 1998, da Receita Federal. Nessa instrução, estão definidos a taxa anual de depreciação bem como os anos de vida útil de bens e instalações. Para máquinas e equipamentos, a taxa de depreciação linear anual é de 10%, com vida útil de 10 anos (RECEITA FEDERAL,

2012). Esses valores serão aplicados neste trabalho com uma depreciação linear para todos os projetos simulados com as ferramentas econômicas.

Para o cálculo do valor residual fixo do bem no presente trabalho, utilizou-se a equação 18.

$$VR_t = V_t - td \quad (18)$$

em que  $VR_t$  representa o valor fixo do bem no ano  $t$ ,  $V_t$  representa o valor inicial do bem,  $t$  é o tempo de vida útil do equipamento e  $d$  representa a depreciação anual do equipamento. Para o cálculo da depreciação do bem, utiliza-se a equação 19:

$$d = \frac{v_i - v_f}{n} \quad (19)$$

em que  $V_i$  representa o valor inicial do equipamento,  $V_f$  representa o valor final do equipamento e  $n$ , seu período de vida útil.

### **1.11.5 Investimento com Recursos Próprios ou Recursos de Terceiros**

Para a implementação dos projetos, os investidores muitas vezes contam com recursos próprios ou com recursos oriundos de organizações privadas ou federais. Em alguns casos, os investidores utilizam recursos de terceiros por falta de recurso próprio; em outros casos, muitos investidores investem a quantia em fontes que proporcionam maior rendimento, ou seja, rendimentos que são maiores que o montante de juros cobrados pelo valor utilizado de terceiro para a aplicação do projeto. Essa prática se justifica quando se busca maior rentabilidade (HJI, 2010).

Atualmente, está disponível para pessoas físicas e jurídicas o programa Agricultura de Baixo Carbono (ABC), que fornece incentivo e recursos para todas as atividades agrícolas e pecuárias para a aquisição de máquinas/equipamentos, bem como para implementações de sistemas com o objetivo de difundir novas técnicas sustentáveis para reduzir a emissão dos gases de efeito estufa. O limite de financiamento alcança R\$ 1.000.000,00 (um milhão de reais) com taxas de juros de 5,0% ao ano e prazo para pagamento de 5 a 15 anos, podendo a organização favorecida financiar com até 6 anos de carência (PLANO AGRÍCOLA E PECUÁRIO 2012/2013, 2012).

A carência é um período no qual o saldo devedor é atualizado. Nesse período não são pagas as prestações referentes ao empréstimo. No entanto, dependendo do financiamento, no período de carência as organizações financeiras adotam apenas a

cobrança dos juros decorrentes do saldo devedor, ou seja, o saldo devedor permanece o mesmo até o término do período de carência (DUTRA; TOLMASQUIM, 2002).

As organizações financeiras que aplicam o programa ABC podem utilizar duas formas para amortizar o saldo devedor: o sistema SAC (Sistema de Amortização Constante) ou o sistema Price (Sistema Francês de Amortização). O sistema SAC é um sistema de amortização utilizado em financiamentos diversos. Nesse sistema, amortiza-se um percentual fixo do saldo devedor após o período de carência do financiamento, de modo que as prestações são decrescentes, já que os juros diminuem a cada prestação, pois o saldo devedor é decrescente. O sistema Price tem como característica apresentar prestações iguais, ou seja, consiste em um plano de amortização de dívidas em prestações periódicas em que o valor de cada prestação é composto de juros e amortização do capital (SANDRINI, 2007).

#### **1.11.6 Taxa Mínima de Atratividade (TMA)**

Ao se realizar um investimento, comparam-se os prováveis rendimentos que serão alcançados pelo ele com os outros investimentos disponíveis no mercado financeiro. O valor mínimo de rentabilidade ou taxa de juros comparativa de um empreendimento é considerada a taxa mínima de atratividade. O empreendimento deve alcançar essa taxa para que o projeto seja viável (KREUZ; SOUZA; CLEMENTE, 2008).

Para definir a TMA, são considerados o custo de oportunidade do capital, a margem de rentabilidade e a correção monetária. O custo de oportunidade está relacionado com a rentabilidade de aplicações como a poupança, enquanto a margem de rentabilidade varia de projeto para projeto e mostra o rendimento sobre o valor empregado. Para Kreuz, Souza e Clemente (2008), a TMA deve ser a melhor taxa, ou seja, uma taxa com baixo grau de risco disponível para o investimento em análise (mercado financeiro/poupança).

#### **1.11.7 Payback**

O Payback (PB) visa à recuperação dos investimentos em um empreendimento dentro do horizonte de planejamento, sendo uma ferramenta que possibilita calcular essa recuperação de investimento. Quanto menor o payback do projeto, menor o risco do investimento, assim como um payback alto revela um risco alto do projeto (SOUZA, CLEMENTE, 2000).



Esse indicador deve ser empregado com cautela para comparar projetos de diferentes ramos de atividade, pois desconsidera todos os eventos posteriores ao período de recuperação de investimento. O PB poderá ser calculado pela equação 20:

$$\sum_{j=1}^N \frac{FC_j}{(1 + TMA)^j} \geq |FC_0| \quad (20)$$

em que N representa o horizonte de planejamento do projeto, FC<sub>0</sub> representa o fluxo de caixa no período zero e FC<sub>j</sub> expressa o fluxo de caixa no período de recuperação dos investimentos no empreendimento (RASOTO et al., 2012).

#### 1.11.8 Valor Presente Líquido (VPL)

É um indicador econômico que analisa as entradas e saídas de recursos para a data de início do projeto. Neste caso, são descontadas todas as receitas e despesas futuras do fluxo de caixa utilizando a taxa mínima de juros, que representa a taxa de atratividade do projeto (TMA). Um investimento é considerado economicamente viável quando os recursos presentes nas entradas forem maiores que os recursos presentes na saída do caixa, ou seja, com VPL positivo, o projeto é viável (SANDRINI, 2007). Também quanto maior o valor positivo do VPL, mais atrativo é considerado o investimento. Calcula-se o VPL segundo a equação 21:

$$VPL = \sum_0^n Fn (1 + i)^{-n} \quad (21)$$

em que VPL representa o Valor Presente Líquido de um fluxo de caixa, n representa o número de períodos em cada elemento de receitas e despesas do fluxo de caixa, Fn representa os valores envolvidos no fluxo de caixa líquido e i representa a taxa mínima de atratividade (TMA).

#### 1.11.9 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR é a taxa de juros que torna nulo o VPL de um investimento e pode ser calculada pelo monitoramento dos fluxos de entrada e saída do caixa. A Taxa Interna de Retorno (TIR) deve ser comparada à taxa mínima de atratividade (TMA) para verificar a rentabilidade do investimento. Para que um investimento seja considerado atrativo por esse método, é preciso que a TIR seja maior que a TMA. A TIR pode ser calculada pela equação 22.

$$\sum_{t=0}^N \frac{Ft}{(1+j)^t} = 0 \quad (22)$$

em que  $j$  é igual a TIR e  $Ft$  representa o retorno líquido em cada ano e  $N$  representa o horizonte de planejamento (SOUZA; CLEMENTE, 2000).

#### 1.11.10 Índice Benefício Custo (IBC)

Para Kreuz, Souza e Clemente (2008), o Índice Benefício Custo (IBC) é um indicador que representa a quantia que se espera ganhar com cada unidade de capital investido. Também se pode definir o IBC como um indicador para corrigir a deficiência do VPL e do VPLA, representando os valores de retorno proporcionado pelo investimento. O IBC pode ser calculado pela equação 23.

$$IBC = \frac{VPFB}{VPFI} \quad (23)$$

em que VPFB representa o valor presente do fluxo de benefícios e VPFI representa o valor presente do fluxo de investimento.

Para interpretar o IBC, basta verificar se o valor obtido é superior ou inferior a 1, pois nos casos em que o IBC for superior a 1, o projeto é viável.

#### 1.11.11 Retorno Adicional sobre o Investimento (ROIA)

Para Rasoto et al. (2012), o ROIA é um indicador que representa a possível rentabilidade anual do projeto. Esse indicador está na mesma unidade de tempo da TMA e deriva da taxa equivalente ao IBC para cada período do projeto.

$$ROIA = \sqrt[N]{IBC - 1} \quad (24)$$

#### 1.11.12 Valor Presente Líquido Anualizado (VPLA)

O VPLA é um indicador econômico que expressa o indicador VPL ajustado em um horizonte de tempo mensal ou anual. Esse ajuste se faz necessário para expressar os benefícios gerados pelo projeto. O VPLA é indicado para comparar projetos com horizontes de planejamento longo ou diferente, possibilitando que os gestores avaliem melhor a magnitude do ganho econômico do investimento (RASOTO et al., 2012). O VPLA é obtido pela equação 25.

$$VPLA = \frac{VPL \times [TMA \times (1 + TMA)^N]}{[(1 + TMA)^N - 1]} \quad (25)$$

Neste capítulo foram abordadas algumas definições de geração distribuída e várias oportunidades para sua implantação na zona rural de Rio Verde. Também foram apresentadas, a partir da disponibilidade de recursos renováveis no país, algumas tecnologias de energias renováveis como solar FV, geradores a biogás e biodigestores para geração de energia elétrica e seu panorama no Brasil.

### 1.12 Referências Bibliográficas

AGCERT. **Projeto de Mitigação GHG AWMS BR05-B-03, Brasil. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo UNFCCC**. Documento de Design do Projeto. 2005.

Agência Nacional De Energia Elétrica (ANEEL), **Banco de Informações de Geração: BIG**, 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso em: 24.08.2019.

ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica. 2015. Resolução Normativa, No 687, 24 de Novembro de 2015**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 24.11.2018.

ANEEL. **Geração Distribuída. 2015. Micro e Minigeração Distribuídas**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset\\_publisher/CegkWaVJWF5E/content/geracao-distribuida-introduc-1/656827?inheritRedirect=false](http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/geracao-distribuida-introduc-1/656827?inheritRedirect=false)>. Acesso em: 24.11.2018.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CRIADORES DE SUÍNOS (ABCS)**. Produção de suínos: teoria e prática. Brasília, DF, 2014. 908 p.

Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Infográfico ABSOLAR**. Disponível em: <<http://absolar.org.br/infografico-absolar-.html>>. Acesso em: 16 ago. 2019.

**Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA)**, 2018. Disponível em: <http://abpa-br.com.br/storage/files/relatorio-anual-2018.pdf>. Acesso em: 15.07.2019.

ATOMRA. **Cálculo do dimensionamento projeto solar fotovoltaico**. AtomRA Energia Renovável, São Paulo, 2014.

AZEVEDO, R. M., **Impactos Operacionais da Complementariedade de Fontes de Geração Solar Fotovoltaica e a Biogás em Sistemas de Distribuição**, Dissertação (Mestrado) - Univesidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2017.

**Balanco Energético Nacional (BEN)**, 2019. Disponível em:

<<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>. Acesso em: 30.09.2019.

BEDIN, J., **Avaliação do consumo energético em aviários dark house, com e sem isolamento térmico: um estudo de caso na região de Palotina**. 66p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2015.

BOLSA DE MERCADORIAS & FUTUROS E BOVESPA – BM&FBOVESPA. **Mecanismo de desenvolvimento limpo**. Disponível em: <<http://www.bmfbovespa.com.br/>>. Acesso em: 07 jul. 2019.

BRASIL. **Decreto no 5.163 de 2004**. Julho 30. 2004.

Breyer, C., Koskinen, O., & Blechinger, P. (2015). **Profitable climate change mitigation: The case of greenhouse gas emission reduction benefits enabled by solar photovoltaic systems**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 610–628. doi:10.1016/j.rser.2015.04.061

BRONZATTI, F. L., et. al.. **Matrizes Energéticas no Brasil: Cenário 2010-2030**. In: XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção: A integração de cadeia produtivas com a abordagem da manufatura sustentável. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2008.

CAMARGO, I.M.T. **Noções básicas de engenharia econômica: aplicações ao setor elétrico**. Brasília, FINATEC, 1998.

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

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada, **PIB do Agronegócio Brasileiro**, 2018. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>>. Acesso em: 04 dez. de 2018.

CGEE. **Química verde no Brasil: 2010-2030**- Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010.

COELHO, Suani Teixeira, et. al.. **Atlas de Bioenergia do Brasil – São Paulo. Projeto Fortalecimento Institucional do CENBIO**. Convênio 721606/2009 – MME 2012.

CRESESB, **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**, CEPREL - CRESESB, edição revisada e atualizada, Rio de Janeiro-RJ, março, 2014.

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

DIERAUF, T. et al. **Weather-corrected performance ratio**. [S.l.], 2013.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. Madison: John Wiley & Sons, Inc., 2013.

DUTRA, R. M.; TOLMASQUIM, M. T. **Estudo de viabilidade econômica para projetos eólicos com base no novo contexto do setor elétrico**. Revista Brasileira de Energia. Vol. 9, nº1, 2002.

Empresa de pesquisa energética (EPE), 2015. **Nota Técnica DEA XX/15 Cenário Econômico 2050**, Rio de Janeiro.

**Empresa de Pesquisa Energética (EPE)**. Balanço Energético Nacional 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>. Acesso em: 07 jun. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira**. Nota técnica. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, 2012.

**Especificação Técnica nº 122. Conexão de Micro e Minigeração Distribuída ao Sistema Elétrico da Enel Distribuição Goiás**. Disponível em: <<https://www.eneldistribuicao.com.br/rj/documentos/CNC-OMBR-MAT-18-0122-EDBR.pdf>>. Acesso em: 17.08.2019.

HJI, M.; **Administração Financeira e Orçamentária. (Matemática Financeira, Estratégias Financeiras, Orçamentos Empresarial)**. 8. Ed. São Paulo: Atlas, 2010.

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

IEC, I. E. C. **Photovoltaic system performance monitoring-guidelines for measurement, data exchange and analysis**. International Standard IEC, v. 61724, p. 1998–11, 2013.

INMET – **Instituto Nacional de Meteorologia Brasileiro**, Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 20 jan. de 2019.

**INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE)**. Divisão político-administrativa. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <<http://www.ngb.ibge.gov.br/Default.aspx?pagina=micro>>. Acesso em: 21 jun. 2019.

**INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA)**. CO<sub>2</sub> EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION Highlights (2017 edition), 2017.

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

KHALID, A. M. et al. **Performance ratio—crucial parameter for grid connected pv plants**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, v. 65, p. 1139–1158, 2016.

KREUZ, C. L.; SOUZA, A.; CLEMENTE, A. **Custos de Produção, Expectativas de Retorno e de Riscos do Agronegócio Mel no Planalto Norte de Santa Catarina**. 2008, revista Custo e Agronegócio on line – v.4, n.1 – janeiro/abril – 2008.

**Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995 - Planalto.** Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19074cons.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19074cons.htm)>. Acesso em: 24.07.2019.

LEMOS, B. P.; CATAPAN, D. C.; CATAPAN, E. A.; CASTRO, N. J. **Geração de energia elétrica a partir de dejetos suínos: um enfoque sobre os aspectos técnicos e econômicos.** III Seminário Internacional do Setor de Energia Elétrica - SISEE, Universidade Federal do Rio de Janeiro: UFRJ, Rio de Janeiro/RJ - Brasil, 2008.

LILIENTHAL, P.; LAMBERT, T.; GILMAN, P. **Homer Energy.** Disponível em: <[http://www.homerenergy.com/HOMER\\_pro.html](http://www.homerenergy.com/HOMER_pro.html)>. Acesso em 10 mai. 2017.

MACHADO, R. C. P., **Ferramenta Computacional Para Geração Distribuída a Partir de Sistemas Híbridos Renováveis,** Dissertação (Mestrado) - Univesidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2013.

MIRANDA, M. M. (2012). **Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida.** 162 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

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

NISHIMURA, R. **Análise de balanço energético de sistema de produção de biogás em granja de suínos: implementação de aplicativo computacional.** , 2009. Campo Grande: Universidade Federal do Mato grosso do Sul.

NOGUEIRA, C.E.C. **Dimensionamento de Sistemas Integrados de Energia em Ambientes Rurais,** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Florianópolis, SC, Universidade Federal de Santa Catarina UFSC, 2004.

OLIVER, A. P. M.,; **Manual de Treinamento em Biodigestão,** Fevereiro de 2008, Consultado Em 01 De Agosto De 2019.

Oliveira, Paulo Armando Victória de., **Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos.** / Paulo Armando Victória de Oliveira, Martha Mayumi Higarashi. – Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2006.

OLIVEIRA, S. V. W. B.; LEONETI, A. B.; CALDO, G. M. M.; OLIVEIRA, M. M. B. **Generation of bioenergy and biofertilizer on a sustainable rural property.** *Biomass & Bioenergy*, v. 35, p. 2608-2618, 2011.

PARKIN, G. AND OWEN, W.F. (1986) **Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges.** *Journal of Environmental Engineering* 112(5), 867-920.

PECORA, V. **Implantação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento do Esgoto Residencial da USP – Estudo de Caso.** 2006. 152 p. Dissertação de Mestrado – PIPGE. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. INPE, São José dos Campos, SP, BRA, 2006. v. 1. ISBN 85-17-00030-7. Disponível em: <[http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil\\_solar\\_atlas\\_R1.pdf](http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf)>.

Pereira, Gilberto. **Viabilidade econômica da instalação de um biodigestor em propriedades rurais**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – Unijuí, 2009.

PINHO, João Tavares, et. al.. **Sistemas Híbridos**. / Brasília : Ministério e Minas e Energia, 2008. 396p. : il. 21 × 30cm. (Soluções energéticas para a Amazônia).

**PLANO AGRÍCOLA E PECUÁRIO 2012/2013**, Ministério da agricultura, Pecuária e Abastecimento Secretaria de Política agrícola, Brasília - DF, 2012.

Projeções do Agronegócio: Brasil 2017/18 a 2027/28 projeções de longo prazo / **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Secretaria de Política Agrícola. – Brasília : MAPA/ACE, 2018. 112 p. ISBN 978-85-7991-116-3

RASOTO, A.; GNOATTO, A. A.; OLIVEIRA, A. G.; ROSA, C. F.; ISHKAWA, G.; CARVALHO, H. A.; LIMA, I. A.; LIMA, J. D.; TRENTIN, M. G.; RASOTO, V. I. **Gestão Financeira: enfoque em Inovação**. Curitiba- PR, Série UTFInova, 2012.

RECEITA FEDERAL - **Instrução Normativa SRF nº162, de 31 de dezembro de 1998**. Tabela de depreciação de Bens e Instalações, disponível em: <http://www.receita.fazenda.gov.br/legislacao/ins/ant2001/1998/in16298.htm>, acesso em 15/09/2019.

REICH, N. H. et al. **Performance ratio revisited: is pr > 90% realistic? Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, Wiley Online Library, v. 20, n. 6, p. 717–726, 2012.

REZENDE, S. P., **Avaliação do Potencial de Expansão da Bioeletricidade na Microrregião Sudoeste do Estado de Goiás**, Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira-SP, 2017.

SANDRINI, J. C. **Sistema de amortização de Empréstimos e a Capitalização de Juros: Análise dos Impactos Financeiros e Patrimoniais**. 2007, Dissertação (Mestrado em Contabilidade) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SILVA, S. B. (2010). **Dimensionamento Ótimo de Sistemas Híbridos, com Geração Fotovoltaica e Célula a Combustível, para Atendimento a Comunidades Isoladas na Amazônia**. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 132p.

**SISTEMA ESTADUAL DE GEOINFORMAÇÃO (SIEG)**. Georreferenciamento. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: <<http://www.sieg.go.gov.br/rgg/apps/bde/map.html>>. Acesso em: 31 jan. 2019.

SOLOMON, E. E. (2009). **Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil**. Biomass and Bioenergy.

SOUSA, S. DE. **Simulink model of biomass.** , 2012. India: Goa University.

SOUZA, A.; CLEMENTE, A. **Matemática Financeira: Fundamentos, Conceitos e Aplicações.** São Paulo: Atlas, 2000.

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

VIANA, Susana F. A. **Castro. Modelação de micro-sistemas híbridos fotovoltaicos/eólicos para produção descentralizada.** Dissertação de Doutoramento em Ciências da Engenharia - Universidade Técnica de Lisboa - Junho de 2009.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações.** São Paulo: Érica, 2012.

WOTTRICH, B., **Modelo para a análise econômica e financeira em projetos para geração distribuída de energia com fontes alternativas.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.



## **2. OBJETIVOS**

### ***2.1 Geral***

O objetivo deste estudo é avaliar a viabilidade técnico-econômica de suprimento de energia elétrica para unidades consumidoras rurais por meio de um sistema híbrido com geradores a Biogás e Solar Fotovoltaico conectados à rede elétrica. Será utilizado o sistema de compensação na geração de energia elétrica para diminuir custos fixos e propor melhorias nos projetos para aumento da eficiência energética dos sistemas de geração.

### ***2.2 Específicos***

- Propor um modelo computacional através do HOMER do Sistema Híbrido;
- Estimar uma métrica de geração de biogás para a região de Rio Verde - GO;
- Fornecer informações técnico-econômicas do desempenho das tecnologias;
- Responder se há viabilidade de utilização de um sistema híbrido;
- Analisar os índices de emissões/poluentes do sistema híbrido; e
- Criar um informativo técnico para produtores rurais e profissionais da área, esclarecendo os principais aspectos das tecnologias apresentadas na região.

### 3. CAPÍTULO I

(Normas de acordo com a Journal Elsevier Energy)

#### **ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO SISTEMA HÍBRIDO BIOGÁS-SOLAR EM GRANJAS DE AVES E SUÍNOS**

#### **FEASIBILITY STUDY OF THE HYBRID BIOGAS-PHOTOVOLTAIC ENERGY SYSTEM IN POULTRY AND SWINE FARMS**

##### ***Resumo***

Este trabalho tem como objetivo avaliar o uso de um sistema híbrido de rede fotovoltaico-biogás conectado à rede elétrica em uma propriedade rural na região de Rio Verde. O estudo teve como foco questões técnicas e de custo de uma propriedade rural com produção de suínos e aves, localizada no estado de Goiás, Brasil. Uma análise comparativa dos custos do sistema híbrido após a otimização foi feita usando o software HOMER © (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*). A análise mostra que o custo inicial do sistema ótimo, o custo atual líquido e o custo de eletricidade com o sistema biogás-fotovoltaico na rede são da ordem de US\$ 257,989, US\$ 624,064 e de 0.077 US\$.kWh<sup>-1</sup>, respectivamente. O principal custo do sistema híbrido de energia fotovoltaico-biogás consiste no gerador de biogás, biodigestores, inversores com os módulos fotovoltaicos. No curto prazo, a implementação do sistema híbrido de biogás-fotovoltaico na região é uma alternativa interessante para os agricultores, considerando a sustentabilidade do agronegócio.

***Palavras-chave:*** Energia solar; Biogás; Digestão anaeróbica; Análise sensitiva; HOMER.

### ***Abstract***

This study aims to evaluate the use of a hybrid photovoltaic-biogas grid system connected to the grid in a rural property in the Rio Verde region. The study focused on technical and cost issues of a swine and poultry farm located in the state of Goiás, Brazil. A comparative analysis of hybrid system costs after optimization was done using the Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER) software. The analysis shows that the initial cost of the optimal system, the net current cost and the electricity cost of the biogas-photovoltaic system in the grid are around US\$ 257,989, US\$ 624,064 and 0.077 US\$.kWh<sup>-1</sup>, respectively. The main cost of the biogas-photovoltaic hybrid power system consists of the biogas generator, biodigesters, inverters with the photovoltaic modules. In the short term, the implementation of the hybrid biogas-photovoltaic system in the region is an interesting alternative for farmers, considering the sustainability of agribusiness.

***Key words:*** *Solar Energy; Biogas; Anaerobic Digestion; Sensitivity Analysis; HOMER.*

### **3.1 Introdução**

O agronegócio se expandiu rapidamente no Brasil, correspondendo, atualmente, a cerca de 23% do Produto Interno Bruto do país (CEPEA, 2018). Neste setor, a suinocultura vem se especializando e obtendo grande destaque no mercado nacional e internacional.

Uma grande influência para esses ótimos resultados está associada ao município de Rio Verde e cidades vizinhas, situadas na região Sudoeste do estado de Goiás, a qual concentra uma das maiores produções de suínos do país, sendo que Rio Verde conta com, aproximadamente, 770 mil cabeças, Jataí conta com 613 mil cabeças e Montividiu conta com 700 mil cabeças (Figura 1a). A criação de aves também apresenta destaque nos municípios de Rio Verde e região, com 1,4 milhões de cabeças, Jataí com 259 mil cabeças e Mineiros com 209 mil cabeças (Figura 1b). No cenário nacional, a cidade de Rio Verde tem grande importância na produção de carne suína em sistema de confinamento (IBGE, 2016; ABCS, 2014; REZENDE, 2017), apresentando um modelo de produção integrada, com o objetivo de atender a demanda de uma grande agroindústria instalada na região.

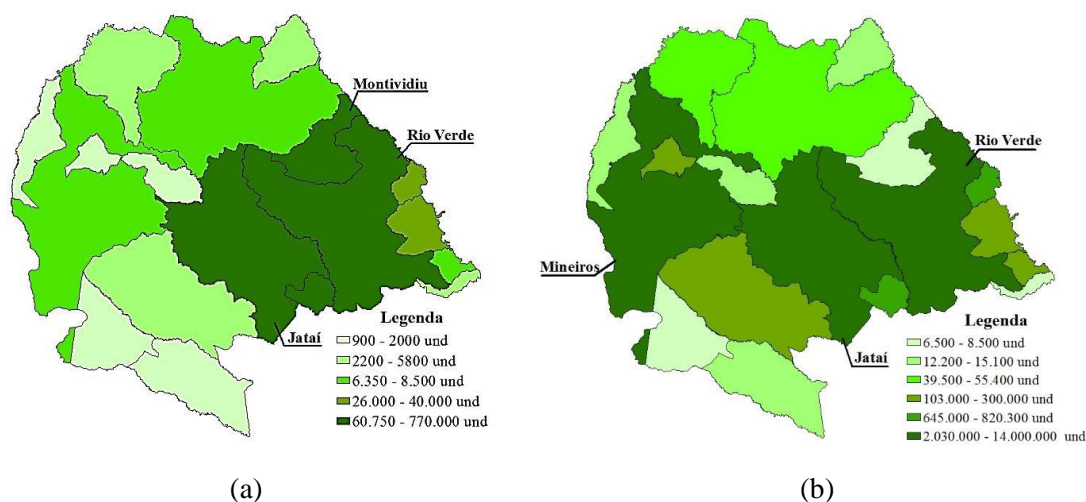


Figura 1. Produção de animais em 2015 na microrregião sudoeste de Goiás - (a) Suínos; (b) Aves (Rezende, 2017)

Uma preocupação relacionada ao crescimento e expansão do setor de suínos está associada ao tratamento e à destinação adequada dos dejetos, em razão do seu alto potencial de poluição, se descartado in natura no meio ambiente. A falta de tratamento adequado e a destinação incorreta podem ocasionar contaminações no solo, lençóis freáticos, rios e ar, além dos riscos de doenças para a população.

Assim, o uso de biodigestores para tratamento destes dejetos, em alternativa a processos convencionais de lagoas ou tanques de estabilização, agrega benefícios ao meio ambiente, além de trazer uma renda extra ao produtor, podendo ele gerar energia a partir do biogás produzido na digestão anaeróbia dos dejetos. Além disso, o resíduo formado ao fim do processo de digestão pode ser aplicado como fertilizante (OLIVEIRA et al., 2011).

Para que a implantação de um sistema de geração de energia a biogás seja eficiente, deve ser feito um estudo de viabilidade para determinar o tempo de retorno do investimento. Neste estudo, diversos parâmetros técnicos e econômicos, como eficiência dos grupos geradores, porcentagem de metano no biogás, qualidade do efluente gerado, custo para produção de energia, entre outros, devem ser constantemente monitorados de forma a garantir a eficiência do processo e o retorno esperado pelo produtor.

De acordo com Souza (2013), a conversão do biogás em energia elétrica pode ser feita de diversas formas, podendo-se destacar as microturbinas a gás e os motores de combustão interna de ciclo Otto. Segundo o autor, a utilização de microturbinas ainda apresenta custos elevados e a vida útil da turbina operando com biogás se torna menor. Já os motores de combustão interna necessitam de pequenas modificações para utilizar o

biogás como combustível. Nishimura et al. (2010) se contrapõem, afirmando que o motor mais apropriado para conversão do biogás em energia elétrica é o motor de ciclo diesel, pela sua maior robustez e menor custo para uma mesma potência, quando comparado ao de ciclo Otto. A conversão de biogás em eletricidade utilizando grupos geradores (motor de combustão interna) tem rendimento médio de 25%. Ainda segundo Souza (2013), dependendo da concentração de metano no biogás, o poder energético pode variar entre 4,95 e 7,92 kWh.m<sup>-3</sup>.

O uso desses motores na utilização de biogás é objeto de vários estudos que avaliam o desempenho do conjunto sob diferentes condições operativas: utilizando misturas de combustíveis, mudança nas taxas de compressão e no ciclo de operação (Diesel para Otto) (BORA, 2011; RAKOPOULOUS, 2009; PORPATHAM, 2012). Ressalta-se que a composição do biogás varia com as mudanças no material de origem. Essas modificações nos principais componentes do biogás implicam alteração nas características de combustão e, portanto, mudanças na eficiência (QIAN, 2017). Embora os motores possam trabalhar com diferentes concentrações de metano, para garantir uma operação adequada a concentração de metano deve ser de pelo menos 45% (DEUBLEIN, 2008).

Em se tratando da avicultura de corte, um dos maiores custos associados à atividade está relacionado ao consumo de energia elétrica, pois sua utilização em larga escala e os constantes reajustes tarifários da energia influenciam significativamente nas despesas do avicultor. Neste contexto, sistemas fotovoltaicos são alternativas interessantes para aproveitamento da vasta área útil disponível e da radiação solar (NASCIMENTO, 2011). Em razão da variação de temperatura no decorrer do ano, além das elevadas temperaturas da região, os aviários são equipados com sistema de climatização que garantem, internamente, a temperatura adequada no espaço para o alojamento das aves, mesmo que ocorram, no ambiente externo, grandes variações ao longo do ano (BALDIN, 2013). Deve-se ressaltar que, no verão, o sistema de ventilação de um aviário poderá funcionar 100% do tempo no período diurno e durante boa parte da noite (ABREU et al., 2000).

O aproveitamento da energia solar para produção de energia elétrica é uma das alternativas promissoras para os próximos anos, pois é considerada uma energia renovável, sustentável e inesgotável. De acordo com dados da ANEEL (2019), a matriz energética brasileira conta atualmente com produção de energia solar de cerca de 2,2 GW potência instalada, o que representa aproximadamente 1,2% de toda a matriz. Comparado

ao restante do mundo, esta tecnologia ainda tem muito espaço para crescimento no Brasil, uma vez que o clima tropical e a incidência de radiação são favoráveis.

No que se refere à forma de operação, de acordo com Silva (2017), os sistemas fotovoltaicos são classificados como sistemas isolados da rede elétrica (off-grid) e sistemas conectados à rede (on-grid ou grid-tie). Os primeiros são utilizados em áreas mais remotas ou em locais onde o custo de conexão à rede elétrica é elevado, enquanto o segundo pode ser utilizado para substituir ou complementar a energia da rede elétrica.

Considerando as vantagens apresentadas por ambos os sistemas de energias renováveis citados (biogás e fotovoltaico), aliadas a outras características como a área útil disponível nas propriedades rurais, acredita-se que a combinação de um sistema fotovoltaico, para atender os aviários que detêm a maior concentração de carga, com a produção de energia elétrica a partir do biogás produzido pelos biodigestores alimentados com dejetos suínos pode ser uma alternativa interessante para o produtor rural reduzir seus custos.

Neste contexto, o artigo considera a possibilidade de utilização híbrida das duas tecnologias de conversão de energia: sistema de biodigestores com grupo gerador a biogás e sistema fotovoltaico solar. Para tanto, faz-se necessário proceder ao dimensionamento adequado dessas tecnologias, a fim de viabilizar a avaliação técnico-econômica do sistema. Neste sentido, o uso de técnicas de otimização pode auxiliar no dimensionamento apropriado dessas tecnologias, bem como outros componentes auxiliares que equilibram as demandas locais, além de atender as restrições físicas. A otimização baseada em simulação é uma abordagem amplamente utilizada para projetar sistemas de energia de pequena escala e fazer avaliações econômicas sobre eles (SHUBES, 2012; RAHMAN, 2014).

Além disso, ferramentas de suporte à decisão, como o Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER), RETScreen, HYBRID2 e HOGA, podem ser usados em aplicações de sistemas de energia renovável de fonte única ou híbridos e suas tecnologias. Estas ferramentas são comumente utilizadas por serem livres, além de enfatizarem os aspectos econômicos e técnicos da engenharia de sistemas de energia. Em uma revisão recente dos pontos fortes e desvantagens das quatro ferramentas de apoio à decisão, Machado (2013) relatou que o HOMER tem potencial para várias aplicações econômicas importantes. Aplicações recentes do HOMER para otimização de sistemas híbridos e análises de viabilidade incluem estudos para diversas regiões desenvolvidos

por Shiroudi (2012), Silva (2013), Castellanos (2015), Sarker (2016), Singh (2016), Shahzad (2017), Rajbongshi (2017).

Assim, os estudos computacionais foram conduzidos através do programa *Hybrid Optimization Model for Electric Renewables* (HOMER), software de otimização de sistemas híbridos de geração de energia desenvolvido nos Estados Unidos pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL).

A utilização de sistemas híbridos para produção de energia elétrica, a partir de diferentes fontes de energias renováveis (solar, eólica e biomassa), tem ganhado cada vez mais destaque em razão da maior confiabilidade conferida pela utilização de mais de uma matriz energética, embora os custos iniciais de investimentos sejam maiores em alguns casos. Assim, estudos a respeito de fontes renováveis utilizando o HOMER ou outros programas vêm sendo conduzidos nos últimos anos, sobretudo após o destaque que as energias renováveis têm ganhado no mundo.

Apesar das vantagens apresentadas quanto à utilização de sistemas híbridos para produção de energia elétrica, tecnologias com esta característica apresentam um alto grau de complexidade na fase de dimensionamento e de análise financeira, pois a quantidade de parâmetros a serem avaliados torna o processo de planejamento energético consideravelmente mais trabalhoso. Por esta razão, o uso de ferramentas computacionais é de grande importância na construção e na avaliação do desempenho de sistemas de geração de energia elétrica para encontrar a configuração ótima para o projeto (SILVA, 2013).

Souza et al. (2013) apresentam um estudo sobre a microgeração de energia elétrica em uma propriedade rural, usando o biogás como fonte primária, a partir de resíduos de suinocultura, na região de São Miguel do Iguazu - Paraná, Brasil. Nesta propriedade, são utilizados dois biodigestores para a produção de biogás, cuja conversão elétrica é feita em um grupo motor-gerador de 100 kVA. Com uma média de 4.672 animais alojados, cerca de  $554 \text{ Nm}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$  de biogás foram usados na geração de  $847 \text{ kWh} \cdot \text{dia}^{-1}$  de eletricidade, sendo o excedente incinerado. O consumo específico médio de biogás no grupo motor-gerador foi de  $0,68 \text{ m}^3 \cdot \text{kWh}^{-1}$  e sua eficiência, de 22,21%. O custo da produção de energia elétrica utilizando o biogás foi de  $0,053 \text{ US\$} \cdot \text{kWh}^{-1}$  e o custo da eletricidade do fornecedor, de  $0,062 \text{ US\$} \cdot \text{kWh}^{-1}$ .

Portugal-Pereira et al. (2015) apresentam um estudo que quantifica os potenciais ambientalmente sustentáveis economicamente de resíduos agrícolas e agroindustriais para geração de energia elétrica via combustão direta em usinas de energia no Brasil. Os

resultados revelam que o potencial de geração sustentável é de quase 141 TWh.ano<sup>-1</sup>, concentrado principalmente no Sul, Sudeste e Centro-Oeste do país. Por outro lado, o potencial econômico é muito menor, contabilizando para 39 TWh.ano<sup>-1</sup>. A mitigação total de GEE é de quase 18 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> e pode chegar a 64 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> por ano se considerado o potencial técnico. A diferença entre potencial técnico e econômico implica que as restrições à bioenergia não estão relacionadas à falta de recursos, mas associados a barreiras econômicas, logísticas, regulatórias e políticas.

Já Garrido et al. (2016) apresentam um estudo sobre a utilização de resíduos agrícolas e da indústria alimentar como uma importante fonte de biomassa para produção de eletricidade em zonas rurais e remotas. Neste estudo, foi avaliada a viabilidade de um sistema híbrido solar fotovoltaico-gaseificação de biomassa para um estudo de caso em Nampula, Moçambique. Os resultados do modelo e a análise de sensibilidade mostraram que o sistema é capaz de atingir um custo competitivo de geração de energia, quando comparado com geradores a gás-óleo, sendo demonstrado também que o excedente de energia foi maior do que para uma solução ideal de FV-Diesel. No entanto, o sistema FV-Biomassa é mais competitivo, com um custo de energia em 0,33 US\$.kWh<sup>-1</sup>, considerando banco de baterias de maior duração em oposição a 0,42 US\$.kWh<sup>-1</sup> para o sistema FV-Diesel, com custo presente líquido 30% maior ao longo de 25 anos.

Shahzad et al. (2017) apresentam um estudo sobre a viabilidade técnico-econômica de um sistema híbrido FV-Biomassa para a eletrificação de áreas rurais isoladas no Paquistão usando o software HOMER. Os dados de carga elétrica foram coletados para suprir as necessidades de irrigação e residenciais. Parâmetros de sensibilidade, como potencial de biomassa, preço da biomassa, irradiância solar e variações de cargas, foram utilizados na análise de sensibilidade. O sistema otimizado foi considerado economicamente favorável para pequenas comunidades com o menor custo unitário de 0,045 US\$.kWh<sup>-1</sup>, com período de amortização de 9,5 anos.

Rajbongshi et al. (2017) desenvolveram um estudo sobre otimização de sistemas de energia híbrida à base de FV-Biomassa-Diesel para eletrificação rural, usando o software HOMER. O custo da energia, no caso do sistema híbrido off-grid, para carga de pico de 19 kW e demanda de energia de 178 kWh.dia<sup>-1</sup>, é de 0,145 US\$.kWh<sup>-1</sup>. No entanto, no caso de um sistema híbrido conectado à rede, ele é reduzido para 0,91 US\$.kWh<sup>-1</sup> para o mesmo cenário. Verificou-se que houve utilização de 9% da rede elétrica e compensação de 23% da demanda total de energia ou geração para o perfil de carga acima. O estudo concluiu que o custo de energia para um sistema híbrido conectado



à rede é menor quando comparado a um sistema híbrido fora da rede para perfis de carga semelhantes.

Silva et al. (2018) apresentam um estudo de avaliação dos parâmetros de produção de biogás, geração, desempenho do grupo gerador na conversão de biogás em energia elétrica e no custo da energia elétrica de uma propriedade de suinocultura. Os resultados indicaram uma produção média diária de 443 m<sup>3</sup>, com uma média de 0,10 m<sup>3</sup> de biogás/suíno, e uma concentração média de 68% de metano. A média de geração de energia elétrica foi de 324,5 kWh.dia<sup>-1</sup> e a eficiência do gerador, de 17%, com uma potência ativa média de 70 kW e uma operação de 6,5 h. O custo evitado pelo autoconsumo da energia elétrica gerada na propriedade foi de US\$ 3.540,13, tendo havido, durante o período de monitoramento, geração total de energia elétrica de 70,5 MWh, dos quais 26,6 MWh foram exportados para a rede de distribuição.

Apesar dos estudos já realizados, utilizando o HOMER, envolvendo diferentes fontes renováveis e não renováveis de energia, deve-se destacar que ainda não existem estudos correlatos para a região do município de Rio Verde, a qual apresenta grande potencial, tanto para o uso da energia fotovoltaica, quanto do biogás, além da aplicação híbrida de ambos. Diante do exposto, surge o presente artigo, que abordará os aspectos técnico-econômicos relativos à avaliação e otimização de um sistema híbrido conectado à rede, composto por um sistema fotovoltaico, gerador a biogás, para fornecer energia a comunidades rurais em Rio Verde, considerando as análises de sensibilidades e incertezas dos principais parâmetros de desempenho de cada fonte, através HOMER. Além disso, contribuirá com uma nova quantidade média de geração de biogás em suinocultura na região estudada, medições de índices de performance para energia solar e informações técnicas para tomada de decisão dos granjeiros, além de desenvolver futuros projetos de energias renováveis na região.

### **3.2 Materiais e Métodos**

Granjas são locais utilizados para confinamento e crescimento de animais, podendo ser utilizadas para criação de aves ou suínos. A Figura 2 apresenta o complexo agropecuário da propriedade estudada, Fazenda Talhado, situada na latitude sul de 18° 09' 57" e longitude oeste de 51° 05' 07", destinada à criação de suínos localizada na região sudoeste do estado de Goiás, Brasil. Neste caso, as suinoculturas verticais de terminação (SVT) são do tipo piso vazado, com leve declive, facilitando o escoamento dos dejetos até a parte inferior das baias, onde o material armazenado é direcionado por tubulações

aos biodigestores, conforme ilustrado na Figura 3. As granjas suinícolas da região têm capacidade média de alojamento de 12.000 suínos, distribuídos em três núcleos, cujos dejetos são canalizados para o biodigestor, o qual produz o biogás utilizado para geração de energia.



Figura 2. Vista aérea das Suinoculturas (SVT) localizada na zona rural em Rio Verde-GO (Google Earth, 2018)



Figura 3. Granja de Suínos na configuração piso vazado localizada na zona rural em Rio Verde-GO. Fonte: Autor.

A Figura 4 apresenta uma vista aérea dos aviários de frangos (FGO), construídos próximo das suinoculturas, situadas na latitude sul de  $18^{\circ} 14' 29''$  e longitude oeste de  $51^{\circ} 06' 29''$ . Cada aviário tem capacidade para 90.000 frangos, sendo equipados com ventiladores e exaustores para garantir o bem-estar animal, além de sistemas automáticos para fornecimento de água, ração e calor para garantir qualidade e eficiência no crescimento dos animais. O fato de a propriedade destinada aos aviários estar localizada próximo às suinoculturas não compromete as análises, tendo em vista que a atual regulação normativa proposta pela ANEEL permite a compensação de energia elétrica

em propriedades em diferentes localidades no mesmo Estado, desde que as contas de energia estejam registradas no mesmo CPF/CNPJ.



Figura 4. Vista aérea dos Aviários (FGO) localizados na zona rural em Rio Verde-GO (Google Earth, 2018)

### 3.2.1 Descrição dos Sistema de Geração de Energia em Operação

O presente estudo baseou-se nas tecnologias de fontes alternativas utilizadas nas granjas de suínos e aves, considerando uma referência de custo nas simulações e otimizações do HOMER. Neste trabalho, o sistema híbrido FV-Biogás foi simulado para registrar suas características operacionais, além de calcular o custo de energia (COE) e o custo atual líquido (NPC). Os tamanhos dos componentes foram otimizados e feita uma análise técnico-econômica do sistema híbrido. Os sistemas reais de geração de energia Biogás e Solar que serão validados na simulação estão representados pelas Figuras 5 e 6. O sistema de biodigestores e gerador a biogás está situado na suinocultura de terminação citada anteriormente, na zona rural de Rio Verde, cuja operação teve início em fevereiro de 2017. Já o sistema solar fotovoltaico está situado em um aviário tipo *Dark House*, na zona rural de Palmeiras de Goiás na Granja Dona Thereza, localizada nas coordenadas latitude sul de  $16^{\circ} 53' 26.5''$  e longitude oeste de  $49^{\circ} 47' 48''$ , cuja operação foi iniciada em julho de 2017. O aviário do tipo *Dark House* tem controle artificial dos parâmetros térmicos durante o período de produção, permitindo maior adensamento e, conseqüentemente, maior produção por lote.



(a)



(b)

Figura 5. (a) Biodigestores (b) Gerador de Energia a Biogás 330 kVA. Fonte: Autor.



(a)



(b)

Figura 6. (a) Sistema Fotovoltaico de 114 kWp (b) Galpões de Aviários. Fonte: Autor.

### 3.2.2 Perfil de Carga Diário

Para este estudo, o perfil de carga típica do produtor rural é composto por duas residências, três suinoculturas e cinco aviários, sendo que estes últimos concentram seu pico de carga no horário comercial em razão da utilização acentuada de ventilação para atender ao bem-estar animal dos frangos alojados nos núcleos. A Tabela 1 mostra o histórico de consumo de energia mensal com base nas faturas de energias (UCs) com período mais estável de medições, situadas no regime de compensação.

**Tabela 1. Histórico de consumo energético, em kWh, das granjas. Fonte: Autor.**

Granjas Período	FGO 1	FGO 2	FGO 3	FGO 4	FGO 5	SVT 1	SVT 2-3	Casas Período	Casa 1	Casa 2
abr/15	11.552	12.656	8.169	8.252	7.730	3.808	5.992	jan/19	398	590
mai/15	10.176	8.318	11.250	6.377	10.926	1.329	4.288	fev/19	431	719
jun/15	13.837	12.569	10.882	11.705	8.863	3.655	3.851	mar/19	449	697
jul/15	6.958	6.645	6.228	5.268	9.948	3.243	4.493	abr/18	399	680
ago/15	10.363	10.037	8.603	10.177	8.037	1.041	9.321	mai/18	314	703
set/15	6.908	10.525	6.993	8.838	11.069	1.440	7.701	jun/18	281	680
out/15	15.420	14.784	15.744	16.718	13.488	4.270	6.086	jul/18	331	703
nov/15	10.782	8.545	8.737	7.628	10.663	5.460	4.862	ago/18	325	592
dez/15	9.899	9.673	11.134	15.040	8.683	1.368	5.556	set/18	376	726

<b>jan/16</b>	5.117	8.026	9.954	4.299	13.363	1.295	6.456	<b>out/18</b>	362	685
<b>fev/16</b>	8.258	4.751	7.752	15.955	1.845	860	6.431	<b>nov/18</b>	392	704
<b>mar/16</b>	12.958	8.383	6.398	1.150	5.069	684	6.868	<b>dez/18</b>	442	745
<b>Total</b>	122.228	114.912	111.844	111.407	109.684	28.453	71.905	<b>Total</b>	4.500	8230
<b>Média</b>	<b>10.186</b>	<b>9.576</b>	<b>9.320</b>	<b>9.284</b>	<b>9.140</b>	<b>2.371</b>	<b>5.992</b>	<b>Média</b>	<b>375</b>	<b>682</b>

O consumo nas faturas de energia das instalações de cinco granjas de aves, três granjas de suínos, duas residências foi calculado em 56.927 kWh.mês<sup>-1</sup>. Desta maneira, o consumo médio diário encontrado foi de 1.601 kWh.dia<sup>-1</sup> para os aviários e de 296 kWh.dia<sup>-1</sup> nos galpões de criação de suínos, tendo o consumo médio das residências sido distribuído nas granjas, considerando uma variabilidade aleatória diária de 1% e uma carga de pico de 140 kW. As Figura 7 e 8 mostram o perfil de carga diário (média 66,72 kWh.dia<sup>-1</sup>) e sazonal dos aviários, enquanto as Figura 9 e 10 mostram o perfil de carga diário (média 12,35 kWh.dia<sup>-1</sup>) e sazonal das suinoculturas em estudo.

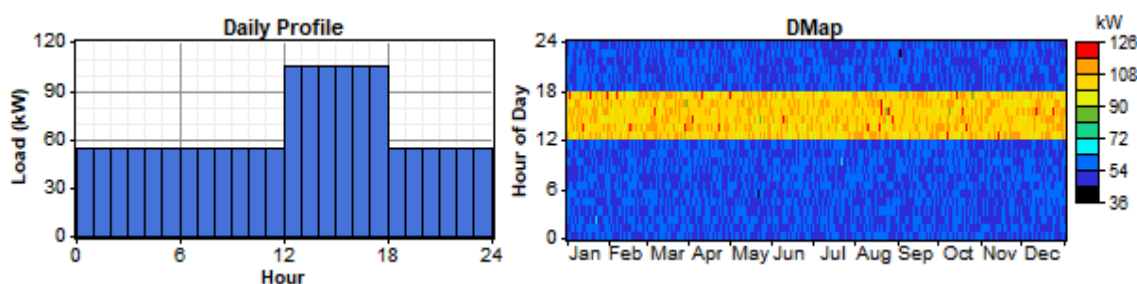


Figura 7. Perfil de carga diário dos aviários em estudo. Fonte: Autor.

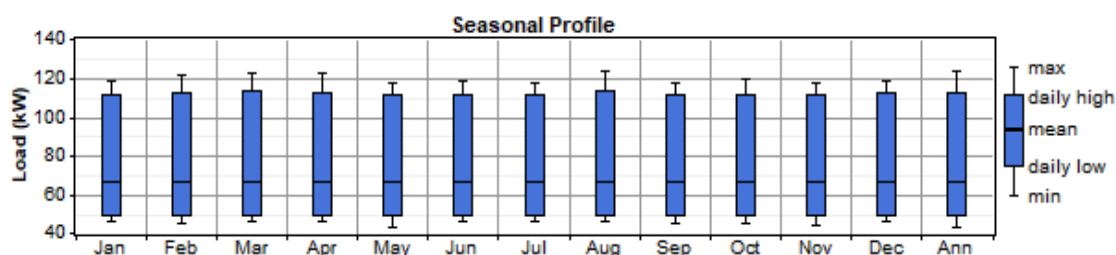


Figura 8. Perfil de carga sazonal para os aviários. Fonte: Autor.

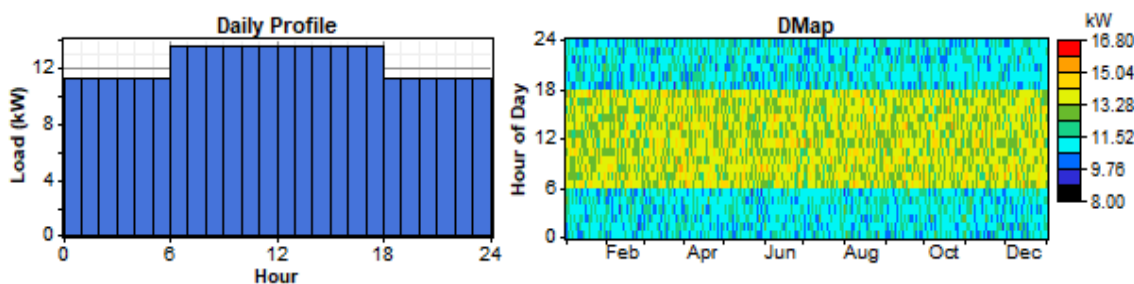


Figura 9. Perfil de carga diário das suinoculturas em estudo. Fonte: Autor.

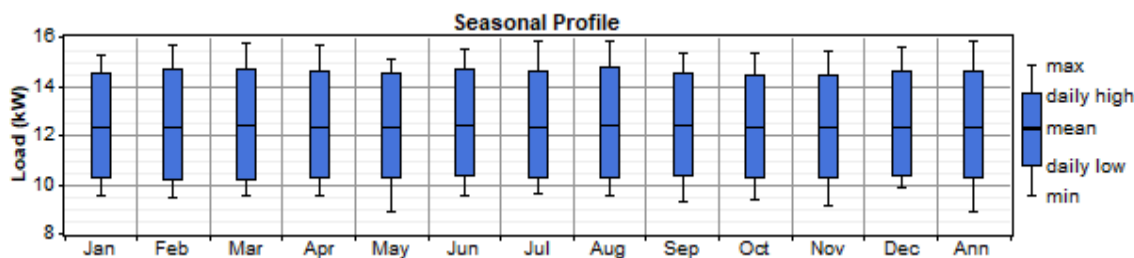


Figura 10. Perfil de carga sazonal para suinocultura. Fonte: Autor.

Embora não exista um controle preciso das demandas, elas podem ser estimadas com segurança, considerando a especificidade de certas cargas presentes no sistema, como bombas, ventiladores e exaustores. Segundo Nascimento e Baldin (2011, 2013), o perfil de carga dos aviários tem concentração no horário entre as 12h e as 18 h (período crítico), com valor aproximadamente 58% superior (105.41 kWh) à média de consumo diária (66,72 kWh). Por outro lado, no período das 18h às 12h do dia seguinte (período normal), este consumo se reduz em 19% (53.82 kWh) em relação à média de consumo diária.

No caso das suinoculturas, o perfil de carga foi estimado considerando uma média diária de consumo de 12.35 kWh. Tendo esta diária como referência, considerou-se uma elevação de carga de 9% (13.5 kWh) no período das 06h às 18h em razão da operação das bombas de água e de ração. No período oposto, foi considerada uma redução de 9% (11.2 kWh) em razão do repouso dos animais no período, segundo relato dos granjeiros. Ambas as variações foram consideradas em relação à média de consumo diária.

Uma importante perspectiva de aplicação do Sistema Híbrido Solar-Biogás é que ele pode ser programado para operar simultaneamente, sendo a energia elétrica produzida tanto pelo sistema fotovoltaico, quanto pelo sistema a biogás. Nesta condição operacional, o excesso de energia elétrica produzida pode ser devolvida à rede elétrica à qual o sistema está interligado, segundo resoluções RN 482 e 687 da ANEEL. Por outro lado, existe uma alternativa para o ciclo operacional do conjunto bastante interessante, uma vez que o sistema fotovoltaico pode ser programado para operar no período diurno, em que a radiação solar é abundante, enquanto o sistema a biogás pode ser programado para produzir energia no período oposto. Naturalmente, tal condição só se mostrará possível e eficiente do ponto de vista técnico se o sistema contar com um dispositivo extra para armazenamento de biogás (pulmão de biogás).

### 3.2.3 Radiação Solar

Os dados mensais de irradiação solar para Rio Verde foram obtidos do Atlas Brasileiro de Energia Solar (CRESESB, 2018). A Figura 11 apresenta o perfil médio mensal de radiação solar ao longo de um ano. Para o caso analisado, a radiação média anual foi de  $5.4 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}$  e um índice médio de clareza de  $0,563$ . Pode-se destacar que a região considerada tem alta radiação solar nos meses de julho e agosto.

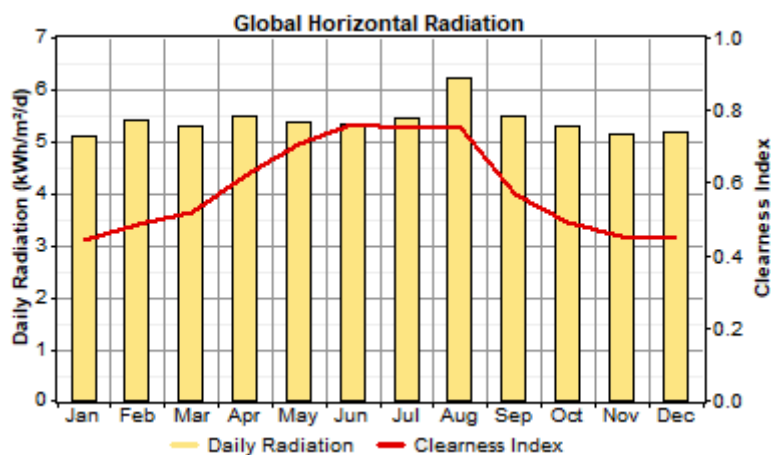


Figura 11. Perfil médio mensal de radiação solar e índice médio de clareza – Zona rural do Município de Rio Verde. Fonte: Autor.

Para este trabalho, foi feito um comparativo mensal de Irradiação global horizontal para Rio Verde, de acordo com as medições obtidas pelo CRESESB e por outras referências. As bases de dados apresentadas são todas médias mensais. Assim, em termos mensais, é possível notar uma pequena variação para as diferentes bases de dados detalhadas a seguir. Entretanto as médias anuais são próximas. Em termos anuais, foram obtidos  $5,40 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}$  pelo Sundata (CRESESB, 2018);  $5,20 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}$  pelo INMET;  $5,13 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}$  pela NASA;  $5,18 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}$  pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al., 2017); e  $5,40 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}$  pelo INPE/SWERA (2018).

### 3.2.4 Geração Solar Fotovoltaica

A taxa de desempenho (TD) é definida pela IEC 61724 (IEC, 2013) como uma grandeza comumente utilizada para medir o desempenho da planta fotovoltaica (FV) solar para testes de aceitação e operação. Assim, o TD indica, efetivamente, a capacidade de o Sistema Fotovoltaico converter a luz solar coletada pelos painéis fotovoltaicos em energia elétrica entregue ao consumidor, em relação aos valores estimados em projeto, com base nos dados da placa de identificação do painel do Sistema Fotovoltaico (DIERAUF et al., 2013). Para validar a TD, foi analisado o ciclo anual de operação do sistema solar

fotovoltaica de 114 kWp instalado num aviário situado em Palmeiras de Goiás, Figura 6, cujas medições de operação estão listadas na Tabela 2. Deve-se ressaltar que os dados de irradiação solar média da região foram retirados do Sundata (CRESESB, 2018). No que se refere aos dados de projeto, foi adotada a inclinação padrão das placas solares em 20°, com base na latitude local (PINHO, 2014), bem como o azimute de 180° para instalação das estruturas no solo.

**Tabela 2. Medições de energia da GD Solar, Taxas de Desempenho e Irradiação Solar Média da região. Fonte: Autor.**

Mês	Irradiância (kWh.m <sup>-2</sup> .dia)	Dia (kWh)	Mês (kWh)	TD (%)
<b>Janeiro</b>	5,13	443,61	15.911,90	87,77
<b>Fevereiro</b>	5,48	473,88	12.736,58	72,81
<b>Março</b>	5,39	466,09	14.020,97	73,61
<b>Abril</b>	5,63	486,85	14.353,40	74,55
<b>Mai</b>	5,61	485,12	14.143,70	71,34
<b>Junho</b>	5,42	468,69	13.768,20	74,28
<b>Julho</b>	5,65	488,58	15.830,90	79,28
<b>Agosto</b>	6,31	545,65	15.525,10	69,62
<b>Setembro</b>	5,64	487,71	15.193,30	78,77
<b>Outubro</b>	5,42	468,69	13.534,80	70,66
<b>Novembro</b>	5,08	439,29	12.320,69	70,92
<b>Dezembro</b>	5,09	440,15	15.586,40	86,65
<b>Média</b>	<b>5,49</b>	<b>474,53</b>	<b>14.410,50</b>	<b>75,85</b>
<b>Total (kWh)</b>			<b>172.926</b>	

O valor percentual da taxa de desempenho varia de acordo com as condições locais de instalação e com a qualidade do sistema fotovoltaico. Diversos autores na literatura retratam estudos e previsões de intervalos do valor de TD. Segundo Decker e Jahn (1997), as taxas de desempenho podem variar de 60% a 79%. Segundo Reich et al. (2012), o valor de TD pode variar entre 70% e 90%. Buscando uma estimativa deste intervalo, o Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos Estados Unidos (NREL) conduziu um levantamento bibliográfico, encontrando um intervalo típico de TD entre 60% e 90% (DIERAUF et al., 2013).

### 3.2.5 Sistema Fotovoltaico (FV)

Os painéis fotovoltaicos utilizados são de silício policristalino, com os seguintes valores máximos de potência, tensão e corrente, respectivamente, de 330 Wp (a 1000 W.m<sup>-2</sup> e 25 °C), 37,8 V e 8,73 A. Os módulos são laminados flexíveis e podem ser colocados em superfícies metálicas, telhados ou solo. O sistema fotovoltaico estará montado aproveitando o terreno plano e poucas interferências próximas na propriedade



rural. Os módulos foram orientados para o norte, com um ângulo de inclinação de 20° e um azimute de 180°, e o albedo local considerado foi de 20% (PINHO, 2014). O custo de operação e de manutenção (O&M) anual foi considerado 1% do investimento inicial (ABINEE, 2012; PINHO, 2014), tendo em vista que o fator de desempenho foi de 75.85% para aproximar os efeitos variáveis de perdas no painel (cabos, sombras e poeira). Considerando o coeficiente de temperatura de  $-0,41 \text{ \%} \cdot \text{°C}^{-1}$ , temperatura nominal de operação em 47 °C e eficiência de 17% em condições STC, conforme especificações do fabricante (GCL, 2018). O custo de capital e reposição estimado foi de 1,14 US\$.Wp<sup>-1</sup>, com base nos valores comerciais WEG, considerando nestes custos placas solares, inversores, cabeamento, estruturas, instalação e expedição, cujos valores e potências estão listados na Tabela 3. O tempo de operação considerado para o presente projeto foi de 25 anos.

**Tabela 3. Levantamento de potências e valores comerciais de Kits Solares para aplicações de médio e grande porte**

Potência (kWp)	Preço (US\$)	Custo (US\$/Wp)	Potência (kWp)	Preço (US\$)	Custo (US\$/Wp)
100,32	114.854,57	1,14	225,72	258.345,61	1,14
112,86	129.870,25	1,15	237,6	271.653,08	1,14
118,8	135.769,62	1,14	250,8	284.813,36	1,14
131,67	150.387,78	1,14	277,2	316.587,92	1,14
150,48	171.800,78	1,14	300,96	341.693,40	1,14
165	188.761,35	1,14	307,56	350.809,71	1,14
168,3	192.536,57	1,14	316,8	360.015,51	1,14
175,56	200.771,98	1,14	330	374.618,35	1,14
188,1	214.727,50	1,14	351,12	400.149,08	1,14
200,64	228.683,03	1,14	401,28	457.027,64	1,14

Fonte: WEG (2018). Lista de Preços Outubro/18 - Energia Solar e Geração Distribuída.

### 3.2.6 Análise de Composição e Qualidade do Biogás

Para quantificar a potencial calorífico do biogás que será queimado no gerador, foi necessário determinar sua composição, além de mensurar sua qualidade, mais especificamente seu percentual de metano. Inicialmente foi utilizado o Kit de Análise de Biogás, produzido pela Alfakit (2017) em parceria com a Embrapa Suínos e Aves, representado pela Figura 12. Foram coletadas amostras durante aproximadamente um ano, desde setembro de 2017 até meados de 2018, com repetições mensais, em uma suinocultura do mesmo porte do estudo de caso, inclusive próxima da granja em questão. Poças et al. (2018) relatam que a média de concentração de CH<sub>4</sub> das análises foi de 68,57 ± 8,73%. A título de comparação e validação, também foi utilizado o parâmetro de

medição na época de instalação pelas equipes do projeto ERBR, Auta Bioenergia e MFC Engenharia, cujas medições foram feitas pelo analisador de gás portátil *GA2000Plus Gas Analyser* (LANDTEC), chegando ao valor médio de 69% de concentração de metano. Por esse motivo, para as análises feitas, adotou-se o valor médio de 68.5% de CH<sub>4</sub> no biogás para efeito de cálculos e para mensurar o poder calorífico inferior (PCI) de queima no gerador a biogás.

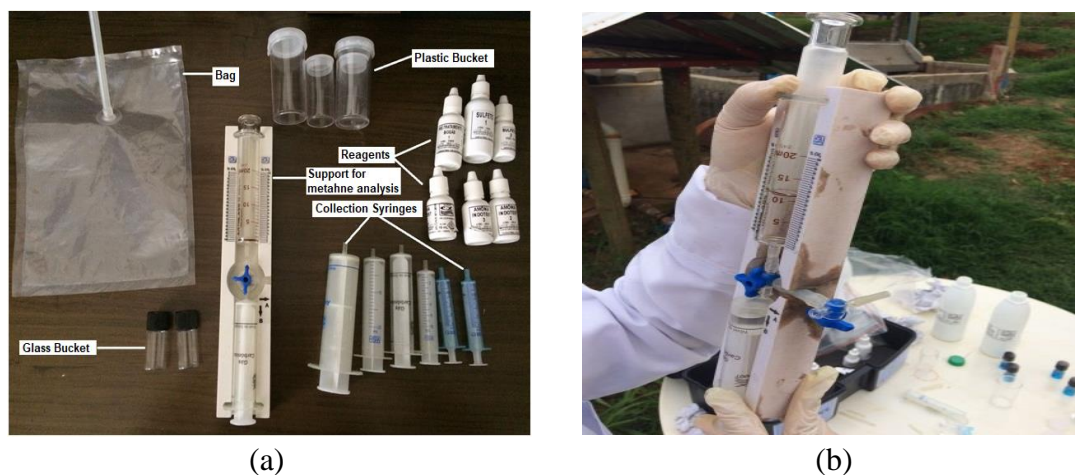


Figura 12. (a) Kit de Análise de Biogás (b) Concentração de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> (Poças et al., 2018)

Com relação ao poder calorífico do biogás, ele pode variar de 5.000 a 7.000 kcal.m<sup>-3</sup> a depender da quantidade percentual de metano presente na sua composição. Este valor médio de metano, de cerca de 68,57%, está próximo ao valor encontrado por Silva et al. (2018), de 68,3%, superior ao valor encontrado por Miranda et al. (2008), que obtiveram concentrações de metano entre 64,5 e 67,3% para suínos em crescimento e terminação. Ressalta-se também a proximidade da concentração de 69%, resultado encontrado por Oliveira e Hiragashi (2006) em dejetos deste mesmo tipo de criação de suínos.

### 3.2.7 Gerador a Biogás

As características nominais de operação de grupos motor-gerador a biogás, para diferentes potências, são mostradas na Tabela 4. Tendo esta tabela como referência, foi adotado o Gerador a Biogás de 330 kVA, configurado para trabalhar no regime de 190 kWh, tendo em vista a granja não ter biogás suficiente para operar em plena carga (24 horas), de forma a consumir menos biogás e, conseqüentemente, aumentar seu regime de trabalho diário. O gerador de 330kVA (211kW) consome, em média, 65% de CH<sub>4</sub>, o

equivalente a  $97 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ . Como o valor medido de metano foi de 68.5%, considerou-se interpolação para chegar neste valor, ou seja, 3.5% representa uma melhora na eficiência, atingindo  $91.4 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ .

Segundo a ER-BR Energias Renováveis, essa redução para 190 kWh, cerca de 10% inferior em relação à sua capacidade nominal, provoca redução no consumo de 5% do volume de biogás em relação ao nominal do motor. Desta forma, o consumo do gerador nessa condição é  $86,83 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , considerando a concentração de  $\text{CH}_4$  em 68.5%. Quanto maior a concentração de metano ( $\text{CH}_4$ ), menor será o consumo de biogás por parte dos grupos geradores. Quanto menor a carga nominal para o grupo gerador, menor será o consumo de biogás. Na geração de energia para atendimento das cargas instaladas, o dimensionamento do grupo gerador deve levar em consideração a potência instalada e o consumo de pico (demanda contratada), mesmo que tais situações ocorram por curtos períodos de operação. Isto se deve ao fato de o grupo gerador ter uma proteção para o alternador, que evita danos em caso de sobrecarga, desligando automaticamente o equipamento para evitar sua queima.

Considerando que o caso analisado se enquadra como geração distribuída, de acordo com as RN 482 e 687 da ANEEL, o mecanismo para contabilização da energia elétrica produzida pelo sistema ocorre por meio da compensação direta de energia, sendo que a energia elétrica excedente gerada em relação ao consumo dos equipamentos elétricos da unidade consumidora fica computada como créditos em kWh em favor do cliente. Esses créditos poderão ser utilizados pela própria unidade em épocas de alto consumo (acima da geração), ou por outras unidades consumidoras organizadas em Consórcios ou Cooperativas, que configurem um “grupo econômico”, desde que consumam energia da mesma concessionária de energia e também estejam localizadas dentro do mesmo estado. Esses créditos devem ser consumidos ou transferidos em no máximo 60 meses da data em que foram gerados.

O custo de capital, reposição e O&M foram considerados para as potências 30kVA, 50kVA, 80kVA, 120kVA, 250kVA, 330kVA e 420kVA, em que as informações técnicas dos geradores e custos foram informados pela ER-BR Energias Renováveis. Neste caso, foi considerado o tempo de vida útil dos geradores a biogás de, aproximadamente, 15 anos. A Tabela 4 apresenta os modelos de geradores a biogás, potências de geração disponíveis, custos de aquisição, custos de operação e manutenção (O&M) e consumos específicos de biogás, correlacionando a concentração de metano com a potência do motor.

A Figura 13 (a) mostra o consumo específico de biogás do grupo gerador conforme diferentes potências, enquanto a Figura 13 (b) ilustra a eficiência do gerador em kWh.m<sup>-3</sup> de biogás, dimensionados pela Tabela 4..

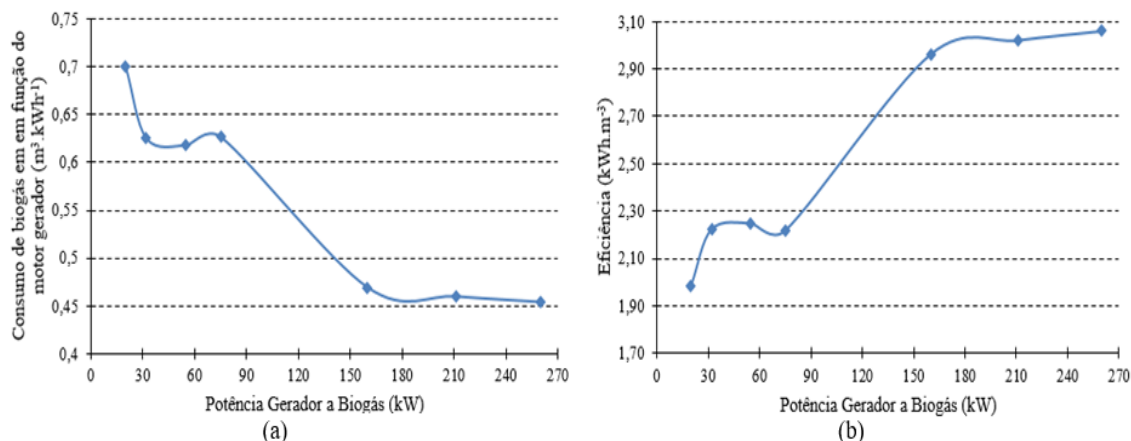


Figura 13. (a) Consumo específico em diferentes cargas (b) Eficiência do Gerador a Biogás (ERBR, 2018)

O consumo específico de biogás foi de 0,70 m<sup>3</sup>.kWh<sup>-1</sup> para a condição de potência mínima avaliada nos estudos (20 kW). A plena carga (260 kW), o consumo foi de 0,45 m<sup>3</sup>.kWh<sup>-1</sup>, um aumento de 56% 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 observado neste estudo, quanto maior a carga, maior a eficiência do motor a combustão.

**Tabela 4. Consumo de biogás e produção diária de energia elétrica em carga**

MOTOR POTÊNCIA (kVA)	Custos Geração Distribuída (US\$)	Custos O&M (US\$.h <sup>-1</sup> )	*Geração em Base Load		Consumo de biogás 65% DE METANO (5.500 kcal.m <sup>-3</sup> )		Consumo de biogás 75% DE METANO (6.500 kcal.m <sup>-3</sup> )	
			Horário (kWh)	Diário (kWh)	Horário (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	Diário (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	Horário (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	Diário (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )
MWM 30	48.419,87	0,45	20	480	14	336	12	288
MWM 50	49.191,48	0,49	32	768	20	480	17	408
MWM 80	59.121,81	0,57	55	1320	34	816	29	696
MWM120	65.452,13	0,86	75	1800	47	1128	40	960
SCANIA 250	123.676,13	2,40	160	3840	75	1800	63	1512
SCANIA 330	143.188,90	2,40	211	5064	97	2328	82	1968
SCANIA 420	172.077,42	2,40	260	6240	118	2832	100	2400

Fonte: ER-BR (2018). Base Load = Geração contínua (24 h) com potência total do grupo gerador.

### 3.2.8 Biomassa

O cálculo do índice de produção de gás por animal ( $\text{m}^3/\text{dia}/\text{suíno}$ ) foi feito conforme a Equação 1. Para o cálculo da Biomassa, foram adotados o conteúdo de carbono de 7% (Ahmad, 2018), a taxa de gaseificação de  $0,062 \text{ (kg gás). (kg biomassa)}^{-1}$  (CENBIO, 2012), a densidade de metano de  $0,72 \text{ kg.m}^{-3}$  no biogás e o valor calorífico inferior do biogás de  $5.5 \text{ MJ.kg}^{-1}$ . A Tabela 5 apresenta o histórico da geração distribuída a biogás, os cálculos da biomassa inseridos no HOMER e a temperatura ambiente da granja.

$$I_g = \frac{E_g C_e}{T_d P_o N} \quad (1)$$

onde:

$I_g$  → é o índice de produção de gás por animal ( $\text{m}^3 \cdot \text{dia}^{-1} \cdot \text{suíno}^{-1}$ ).

$E_g$  → é a energia gerada no mês (kWh).

$C_e$  → é o consumo específico do gerador a biogás ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ).

$T_d$  → é o tempo em dias.

$P_o$  → é a potência de operação do gerador (kW), para o caso em estudo igual a 190 kW.

$N$  → é a quantidade de suínos na granja.

**Tabela 5. Medições da Geração Distribuída e Cálculo Reverso da Geração de Biogás. Fonte: Autor.**

GD Período	Geração (kWh/dia)	Geração (kWh/mês)	Biogás ( $I_g$ )	Biogás ( $\text{m}^3/\text{dia}$ )	Biogás (kg/dia)	Biomassa (kg/dia)	Biomassa (ton/dia)
mai/18	1488,03	46.129	0,057	680,03	489,62	7897,10	7,90
jun/18	1375,81	41.274	0,052	628,75	452,70	7301,56	7,30
jul/18	1619,70	50.211	0,062	740,20	532,95	8595,90	8,60
ago/18	1286,38	39.878	0,049	587,88	423,27	6826,95	6,83
set/18	1496,25	44.888	0,057	683,79	492,33	7940,74	7,94
out/18	1443,69	44.755	0,055	659,77	475,03	7661,82	7,66
nov/18	1509,76	45.293	0,057	689,96	496,77	8012,45	8,01
dez/18	1542,98	47.833	0,059	705,14	507,70	8188,76	8,19
jan/19	1924,11	59.647	0,073	879,32	633,11	10211,42	10,21
fev/19	2286,46	64.021	0,088	1044,91	752,34	12134,49	12,13
mar/19	1601,71	49.653	0,061	731,98	527,03	8500,43	8,50
abr/19	1583,23	47.497	0,060	723,54	520,95	8402,34	8,40
mai/19	1333,58	41.341	0,051	609,44	438,80	7077,41	7,08
jun/19	2542,41	76.272	0,097	1161,88	836,55	13492,82	13,49
jul/19	2311,56	71.659	0,088	1056,38	760,60	12267,70	12,27
<b>Média</b>	<b>1689,71</b>	<b>51.357</b>	<b>0,064</b>	<b>772,20</b>	<b>555,98</b>	<b>8967,46</b>	<b>8,97</b>

A disponibilidade de biomassa mensal foi calculada com base na geração mensal e consumo específico de  $86,83 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  no gerador, Tabela 5, cuja distribuição anual de biomassa inserida no HOMER está ilustrado na Figura 14, considerando uma média anual dos últimos 12 meses de  $9,2 \text{ ton} \cdot \text{dia}^{-1}$ . A taxa de geração de biogás calculada foi de  $0,064$

$\text{m}^3.\text{dia}^{-1}.\text{suíno}^{-1}$ , considerando o ciclo anual da geração de energia no complexo das suinoculturas e se tratar de granja terminação de 12.000 suínos. A taxa de geração de biogás se aproxima de Moraes (2012), de 0.076, e diverge das referências de Souza (2013), Silva (2018) e Cibiogás (2018) de 0.12; 0.10 e de 0.14, respectivamente. Essas diferenças podem ser justificadas pelas condições típicas de cada sistema e região.

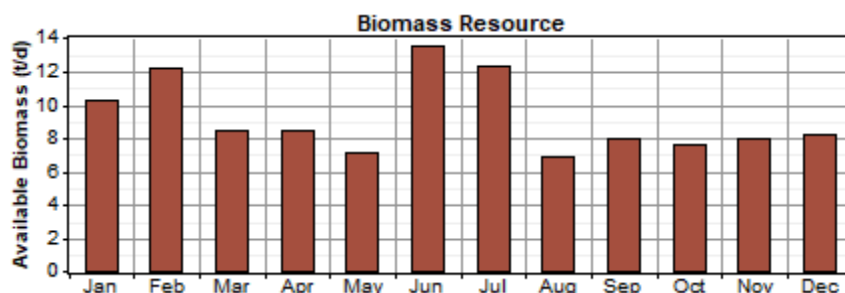


Figura 14. Recursos disponíveis de Biomassa no HOMER. Fonte: Autor.

Os custos de implantação para a produção de biomassa, considerando a vida útil do sistema igual a 25 anos, estão resumidos na Tabela 6. O custo médio de produção foi considerado  $5,925 \text{ US}\$.\text{ton}^{-1}$  em razão da produção estimada em 85.473 toneladas em biomassa e aos custos operacionais.

**Tabela 6. Custos de Operação da Produção de Biomassa. Fonte: Autor.**

Descrição	Custo (US\$)
Aquisição de 05 Biodigestores - 2300m <sup>3</sup> (Vida útil 15 anos)	254.002,53
Limpeza e Manutenção nos Biodigestores (Ciclo de 8 anos em 25 anos)	58.064,52
Terraplenagem, Corte e Aterro para construção Biodigestores	49.728,00
Obras em Alvenaria, Concreto e Alambrado na construção de Biodigestores	61.383,22
Projetos Elétricos Geração Distribuída	5.677,42
Custos com Abrigo, Cabos Elétricos e interligação Grupo Gerador ao Poste	39.914,84
Troca do Trafo de 75 kVA por Trafo de 150 kVA e Instalação de cabos	12.903,23
Custos Totais	481.673,75

### 3.2.9 Conversores eletrônicos de potência

O sistema fotovoltaico estudado utiliza inversores WEG SIW500H para a conversão CA/CC. A eficiência do inversor pode variar entre 98,2% e 98,8%. Para um inversor de 1 kW, os custos anuais de capital, substituição e O&M considerados foram, respectivamente, de US\$ 293,72, US\$ 293,72 e US\$ 3 (WEG, 2018). Os arranjos técnicos que podem combinar tamanhos dos inversores foram de 30 kW, 36 kW e 40 kW. O tempo de vida útil considerado é de 10 a 15 anos. No HOMER, para a simulação dos inversores SIW500H, foi considerada uma conexão direta entre o sistema fotovoltaico (FV) e o

barramento CA por ele não fazer distinção de múltiplos inversores, conforme o tamanho do sistema projetado. Neste caso, foi necessário incluir nos dados de entrada no FV a eficiência e o custo dos inversores no custo global do FV, situando uma taxa de desempenho de 76% para o sistema solar

### **3.2.10 Tarifas e disponibilidade da rede**

Com base nas análises das faturas de energia anteriores, a tarifa rural considerada foi  $0,12 \text{ US}\$.kWh^{-1}$ , enquanto nas residências, ela foi  $0,24 \text{ US}\$.kWh^{-1}$ . Desta forma, pode ser calculado o custo fixo de disponibilidade da rede para as sete unidades consumidoras trifásicas rurais, duas residências (monofásica e trifásica), chegando no valor de  $1382,4 \text{ US}\$.ano^{-1}$ . Segundo a RN 414 da ANEEL (2010), a disponibilidade mínima de entrega para a monofásica é de 30 kWh; para a bifásica, de 50 kWh; e para a trifásica, de 100 kWh.

### **3.2.11 Dados econômicos e restrições**

Em todas as simulações, uma taxa de juros anual de 7% com base nas linhas de crédito rurais (FCO Rural) e uma vida útil projetada de 25 anos foram assumidas como parâmetros econômicos para o sistema. A taxa de câmbio considerada foi referente a dezembro de 2018 e foi de R\$ 3,875 para cada US\$ 1,00 (BOVESPA, 2018), correspondendo à tendência observada desde que a moeda brasileira começou a se desvalorizar em 2018. A escassez máxima anual de capacidade adotada foi de 1% e a reserva operacional, como porcentagem da carga horária, foi de 10%.

Atualmente, há diversas linhas de financiamentos para projetos renováveis, ofertadas por agentes financeiros públicos e privados no estado de Goiás, que variam de 5,25% a 14,30%, entre os quais, podem-se citar o Pronaf Eco, Agricultura de Baixo Carbono (ABC), FCO Rural - Investimento Agropecuário, Inovagro, Energia Solar Santander - Linha Sustentabilidade e Goiás Fomento Crédito Produtivo Energia Solar.

## **3.3 Simulações e Resultados**

Para as simulações, foi considerado, como estudo de caso, um sistema híbrido Biogás-solar modelado, com base em dois sistemas reais: o primeiro é um sistema de Biogás localizado na zona rural de Rio Verde, com potência nominal de 330kVA; e o segundo, um sistema fotovoltaico na zona rural de Palmeiras de Goiás, de potência instalada igual a 114kWp.

Todas as simulações foram feitas com o programa HOMER da NREL, distribuído pela HOMER Energy. O programa HOMER utiliza o Windows em linguagem de programação visual C++. O software utiliza um modelo anisotrópico HDKR (Hay, Davies, Klucher e Reindl) para sistemas fotovoltaicos. O programa simula a operação do sistema, considerando os valores horários, calculando o balanço de energia para cada uma das 8.760 horas de um ano. Para cada hora do dia, o programa compara a demanda de energia e a capacidade de o sistema fornecer energia, determinando se o sistema é viável, estimando o custo do ciclo de vida do sistema.

No processo de otimização, o HOMER simula o sistema híbrido Solar-Biogás para satisfazer um pico de carga de 140kW, considerando o conjunto de cargas (aviários e suinocultura) e 1897.56 kWh.dia<sup>-1</sup> de consumo na área de estudo. Foram considerados uma taxa de juros anual de 7% e um tempo de vida do projeto de 25 anos. A Figura 15 mostra o modelo do Sistema híbrido de energia Solar-Biogás.

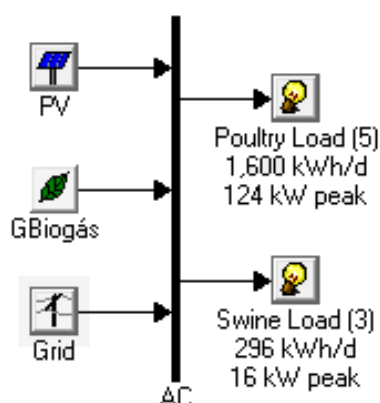


Figura 15. Modelo do sistema de energia conectado a rede inserido no HOMER - Gerador Híbrido FV-Biogás. Fonte: Autor.

No processo de otimização, o HOMER simula o complexo agropecuário com o número mínimo de arranjos possíveis. As Figuras 16 e 17 representam a distribuição de energia anual do sistema híbrido otimizado para atender as granjas. Dos resultados obtidos, o sistema fotovoltaico de 168.3 kWp corresponde a 35% da produção de eletricidade, com 253.507 kWh.ano<sup>-1</sup>, e um fator de capacidade de 17.2%. Já o gerador Biogás de 75 kW produz o restante da eletricidade, cerca de 61%, com 439.145 kWh.ano<sup>-1</sup>, e um fator de capacidade de 66.8%, considerando um consumo de biomassa de 3.221 ton.ano<sup>-1</sup>. O excesso de eletricidade de 23.909 kWh.ano<sup>-1</sup> é produzido pelo sistema otimizado de energia com uma fração renovável de 96.7% de atendimento às cargas. As



granjas consumiram da rede elétrica 23.298 kWh.ano<sup>-1</sup>, cuja parcela pode ser abatida pelo excedente de energia gerado.

O custo inicial, o custo atual líquido (NPC) total e o custo de eletricidade (COE) para este sistema são de US\$ 257,989, US\$ 624,064 e de 0.077 US\$.kWh<sup>-1</sup>, respectivamente. O Payback descontado seria de 6.36 anos, observada a geração de energia anual de 716.561 kWh.ano<sup>-1</sup> em comparação com o NPC, considerando a Tarifa Rural de 0,12 US\$.kWh<sup>-1</sup> da Granja. A Tabela 7 mostra a produção elétrica média mensal e o resumo de custo específico do componente para o sistema de energia FV-Biogás otimizado. O sistema híbrido FV-Biogás foi proposto para suprir a demanda de energia do complexo agropecuário em Rio Verde.

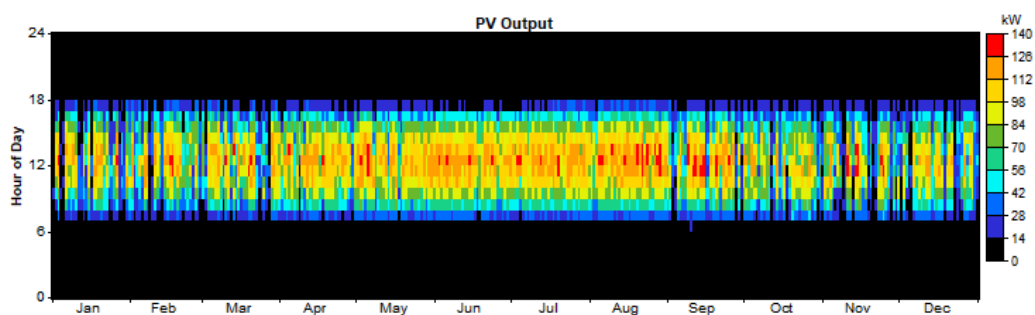


Figura 16. Distribuição horária anual de energia fotovoltaica para atender a cargas instaladas Fonte: Autor.

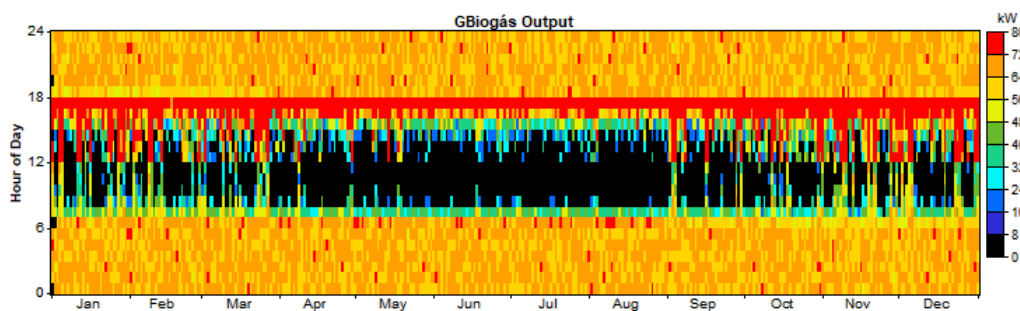


Figura 17. Distribuição horária anual do gerador a biogás para atender a cargas instaladas. Fonte: Autor.

Tabela 7. Resultados otimizados no HOMER. Fonte: Autor.

PV (kWp)	BIO (kW)	Load total (kW)	Initial Cost (US\$)	Operating Cost (US\$/ano)	Total NPC (US\$)	COE (US\$/kWh)	Ren. Frac. (%)	Biomass (t)	BIO oper. (h)
168.30	75	1897.6	257,989	31,413	624,064	0.077	0.97	3,221	7,164
	55	1897.6	59,122	54,512	694,376	0.086	0.66	3,358	8,338
168.30		1897.6	192,537	58,773	877,456	0.109	0.35		
		1897.6	0	83,045	967,768	0.120	0.00		

### 3.3.1 Efeito das taxas de juros no Custo da Eletricidade

Considerando as linhas de financiamentos para sistemas de energias renováveis, tem-se uma variação de 5% a 14% para projetos de grande porte. O efeito de diferentes taxas de juros no custo da eletricidade produzida pelo sistema híbrido FV-Biogás é mostrado na Figura 18, que mostra que a uma taxa de juros de 5%, o COE produzido é a US\$ 0,072 kWh<sup>-1</sup>. Considerando um aumento de 9% na taxa de juros, o COE do sistema híbrido FV-Biogás pode aumentar em cerca de 26.4%, aproximadamente 0,091 US\$.kWh<sup>-1</sup>.

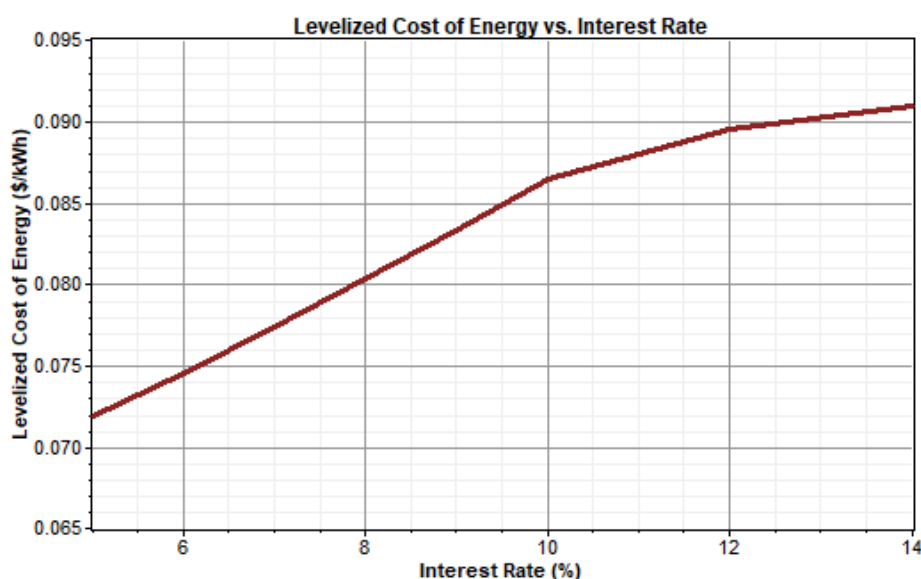


Figura 18. Análise de sensibilidade do COE em função da Taxa de Interesse do projeto. Fonte: Autor.

### 3.3.2 Análise do Sistema Híbrido e Individuais Biogás e Fotovoltaico no Custo de Eletricidade e Indicadores Econômicos

Com objetivo de mostrar a viabilidade do sistema híbrido FV-Biogás, foram simulados dois sistemas isolados individuais para atendimento da carga do complexo agropecuário em estudo. Esta simulação foi possível considerando algumas premissas: disponibilidade total de biomassa para o gerador a biogás de 250 kVA, ou seja, 12.96 ton.dia<sup>-1</sup> de biomassa para atendimento total da carga e considerando reajustar o consumo de biomassa anual de 4.123 ton.ano<sup>-1</sup>, tempo de projeto em 25 anos, e o custo da biomassa em 4.913 US\$.ton<sup>-1</sup>, segundo os custos de implantação da Tabela 6. O gerador a biogás irá operar nesta condição com fator de capacidade em 49.4% da nominal. Já para o sistema PV, foram considerados o custo base de 1.14 US\$.Wp, O&M de 1% deste custo para o sistema de 460.02 kWp, e reajuste anual da tarifa em 5%, calculado para gerar a energia requerida pelas granjas.

**Tabela 8. Resultados da comparação dos sistemas individuais solar e biogás com sistema híbrido no HOMER. Fonte: Autor.**

PV (kWp)	BIO (kW)	Total Grid (kWh)	Custo Inicial (US\$)	Custo Operação (US\$/ano)	Total NPC (US\$)	COE (US\$/kWh)	Ren. Frac. (%)	Biomass (t)	BIO oper. (h)	Payback (anos)
168.30	75	692.040	257.989	31.413	624.064	0.077	0.97	3.221	7,164	6.36
460.02		692.918	524.423	5.244	585.534	0.073	1.00			7.27
	160	691.979	126.676	42.553	619.571	0.077	1.00	4.123	8,759	3.58

Observa-se na Tabela 8 que o sistema híbrido se mostra mais atrativo e viável, pois o sistema exclusivo PV tem um Payback superior ao híbrido mesmo com o COE mais baixo, apesar de o COE ter sido superior aos sistemas individuais. Mesmo que o sistema exclusivo biogás tenha o COE e Payback mais atrativo que o híbrido, há uma limitação de biomassa disponível produzida pela suinocultura em estudo. Assim, é interessante que sejam melhorados o desempenho para a geração de biogás pelos biodigestores, e também a performance/eficiência do gerador a biogás impactando positivamente nos indicadores econômicos desta solução. A Figura 19 sintetiza a comparação econômica dos sistemas.

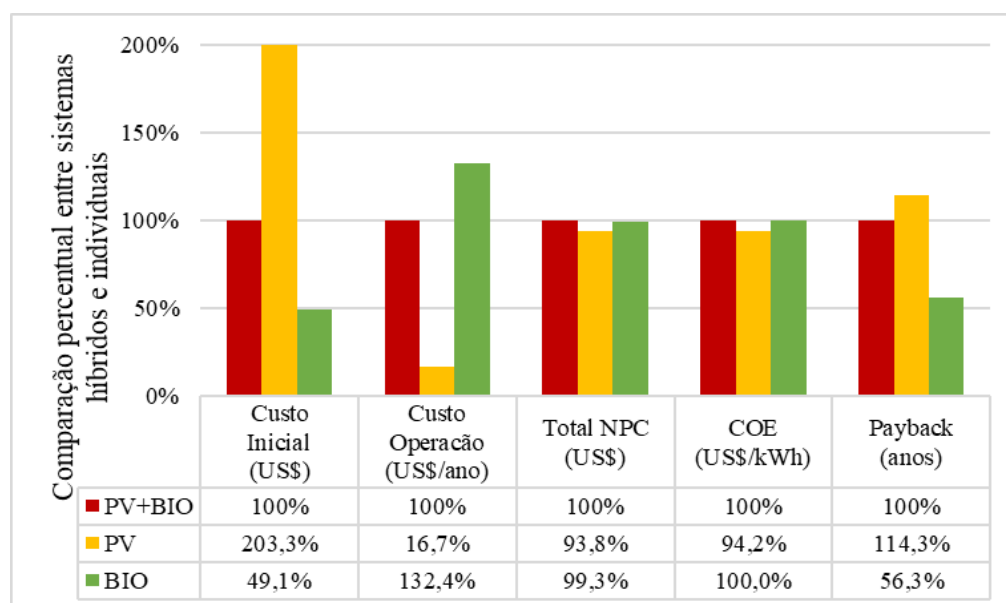


Figura 19. Comparação dos indicadores econômicos entre os sistemas híbrido e exclusivo. Fonte: Autor.

Mesmo com a proximidade do COE, no sistema híbrido podem ser potencializadas suas variáveis de desempenho e ele tem mais confiabilidade por se tratar de fornecimento por duas fontes distintas renováveis. Dessa maneira, ficam evidenciados os ganhos na redução do tempo de retorno, se comparado a um sistema exclusivamente

fotovoltaico. Além disso, embora tenha ocorrido um acréscimo em comparação ao sistema puramente a biogás, deve-se considerar que a presença da geração fotovoltaica acaba conferindo maior versatilidade ao sistema em relação ao biogás exclusivo, uma vez que, mesmo que ocorram reduções na produção de biogás, o sistema continuaria produzido via FV.

Segundo Heydari (2016) e Parihar (2018), a geração de energia do sistema biomassa poderia ser complementar em comparação com a energia solar, tendo em conta as diferentes propriedades em confiabilidade. Nestes estudos, uma estrutura é fornecida para otimização de sistemas híbridos FV-biomassa. Os resultados obtidos indicam que o sistema híbrido é economicamente melhor do que um sistema somente PV ou somente biomassa pela sua vantagem de capacidade de distribuição cuja combinação se torna um sistema de energia confiável e rentável para suprir a demanda elétrica de áreas isoladas.

Borges Neto (2010) relata que em sistemas energéticos descentralizados baseados em energias renováveis, as fontes podem dar uma contribuição significativa para o desenvolvimento sustentável nos países em desenvolvimento. Experiências de utilização de fotovoltaicos e digestores foram acumuladas nos últimos anos na região Nordeste do Brasil, mas a história mostra a necessidade de adotar uma política de energia mais forte e de longo prazo para sistemas de energia renovável a fim de evitar descrédito neles pelas populações rurais e comunidades regionais.

Os estudos de Castellanos (2015), Bhatt (2016), Singh (2016), Shahzad (2017), Das (2017) e Ahmad (2018) comprovam os benefícios de sistemas híbridos com baixos custos de energia (COE) e ênfase em solar e biomassa para aplicações rurais e áreas remotas. Gazda (2016) relata que o uso de células fotovoltaicas contribui para aumentar a eficiência energética e a redução das emissões de gases com relação a sistemas híbridos. Como uma situação favorável da utilização de resíduos biodegradáveis para a produção de energia, esse sistema também pode ser indicado, pois reduz a emissão de metano que sabidamente seria lançado no meio ambiente como resultado dos processos naturais de decomposição biológica de resíduos ou seu armazenamento em aterros sanitários.

### **3.3.3 Efeito da Disponibilidade de Biomassa e Slope do Gerador no Custo da Eletricidade e Geração de Energia**

O COE produzido pelo sistema híbrido FV-Biogás em função da eficiência do gerador a biogás e da disponibilidade é apresentado na Figura. 20, enquanto a geração de energia a biogás, considerando a variação dos mesmos parâmetros, pode ser visualizada

na Figura 21. Esta análise supõe que a eficiência do consumo dos geradores a biogás (Slope) esteja situada na faixa de concentração de metano de 65%, 70% e 75%, apresentando respectivamente, as taxas de conversão de 0,4512; 0,4128 e 0,384 kg.kWh<sup>-1</sup>. Neste caso, foram consideradas a razão dos consumos específicos do gerador de 75 kW, conforme Tabela 4, e a potência de saída também de 75 kW. Com relação à disponibilidade de biomassa, foi considerada a variação em 20.29% da média anual, no caso,  $9,2 \pm 1,867$  t.dia<sup>-1</sup>, tendo em vista o desvio padrão médio da produção.

Os resultados da análise de sensibilidade mostraram que o aumento da concentração de CH<sub>4</sub> ou redução do Slope reduziram 7.27% no COE, enquanto que a variação em  $\pm 20\%$  da disponibilidade de biomassa provocou variação de 10% no COE. Tal intermitência pode ter sido causada por diferentes fatores: temperatura de trabalho das bactérias, alimentação dos suínos e utilização excessiva de água na higienização das baias, o que impacta no volume de matéria seca que será convertida em biogás.

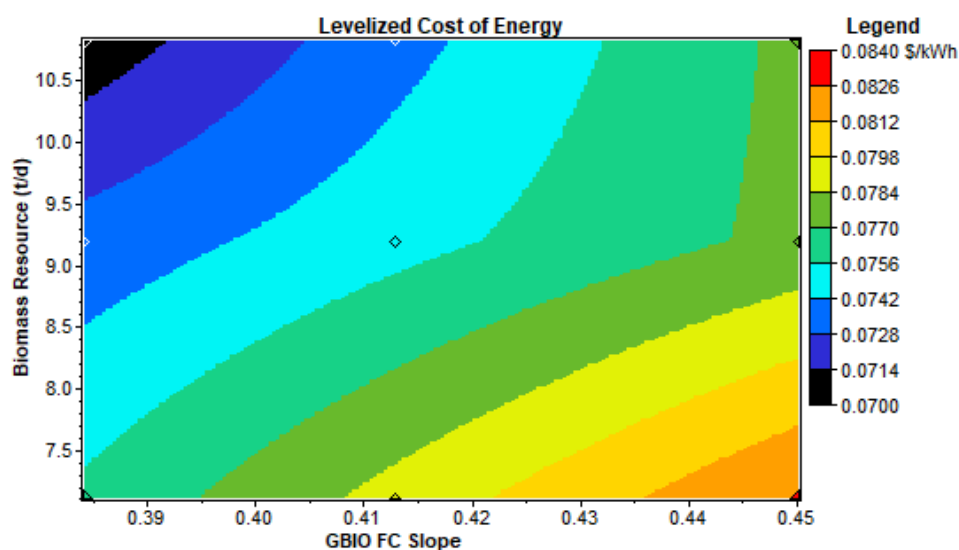


Figura 20. Análise de sensibilidade do COE em função do Slope e disponibilidade da biomassa. Fonte: Autor.

Analisando a Figura 21, observa-se que a variação da produção de energia em MWh.ano<sup>-1</sup> diminui em até 17.64% à medida que se aumenta o percentual de metano (redução do Slope) e aumenta a geração em 29.2% com a elevação da disponibilidade de biomassa.

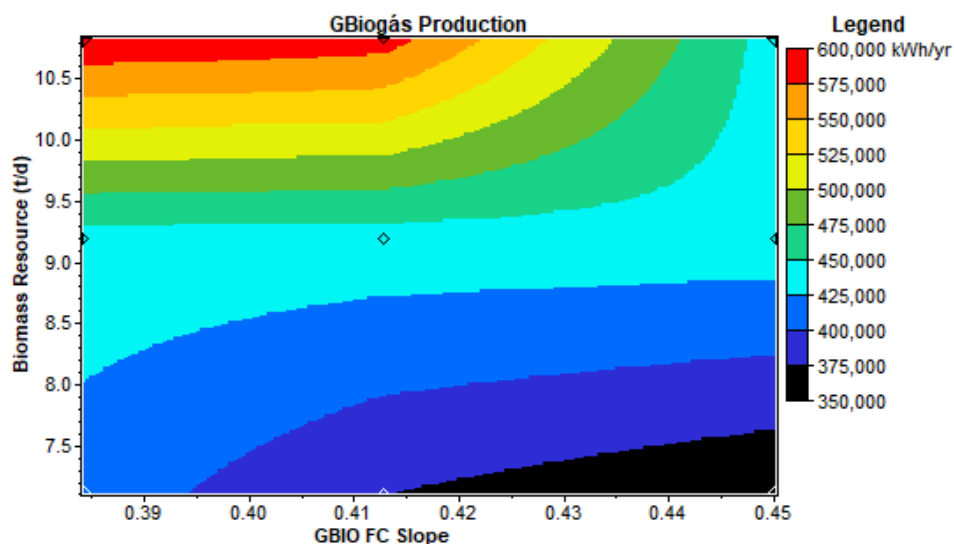


Figura 21. Análise de sensibilidade do Produção de Energia a Biogás em função do Slope e disponibilidade da biomassa. Fonte: Autor.

### 3.3.4 Efeito do Taxa de Desempenho (TD) e da Radiação Solar Global no Custo da Eletricidade e Geração de Energia

As análises se fundamentaram nos estudos Dierauf & Paiva (2013, 2017). Os resultados da simulação em relação às variações na taxa de radiação solar e desempenho são apresentados na Figura. 22. Como pode ser visto, o sistema aumenta o COE com o aumento no consumo de energia. Em razão da variação na disponibilidade de radiação solar, aumento no desempenho da energia solar permite redução no COE do sistema, sendo mínima essa redução. A combinação do aumento da radiação com o desempenho do sistema resulta em uma redução total de COE em 17.5%, com taxa de juros em 7%.

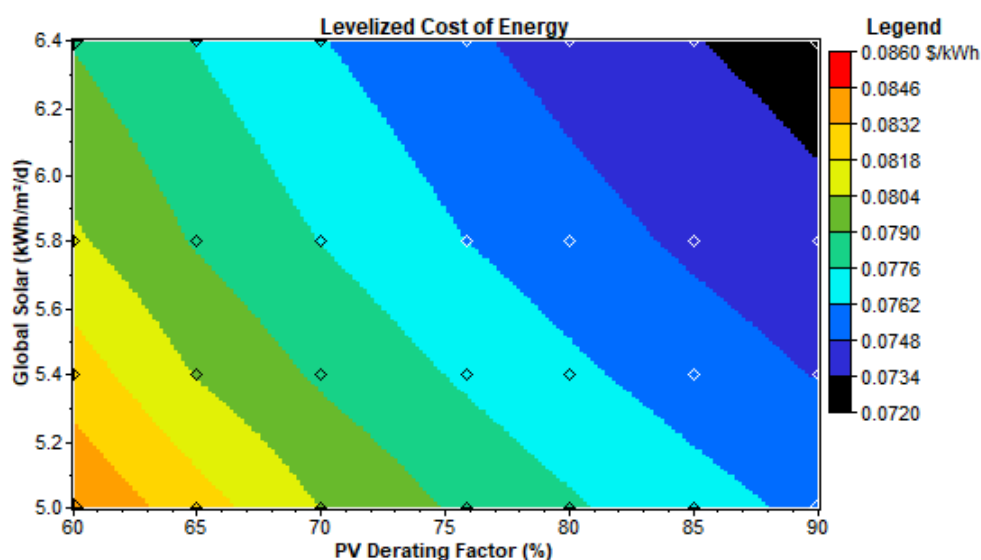


Figura 22. Análise de sensibilidade do COE em função do Taxa de Desempenho (TD) e Radiação Global. Fonte: Autor.

A Figura 23 apresenta uma análise de sensibilidade da Produção de Energia Solar em função do Taxa de Desempenho (TD) e da radiação global. Percebe-se, pela Figura 23, que, para um Taxa de Desempenho (TD) de 60%, a produção de energia solar pode ir de cerca de 200 MWh para uma irradiância global de 5.0 kWh.m<sup>-2</sup>.dia para cerca de, aproximadamente, 250 MWh para uma irradiância global de 6.4 kWh.m<sup>-2</sup>.dia, representando uma diferença de, aproximadamente, 50MWh. Para um TD de 90%, a produção de energia solar pode ir de cerca de 300 MWh para uma irradiância global de 5.0 kWh.m<sup>-2</sup>.dia para cerca de aproximadamente 350 MWh para uma irradiância global de 6.4 kWh.m<sup>-2</sup>.dia, representando uma diferença de 50 MWh. Analisando apenas o TD, percebe-se que, para uma mesma irradiância global de 6.4 kWh.m<sup>-2</sup>.dia, um sistema com um TD de 90% produz, aproximadamente, 125 MWh a mais que um sistema com um TD de 60%. Desta forma, observa-se, pela Figura 25, a importância de estudos voltados para o setor fotovoltaico com vistas a melhorar a Taxa de Desempenho e, conseqüentemente, a produção de energia fotovoltaica.

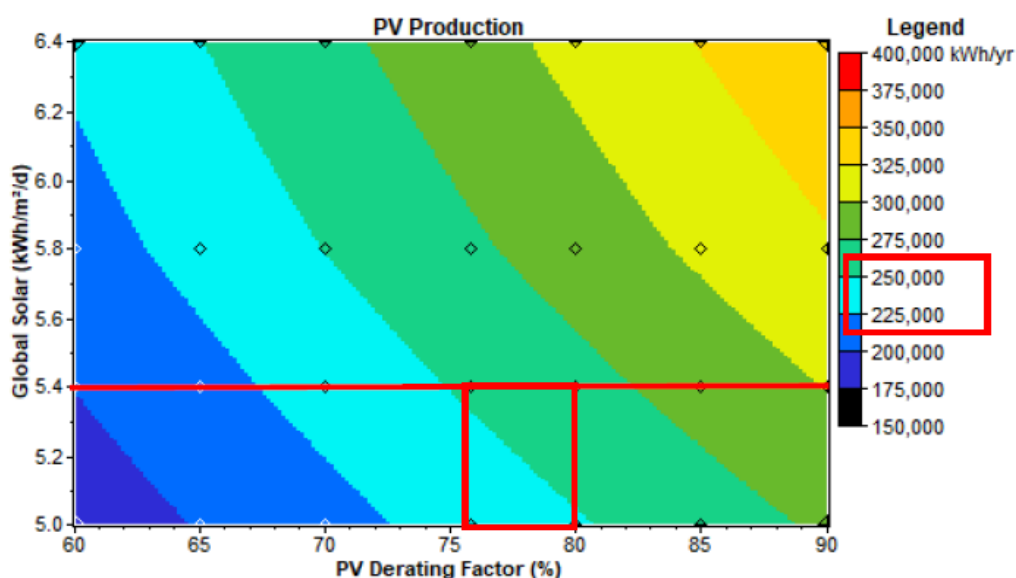


Figura 23. Análise de sensibilidade Produção de Energia Solar em função do Taxa de Desempenho (TD) e Radiação Global. Fonte: Autor.

### 3.4 Conclusões

No presente trabalho, foi utilizado o programa HOMER para a modelagem e simulações para um estudo de viabilidade técnico-econômica, utilizando um Sistema de Geração de Energia Híbrido FV-Biogás para uma granja típica em Rio Verde, Estado de Goiás. A simulação, baseada em um sistema de FV-Biogás, foi feita considerando um período de um ano, tendo permitido observar parâmetros de desempenho e geração de

energia. Os resultados dos modelos de dimensionamento foram utilizados para determinar o dimensionamento ideal das configurações para o produtor.

Os resultados da análise de simulação indicaram que o uso de um sistema híbrido FV-Biogás é economicamente viável em razão da redução de custos dos componentes da tecnologia de energia renovável no Brasil. Os painéis fotovoltaicos são o principal fator de custo do sistema proposto após a otimização em razão do baixo aproveitamento energético.

A produção média de biogás nos digestores durante o monitoramento no ciclo anual foi de cerca de  $772,20 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ , cujas medições contribuíram para determinar um índice de  $0,064 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}.\text{suíno}^{-1}$ , sendo esta a métrica real a ser utilizada na região de Rio Verde para projetos futuros de biodigestores e geração de energia a biogás. Na região do estado de Goiás, mais especificamente sudoeste goiano, não existem estudos de sistemas híbridos utilizando o HOMER. Os resultados obtidos permitem estabelecer uma métrica de geração de biogás para a região. Além disso, também foram determinados os índices de performance anuais para sistemas fotovoltaicos para aviários, cujo PR médio foi mensurado em 75.85%.

A qualidade do biogás ficou em torno de 68% de metano, resultando em um consumo específico do grupo gerador de  $0,63 \text{ m}^3.\text{kWh}^{-1}$  e um eficiência global de  $1,60 \text{ kWh.m}^{-3}$ . Considerando a eletricidade gerada no 439.16 MWh no Biogás e 253.51 MWh no Solar, a quantidade de energia elétrica exportada para a rede foi de 23.91 MWh. Considerando o desconto do valor de energia utilizado pela rede dessas propriedades de rurais, o custo evitado de energia elétrica de  $85.990 \text{ US}\$.ano^{-1}$ .

Para fins de comparação dos custos individuais, o COE do Biogás foi de  $0.0430 \text{ US}\$.kWh^{-1}$ , enquanto o COE do FV ficou em  $0.0725 \text{ US}\$.kWh^{-1}$ . Os relatórios do IRENA (2017) relatam que os projetos mais competitivos fazem uso agrícola ou resíduos florestais já disponíveis no processamento industrial em locais onde os custos marginais da matéria-prima são mínimos, ou mesmo zero. No caso do LCOE para sistemas fotovoltaicos, esse índice pode variar de US\$ 0,08 e US\$ 0,20, sendo o primeiro caso em países com melhores condições de irradiação ou por se tratar de mercados de baixo custo como China, Índia, Austrália e Espanha.

Análises de otimização comparando os sistemas de geração alternativos Fotovoltaica e Biogás, com base no COE de  $0,077 \text{ US}\$.kWh^{-1}$ , mostraram que o sistema híbrido FV-Biogás produziu o menor valor com *Simple and Discounted Payback* de 4.99 e 6.36 anos, respectivamente, *Internal Rate of Return* de 19.8% e *Return on Investment*



20.0%, sendo uma alternativa bem atrativa. A simulação também mostra que, com uma redução na taxa de juros, o COE pode ser reduzido consideravelmente. A análise também mostra que maior disponibilidade de radiação solar e aumento do % CH<sub>4</sub> provocam redução do COE.

Outro fator importante é a questão complementariedade entre as duas fontes, destacando basicamente duas situações: a limitação da energia solar fotovoltaica ao período diurno, neste caso, podendo ser usado o biogás à noite. Além disso, há a possibilidade de atuar junto com a concessionária para entregar maior ou menor quantidade de energia nos horários mais críticos.

### 3.5 Agradecimentos

Agradecimentos pelo apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (Fapeg), pela disponibilização de bolsas de apoio financeiro; às empresas ERBR Renováveis, AUTA Bioenergia, WAG Engenharia e MFC Engenharia, pelas informações e apoio técnico prestado; e aos proprietários Ivan Klein (Fazenda Dona Thereza) e Jorge Comelli (Fazenda Talhado Rio Doce), pelo apoio nas visitas técnicas e informações dos projetos de geração distribuída.

### 3.6 Referências Bibliográficas

ABINEE, **Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira**, São Paulo, SP, 2012.

ABREU, P.G. de; ABREU, V.M.N. **Ventilação na avicultura de corte**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2000. 50p. (Embrapa Suínos e Aves. Documentos, 63).

AHMAD, J., IMRAN, M., KHALID, A., IQBAL, W., ASHRAF, S. R., ADNAN, M., KHOKHAR, K. S., **Techno economic analysis of a wind-photovoltaic-biomass hybrid renewable energy system for rural electrification: A case study of Kallar Kahar**. *Energy* 2018, 148, 208–234.

ALFAKIT. **Kit Análise de Biogás**. Disponível em: <<https://alfakit.ind.br/kit-analise-de-biogas-cod-3819/1/>>. Acesso em: 12 jan. 2017.

ANEEL, **Banco de Informações de Geração (2018)**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso em: 20 dez. de 2018.

ANEEL, **Resolução Normativa nº 414 (2010)**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2010414.pdf>>. Acesso em: 10 jan. de 2019.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 482 (2012)**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 05 mar. de 2019.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 687 (2015)**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 05 mar. de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CRIADORES DE SUÍNOS (ABCS). **Produção de suínos: teoria e prática**. Brasília, DF, 2014. 908 p. Disponível em: <[http://www.abcs.org.br/attachments/-01\\_Livro\\_producao\\_bloq.pdf](http://www.abcs.org.br/attachments/-01_Livro_producao_bloq.pdf)>

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

BHATT, ANKIT & SHARMA, M.P. & SAINI, R.P., "**Feasibility and sensitivity analysis of an off-grid micro hydro–photovoltaic–biomass and biogas–diesel–battery hybrid energy system for a remote area in Uttarakhand state, India,**" *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier* 2016, vol. 61(C), pages 53-69.

BORA BJ, SAHA UK, CHATTERJEE S, VEER V. **Effect of compression ratio on performance, combustion and emission characteristics of a dual fuel diesel engine run on raw biogas.** *Energy Convers Manag* 2014; 87:1000–9.

BORGES NETO, M. R., CARVALHO, P. C. M., CARIOCA, J. O. B., & CANAFÍSTULA, F. J. F. **Biogas/photovoltaic hybrid power system for decentralized energy supply of rural areas.** *Energy Policy* 2010, 38(8), 4497–4506.

**BOVESPA - Cotações de Ações de Bolsa de Valores**. Disponível em: <<https://br.advfn.com/moeda/dolar/2018>> Acesso em: 19 jan. de 2019.

CASTELLANOS, J. G., WALKER, M., POGGIO, D., POURKASHANIAN, M., NIMMO, W., **Modelling an off-grid integrated renewable energy system for rural electrification in India using photovoltaics and anaerobic digestion,** *Renewable Energy* 74 (2015), p. 390:398.

**CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa**, 2012. Disponível em: <<http://cenbio.iee.usp.br/download/metodologiabiomassa.pdf>>. Acesso em: 04 dez. de 2018.

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada, **PIB do Agronegócio Brasileiro**, 2018. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>>. Acesso em: 04 dez. de 2018.

**CIBIOGÁS Nota Técnica: N° 001/2018 – Produção de biogás a partir da biodigestão de dejetos suínos em fase de terminação no Oeste do Paraná**. Foz do Iguaçu, 2018.

CRESESB. **Potencial Solar - SunData**. 2016. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 28 Fevereiro 2018.

DAS, B. K., HOQUE, N., MANDAL, S., PAL, T. K., & RAIHAN, M. A., **A techno-economic feasibility of a stand-alone hybrid power generation for remote area application in Bangladesh**. *Energy* 2017, 134, 775–788.

DECKER, B.; JAHN, U. **Performance of 170 grid connected pv plants in northern Germany - analysis of yields and optimization potentials**. *Solar Energy, Elsevier*, v. 59, n. 4-6, p. 127–133, 1997.

DEUBLEIN D, STEINHAUSER A. **Biogas from waste and renewable resources**. 1st ed. Weinheim: Wiley-VCH; 2008.

DIERAUF, T. et al. **Weather-Corrected Performance Ratio**. Technical Report, NREL/TP-5200-57991 [S.l.], 2013.

**ER-BR Energias Renováveis: Soluções em Energia e Biometano**, 2018. Disponível em: <<http://www.erbr.com.br>>.

GARRIDO. H, VENDEIRINHO, V., BRITO, M. C., **Feasibility of KUDURA hybrid generation system in Mozambique: Sensitivity study of the small-scale FV-biomass and FV-diesel power generation hybrid system**, *Renewable Energy* 2016; 92: 47-57.

GAZDA, W., & STANEK, W., **Energy and environmental assessment of integrated biogas trigeneration and photovoltaic plant as more sustainable industrial system**. *Applied Energy* 2016, 169, 138–149.

GCL Solar Panel, **GCL-P6-72-330 (330W)**. Disponível em: <<http://www.grandsolar.com.au/docs/GCL-310W-330W-Datasheet.pdf>> Acesso em: 04 dez. de 2018.

HEYDARI, A., ASKARZADEH, A., **Optimization of a biomass-based photovoltaic power plant for an off-grid application subject to loss of power supply probability concept**, *Applied Energy* 2016; 165: 601–611

HOGA. **Hybrid renewable optimization by genetic algorithms**. Spain: University of Zaragoza; 2012.

HOMER. **Hybrid optimization model for electric renewables**. CO, USA: HOMER Energy, LLC; 2012.

HYBRID2. **The hybrid power system simulation model**. MA, USA: Renewable Energy Research Laboratory; 2012.

IEC, International Electrotechnical Commission. **Photovoltaic system performance monitoring-guidelines for measurement, data exchange and analysis**. *International Standard IEC*, v. 61724, p. 1998–11, 2013.

**INMET – Instituto Nacional de Meteorologia Brasileiro**, Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 20 jan. de 2019.

**INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE)**. Divisão político-administrativa. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <<http://www.ngb.ibge.gov.br/Default.aspx?pagina=micro>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

IRENA (International Renewable Energy Agency) - **Renewable Power Generation Costs in 2017**. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2018/Jan/Renewable-power-generation-costs-in-2017>>. Acesso em: 11 fev. de 2019.

MACHADO, R. C. P., **Ferramenta computacional para geração distribuída a partir de sistemas híbridos renováveis**. 2013. 101p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2013.

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

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

MORAIS, M. A. **Estudo experimental e avaliação econômica da operação de Biodigestores Tubulares para a produção de Biogás a partir de resíduos da Suinocultura**. 2012. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

**NASA website [Online]** Available: [www.eosweb.larc.nasa.gov/sse/](http://www.eosweb.larc.nasa.gov/sse/).

NASCIMENTO, L. A. B., **Análise Energética na Avicultura de Corte: Estudo da viabilidade econômica para um sistema de geração de energia elétrica eólico-fotovoltaica conectado à rede**. 2011. 126p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco. 2011.

NISHIMURA, R.; KOLTERMANN, P. I.; PEREIRA, V. M.; et al. **Avaliação da qualidade da energia elétrica produzida por grupo gerador movido a biogás**. 2010 9th *IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, INDUSCON 2010, p. 1–6, 2010.

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.

OLIVEIRA, S. V. W. B.; LEONETI, A. B.; CALDO, G. M. M.; OLIVEIRA, M. M. B. **Generation of bioenergy and biofertilizer on a sustainable rural property**. *Biomass & Bioenergy*, v. 35, p. 2608-2618, 2011.

PAIVA, GABRIEL M.; PIMENTEL, SÉRGIO P.; MARRA, ENES G.; ALVARENGA, BERNARDO P. **Analysis of inverter sizing ratio for PV systems considering local climate data in central Brazil**. *IET RENEWABLE POWER GENERATION (ONLINE)*, v. 11, p. 1364-1370, 2017.

PARIHAR, A. K. S., SETHI, V., & BANERJEE, R., **Sizing of biomass based distributed hybrid power generation systems in India.** *Renewable Energy* 2018; 134: 1400-1422.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** 2ª. ed. São José dos Campos: [s.n.], 2017.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A., **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES), Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, 2014, p. 530.

POCAS, C. C. C.; LEAL, A. D. L.; SOUZA FILHO, A. J. T.; BARBOSA JÚNIOR, J. A. F. **Análise da Composição e Qualidade do Biogás.** Anais. In: 7º Congresso Estadual de Iniciação Científica e Tecnológica, 2018, Rio Verde.

PORPATHAM E, RAMESH A, NAGALINGAM B. **Effect of compression ratio on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine.** *Fuel* 2012; 95:247–56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.059>.

PORTUGAL-PEREIRA, J., SORIA, R., RATHMANN, R., SCHAEFFER, R., SZKLO. A., **Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Techno economic and environmental assessment in Brazil.** *Biomass and Bioenergy* 2015; 81: 521-533.

QIAN Y, SUN S, JU D, SHAN X, LU X. **Review of the state-of-the-art of biogas combustion mechanisms and applications in internal combustion engines.** *Renew and Sustain Energy Rev* 2017; 69:50–8.

RAHMAN, M., HASAN, M. M., PAATERO, J. V., LAHDELMA, R., **Hybrid application of biogas and solar resources to fulfill household energy needs: A potentially viable option in rural areas of developing countries,** *Renewable Energy* 2014; 68: 35-45

RAJBONGSHI, R., BORGHAINA, D., MAHAPATRA, S., **Optimization of FV-biomass-diesel and grid base hybrid energy systems for rural electrification by using HOMER,** *Energy* 2017; 126: 461-474

RAKOPOULOS CD, MICHOS CN. **Generation of combustion irreversibilities in a spark ignition engine under biogas–hydrogen mixtures fueling.** *Int J Hydrog Energy* 2009; 34:4422–37.

REICH, N. H. et al. **Performance ratio revisited: is PR>90% realistic? Progress in Photovoltaics: Research and Applications,** Wiley Online Library, v. 20, n. 6, p. 717–726, 2012.

RETScreen. Clean Energy Decision Support Centre. **Clean energy project analysis.** Ottawa, Canada: Natural Resources Canada; 2005.

REZENDE, S. P., **Avaliação do Potencial de Expansão da Bioeletricidade na Microrregião Sudoeste do Estado de Goiás**, Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira-SP, 2017.

SARKER, S., **Feasibility analysis of a renewable hybrid energy system with producer gas generator fulfilling remote household electricity demand in Southern Norway**, *Renewable Energy* 87 (2016), p. 772:781.

SHAHZAD M. K., ZAHID, A., RASHID, T., REHAN, M. A., ALI, M., AHMAD, M., **Techno-economic feasibility analysis of a solar-biomass off grid system for the electrification of remote rural areas in Pakistan using HOMER software**, *Renewable Energy* 2017; 106: 264-273

SHIROUDI A, RASHIDI R, GHAREHPETIAN GB, MOUSAVIFAR SA, AKBARI FOROUD A. **Case study: simulation and optimization of photovoltaic-wind-battery hybrid energy system in Taleghan-Iran using HOMER software**. *J Renew Sustain Energy* 2012; 4: 053-111.

SILVA, A. A. L. **Sustentabilidade energética: um estudo da viabilidade econômica e financeira do uso de energia solar na avicultura**. 2017. 92p. Dissertação (Mestrado em Administração), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel-PR, 2017.

SILVA, S. B., SEVERINO, M.M., DE OLIVEIRA, M.A.G., **A stand-alone hybrid photovoltaic, fuel cell and battery system: A case study of Tocantins, Brazil**, *Renewable Energy* 2013; 57: 384-389.

SILVA. F.P, SOUZA, S. N. M., KITAMURA, D. S., NOGUEIRA, C. E. E., OTTO, R. B., **Energy efficiency of a micro-generation unit of electricity from biogas of swine manure**, *Renew and Sustain Energy Rev* 2018;82: 3900-3906.

SINGH, S., SINGH, M., KAUSHIK, S. C., **Feasibility study of an islanded microgrid in rural area consisting of PV, wind, biomass and battery energy storage system**, *Energy Conversion and Management* 128 (2016), p. 178–190.

SOUZA, S. N. M., WERNCKE, I., MARQUES, C. A., BARICCATTI, R. A., SANTOS, R. F., NOGUEIRA, C. E. E., BASSEGIO, D., **Electric energy micro-production in a rural property using biogas as primary source**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013; 28: 385-391

SUBHES CB. **Review of alternative methodologies for analyzing off-grid electricity supply**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012; 16:677e94.

**SWERA Project (Solar and Wind Energy Resource Assessment)**, coordenado no Brasil pelo DMA/CPTEC/INPE, Disponível em: <<https://maps.nrel.gov/swera>>. Acesso em: 20 dez. de 2018.

**WEG Solar Energy**, Brazil Technical data on inverters in <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/ha4/h35/WEG-inversores-string-SIW500H-SIW300H-50076575-pt.pdf>>. Acesso em: 04 dez. de 2018.

## 4. CAPÍTULO II

(Normas de acordo com a Journal Elsevier Energy)

### **CRÉDITOS DE CARBONO E EMISSÕES DE GEE POR GERADOR HÍBRIDO BIOGÁS-FOTOVOLTAICO EM SUINOCULTURAS**

### **CARBON CREDITS AND GHG EMISSIONS BY HYBRID BIOGAS- PHOTOVOLTAIC ENERGY GENERATION FROM SWINE FARMS**

#### ***Resumo***

Sistemas híbridos consistem de duas ou mais fontes geradoras de eletricidade, normalmente uma ou mais fontes convencionais e uma ou mais fontes renováveis, e objetivam promover economia de combustível e obter uma fonte confiável de suprimento de energia, podendo estar ou não conectados à rede de distribuição. Este trabalho objetiva avaliar a viabilidade ambiental de implantação de um sistema híbrido de geração de eletricidade. Este sistema é composto por gerador a biogás e um sistema fotovoltaico. Todo o sistema está localizado no município de Rio Verde onde há elevada concentração de suinocultores que, através do tratamento dos resíduos suínos, poderá levar à produção de biogás para ser aproveitado como combustível para geração de energia elétrica. Neste cenário, o sistema é capaz de reduzir a emissão de CO<sub>2</sub>eq em 10.785,079 t.ano<sup>-1</sup>, além de gerar uma rentabilidade de 272.448,35 US\$.ano<sup>-1</sup> em créditos de carbono pela queima de CH<sub>4</sub> na cogeração, contribuindo favoravelmente para o meio ambiente e para o uso de energias limpas.

***Palavras-chave:*** *Solar Energy; Biogas; Anaerobic Digestion; Greenhouse Gas Emissions; Créditos de Carbono.*

### ***Abstract***

Hybrid systems consist of two or more electricity generating sources, usually one or more conventional sources and one or more renewable sources, and are intended to promote fuel economy and a reliable source of energy supply, whether or not connected to the distribution network. This work aims to evaluate the environmental feasibility of implementing a hybrid electricity generation system. This system consists of a biogas generator and a photovoltaic system. The entire system is located in the municipality of Rio Verde where there is a high concentration of pig farmers that, through the treatment of pig waste, may lead to the production of biogas to be used as fuel for electricity generation. In this scenario, the system is able to reduce CO<sub>2</sub><sub>eq</sub> emissions by 10,785.079 tonnes.year<sup>-1</sup> and generate a profitability of 272,448.35 US\$.year<sup>-1</sup> in carbon credits from burning CH<sub>4</sub> in cogeneration, contributing favorably for the environment and for the use of clean energy.

***Key words:*** *Solar Energy; Biogas; Anaerobic Digestion; Greenhouse Gas Emissions; Carbon Credits.*

### **4.1 Introdução**

A matriz elétrica brasileira pode ser basicamente representada pelas fontes hidrelétrica e termelétrica, que, juntas, representam cerca de 81% da geração, segundo a ANEEL (2019). Porém tais fontes de energia provocam relevantes impactos ao meio ambiente, tais como: mudanças no uso do solo pela exploração dos combustíveis e construção das usinas; impactos estéticos relacionados à infraestrutura da usina de energia; poluição térmica advinda da queima dos combustíveis; risco de acidentes na exploração dos combustíveis e na geração da energia; e geração de efluentes sólidos, líquidos e gasosos que provocam danos à saúde humana e ao ecossistema (MIRANDA, 2012). O aumento no consumo de energia previsto para os próximos anos, sobretudo em razão do crescimento econômico, aumentará a pressão sobre o setor elétrico brasileiro, especialmente pelas dificuldades relacionadas com a escassez de recursos hídricos, base da hidroeletricidade. Assim, deve-se destacar a necessidade da diversificação da matriz energética, sobretudo pela inserção de fontes alternativas e renováveis de energia.

A geração de energia proveniente das usinas hidrelétricas corresponde a mais da metade da matriz geradora de eletricidade no Brasil. Já as usinas termelétricas ocupam segundo lugar na matriz energética brasileira, que utiliza variados combustíveis, sendo os



mais relevantes o carvão, óleo, gás natural e a biomassa (ANEEL, 2018). Por estar disponível em abundância e pelo custo, o carvão tem se tornado uma importante opção no sistema energético no Brasil. Entre os combustíveis fósseis, as termelétricas a gás natural ganham espaço por serem consideradas fonte mais limpa. O gás natural é considerado combustível de queima limpa por emitir menos dióxido de carbono e outros gases poluentes (EPE, 2016).

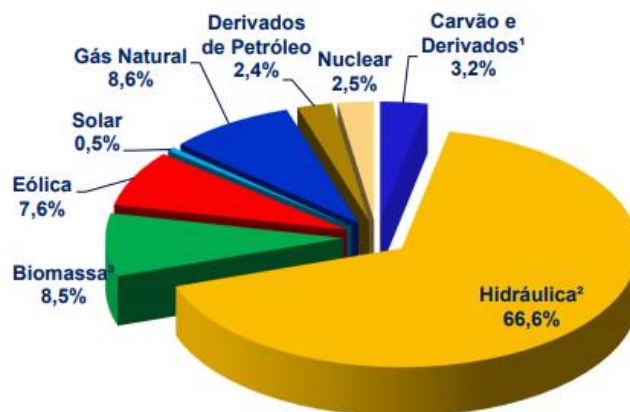


Figura 1. Matriz Elétrica Brasileira (EPE, 2019)

As hidrelétricas causam impactos tanto na fase de construção como na fase de operação. A construção destas estruturas altera diretamente o uso do solo e gera diversos impactos socioambientais, uma vez que podem exigir a realocação de pessoas que habitam a área a ser alagada para formação do reservatório, além da perda de importantes áreas naturais, terras agrícolas e sítios arqueológicos pela inundação (LOURENÇO, 2016; USGS, 2016).

De acordo com o último balanço energético nacional, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo de energia primária aumentou cerca de 72% nos últimos dez anos no Brasil. Além disso, em termos de energia elétrica, foi registrado aumento em torno de 87% no consumo nacional no período de 2002 a 2016. Para atender à demanda crescente, outras fontes renováveis têm sido incorporadas à matriz energética brasileira, como a solar, biomassa, centrais hidrelétricas de pequeno porte e biogás (EPE, 2016).

Entre os vários fatores ambientais considerados na escolha de uma determinada fonte de energia em detrimento de outra, podem-se destacar os impactos produzidos durante o processo de geração de energia elétrica, relacionados aos níveis de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE - *Greenhouse Gas Emissions*).

Azenha (IEE-USP, 2010) afirma que o metano, causado pelo processo de apodrecimento provocado pela inundação, resulta em uma grande emissão de metano, que, se comparado ao gás carbônico, tem impacto 21 vezes sobre o aquecimento global. Miranda (2012) e Lourenço (2016) desenvolveram estudos para as estimativas do fator de emissão de CO<sub>2</sub> e para diversas fontes de geração, considerando estudos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), adotando como fronteiras de análise as etapas de construção, geração e operação das usinas hidroelétricas, termelétricas e eólicas, através de uma meta-análise de diversas literaturas e harmonização das métricas.

Já as usinas termelétricas liberam uma quantidade significativa de poluentes na atmosfera. Um dos impactos mais preocupantes ligados às termelétricas está relacionado com a emissão de gases poluentes na atmosfera (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFCs, PFCs, SF<sub>6</sub>, NO<sub>x</sub>, CO), gerando acidificação da água da chuva, alteração na qualidade do ar, além de intensificar o efeito estufa (EPE, 2016).

Uma forma eficiente para avaliar as emissões do sistema energético é a utilização da ferramenta Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (KAMMEN; PACCA, 2004). A ACV considera todo o ciclo de vida da geração da energia, incluindo todas as etapas, desde planejamento e construção, as etapas de extração, processamento e utilização da matéria-prima e do combustível. As emissões de GEE, segundo Weisser (2007), ocorrem nas fases anteriores e posteriores à geração de energia, sendo que nas tecnologias renováveis, essas emissões podem chegar a 90% das emissões do ciclo total. A comparação dos ciclos de vida das principais fontes de energia pode ser vista na Tabela 1.

**Tabela 1. Comparação de emissões específicas de CO<sub>2</sub> para diferentes tipos de centrais elétricas**

<b>Combustível da Usina</b>	<b>Emissão de CO<sub>2</sub> (g/kWh)</b>	<b>Referencias</b>
<b>Carvão Mineral</b>	1.144,36	Miranda (2012); Lourenço (2016)
<b>Óleo Ultraviscoso</b>	828,96	Miranda (2012); Lourenço (2016)
<b>Óleo Diesel</b>	781,14	Miranda (2012); Lourenço (2016)
<b>Gás Natural</b>	518,11	Miranda (2012); Lourenço (2016)
<b>Biogás</b>	197 - 284	IPCC (2006); Ecoinvent (2015)
<b>Hidroelétricas</b>	86,21	Miranda (2012); Lourenço (2016)
<b>Solar</b>	29.2 - 30.5	Asdrubali et al., 2015; Amponsah et al., 2014
<b>Eólicas</b>	9.4 - 10.7	Bertasiene et al., 2015; Asdrubali et al., 2015

A suinocultura concentra praticamente toda a produção de biogás de origem pecuária no Brasil. Com um plantel de cerca de 39 milhões de cabeças (USDA, 2017) e

produção de dejetos estimada em 900 milhões t/ano (ABISOLO, 2016), produziu, em 2015, 196 mil Nm<sup>3</sup>/dia, o que representou 14% do total produzido no país, para um potencial de produção de cerca de 123 mil Nm<sup>3</sup>/dia.

O estado de Goiás tem grande potencial para duas fontes renováveis, biogás e solar, pela presença da suinocultura na região correspondente a 5,3% da produção nacional (IBGE, 2016) e pelo alto índice da radiação solar apresentado. Apesar de ambas serem renováveis, um importante fator ambiental a ser considerado são as emissões, sobretudo no caso do biogás de suinocultura. Vale mencionar a contribuição significativa do município de Rio Verde, que tem a maior criação de suínos do estado, representando 38,21%, e o segundo maior rebanho suíno do Brasil, com cerca de 1,91% da participação nacional.

Segundo Saleh (2014), os principais gases de efeito estufa (GEE) são o CO<sub>2</sub>, óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e CH<sub>4</sub>. De acordo com o IPCC (2007), a agricultura contribui com 25%, 65% e 90% do total das emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O respectivamente. Além da pecuária, na agricultura, as principais práticas agrícolas com impacto sobre as emissões de GEE são o cultivo dos solos, o uso de fertilizantes e a queima da biomassa.

Ainda de acordo com autor, projetos de tratamento de dejetos de suínos, que captam o gás metano (CH<sub>4</sub>) antes que ele possa chegar à atmosfera, enquadram-se perfeitamente na categoria de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). No Brasil, há iniciativas utilizando a tecnologia de biodigestores, que, por meio da degradação dos dejetos de suínos de forma anaeróbia e posterior aproveitamento energético, reduzem a emissão de GEE (MARQUES, 2007; SALEH, 2014).

O potencial de biomassa no mercado brasileiro para a produção de biogás e seu uso para geração de eletricidade têm sido relatados por Ferreira et al. (2018). Em 2015, havia 127 usinas de biogás no Brasil utilizando resíduos agrícolas e industriais, bio-resíduos, lamas de depuração e gás de aterro, que produziram cerca de 1,6 milhão de Nm<sup>3</sup>.dia<sup>-1</sup> (584 bilhões de m<sup>3</sup> biogás / ano), representando uma geração de eletricidade de 3.835 GWh (REN21, 2015; MAMBELI et al., 2014). A capacidade instalada de geração de eletricidade de biogás aumentou significativamente, atingindo 196 MW em 2015 e 450 MW em 2016 (IEA, 2016).

Saleh (2014) desenvolveu estudo em suinoculturas de terminação (SVT) e nos sistemas produtores de leitões (SPL) sobre as maiores emissões de metano (CH<sub>4</sub>) e em

relação à emissão de CO<sub>2</sub>eq atual nas granjas nos casos sem biodigestores e com biodigestores para comprovar a eficiência na redução de GEE. Para as condições locais específicas, chegou-se a um valor de emissão de metano para as granjas em terminação nas condições da região de Rio Verde - GO de 296.278,70 m<sup>3</sup> de metano ao ano, ou seja, um potencial de energia para cogeração e/ou créditos de carbono. A Tabela 2 sintetiza a comparação das análises.

**Tabela 2. Comparação de emissões de poluentes em suinoculturas com uso de biodigestores por granja. Fonte: Saleh (2014).**

SVT s/ Biodigestores (ton CH <sub>4</sub> ano <sup>-1</sup> )	SVT c/ Biodigestores (ton CH <sub>4</sub> ano <sup>-1</sup> )	SPL c/ Biodigestores (ton CH <sub>4</sub> ano <sup>-1</sup> )
205,3 ± 68,79	123,94 ± 39,17	11,22 ± 3,0 ton CH <sub>4</sub> ano <sup>-1</sup>
<b>SVT sem Biodigestores (Gg CO<sub>2</sub>eq ano<sup>-1</sup>)</b>	<b>SVT com Biodigestores (Gg CO<sub>2</sub>eq ano<sup>-1</sup>)</b>	
2,79 ± 0,93		0,92 ± 0,39

Tavares (2016) desenvolveu estudo similar sobre GEE em suinoculturas de terminação. Os resultados para a emissão de CO<sub>2</sub> e NH<sub>3</sub> foram inferiores aos reportados por outros autores (CO<sub>2</sub>: 637,0 e 676,0 g/suíno/d; NH<sub>3</sub>: 8,9 e 10,8 g/suíno/d) (GUINGAND et al., 2010; GUIGAND et al., 2011). Robin et al. (2010) determinaram, porém, resultados inferiores para a NH<sub>3</sub>. Tal diferença pode ser explicada, em parte, pelo diferente tipo de edificação e pela ventilação utilizada no Brasil quando comparada, por exemplo, com a França (granja aberta e ventilação natural vs. Granja fechada e ventilação mecânica). Para o CH<sub>4</sub>, os valores foram superiores aos reportados em outros estudos (7,4 e 10,1 g/suíno/d) (GUINGAND et al., 2010; 2011).

Tomando como exemplo a suinocultura, Pereira et al. (2009) elencam os impactos ambientais negativos, além da emissão de carbono: acúmulo de poluentes orgânicos no solo, favorecendo a proliferação de insetos hematófagos, com efeitos sobre a saúde da população local; decomposição de dejetos no solo, produzindo nitratos e fosfatos que contaminam a água, produzem crescimento exagerado de algas (eutrofização) e elevam a demanda bioquímica de oxigênio; e contaminação das áreas adjacentes à produção, bem como dos corpos hídricos.

Kaparaju (2011) estudou o impacto da tecnologia de digestão anaeróbica (AD) na mitigação das emissões de gases de efeito estufa em relação ao manejo de esterco em fazendas típicas de laticínios e suínos na Finlândia. Os resultados mostraram que a fermentação entérica (CH<sub>4</sub>) e o manejo do esterco (CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O) foram responsáveis por 231,3; 32,3 e 18,3 Mg de CO<sub>2</sub> eq. ano<sup>-1</sup> em laticínios, porcas e suínos, respectivamente.

Com os dados agrícolas existentes e os rendimentos experimentais de metano, uma energia renovável estimada em 62,8, 21,8 e 47,7 MWh de eletricidade ano<sup>-1</sup> poderia ser gerada em uma central de cogeração nessas fazendas, respectivamente. As emissões totais de GEE que poderiam ser compensadas nas vacas leiteiras, porcas e porcos foram de 177; 87,7 e de 125,6 Mg de CO<sub>2</sub> eq. ano<sup>-1</sup>, respectivamente. O impacto da tecnologia AD na mitigação das emissões de GEE foi principalmente substituído pelo consumo de combustíveis fósseis por emissões reduzidas causadas pela redução do uso e pela produção de fertilizantes e pelo manejo do esterco.

Santos et al. (2016a) e Mambeli et al. (2014) calcularam a potência presente em estações de tratamento anaeróbias e aterros sanitários no Brasil. De acordo para Santos et al. (2016a), o máximo economicamente viável de energia elétrica usando geração anaeróbica de Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) pode atingir 1 TWh no Brasil até 2040. No mesmo estudo, a população mínima que contribui com efluentes domésticos para uma ETAR para tornar o projeto economicamente viável é de 300.000 habitantes. Mambeli et al. (2014), desenvolvendo cálculos para aterros, encontraram que a população mínima para tornar a geração de energia de aterro viável é de 200.000 e o potencial máximo economicamente viável é perto de 4 TWh nos cenários mais favoráveis até 2030. A população mínima viável para os projetos mostra que a viabilidade econômica é fator limitante para o desenvolvimento de usinas de biogás no Brasil.

O objetivo do presente artigo é estabelecer uma estimativa dos índices de emissão de um sistema de geração distribuída a partir do biogás de suinocultura, buscando destacar seus benefícios ou impactos, em relação a uma atividade suinícola convencional sem o aproveitamento do biogás para a produção de energia elétrica; além disso contribuir também para a difusão e desenvolvimento de iniciativas para o desenvolvimento limpo (MDL).

#### **4.2 Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)**

O MDL é um instrumento que abre a possibilidade de países desenvolvidos realizarem investimentos em projetos de proteção ambiental nas nações em desenvolvimento, permitindo às empresas e governos dos países industrializados que não conseguem cumprir suas metas de redução de emissões de gases comprar créditos de carbono em países em desenvolvimento. Esses créditos são emitidos por projetos que capturam gases, como os de reflorestamento, no qual o CO<sub>2</sub> é absorvido pelas plantas, e

os de aterro sanitário, em que o gás metano pode ser usado na geração de eletricidade (FARIA, 2007).

Para que resultem em Certificado de Emissão Reduzida (CER), as atividades de projeto do MDL devem necessariamente passar por diversas etapas no ciclo de projeto, cada qual com um custo distinto. A Figura 2 mostra o fluxo de sete processos presentes no ciclo completo bem como as entidades formalmente nominadas para cuidar de cada etapa. Na Tabela 3 são sintetizados os principais processos com estimativa dos valores envolvidos.

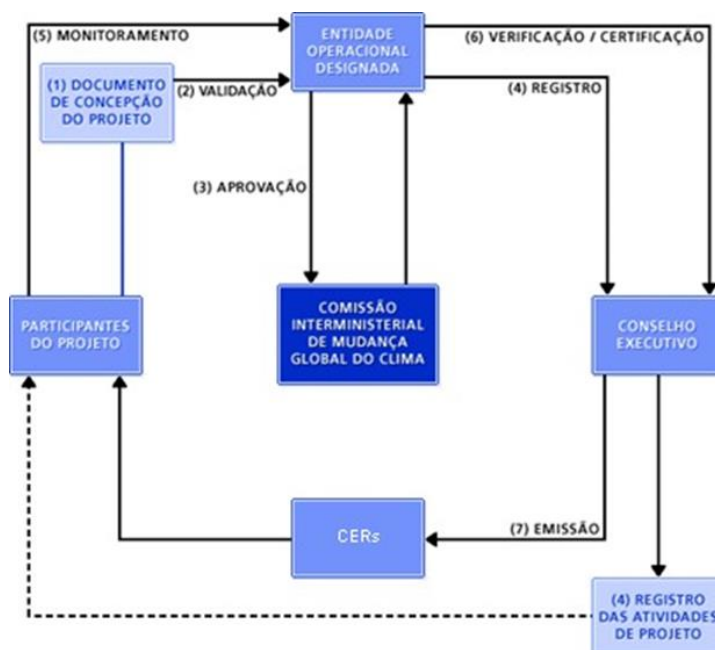


Figura 2. Ciclo de projeto do MDL. Fonte: BM&FBOVESPA, 2010

Tabela 3. Custos do ciclo de projeto do MDL. Fonte: UNESA, 2005

Fases	Custos		Atividades
Elaboração de Documento de Concepção de Projeto (DCP)	US\$ 20.000 – US\$ 60.000		Desenho conceitual e de viabilidade
	US\$ 5.000 – US\$ 50.000		Elaboração
Validação (EOD)	US\$ 15.000 – US\$ 40.000		Processo da avaliação da Entidade Operacional Designada (EOD) para comprovar se o projeto se ajusta aos requisitos do MDL e aprovação da Autoridade Nacional Designada (AND)
Negociação de Contratos	US\$ 10.000 – US\$ 40.000		Redação do Contrato de Compra – Venda de CER
Registro	≤ 15.000 t CO <sub>2</sub> anuais	US\$ 5.000	Aceitação oficial pela junta Executiva de um projeto validado
	> 15.000 e ≤ 50.000 t CO <sub>2</sub> anuais	US\$ 10.000	
	> 50.000 e ≤ 100.000 t CO <sub>2</sub> anuais	US\$ 15.000	
	> 100.000 e ≤ 200.000 t CO <sub>2</sub> anuais	US\$ 20.000	
	> 200.000 t CO <sub>2</sub> anuais	US\$ 30.000	

<b>Verificação / Certificação</b>	US\$ 3.000 – US\$ 15.000 anuais	<b>Atividades da EOD</b>
<b>Emissão de CER</b>	2% do valor dos certificados	<b>A Junta Executiva emite os CER e registra</b>
<b>Venda de CER</b>	3% - 15% do valor dos certificados	<b>Gastos de comercialização</b>

Segundo Amaral (2007), os custos do MDL são divididos em duas grandes categorias: aqueles que fazem parte do processo, o que vai até o registro no Conselho Executivo do MDL, e aqueles que são contabilizados no pós-projeto. Com referência à primeira parte do processo, há o estudo de viabilidade, desenvolvimento de ideias e notas, preparo de DCP, possível necessidade de desenvolvimento de nova metodologia de linha de base e monitoramento, validação, aprovação do país anfitrião e registro no Conselho Executivo do MDL. Na fase pós-registro, são observados custos relacionados ao monitoramento e verificação assim como taxas administrativas do Conselho Executivo e possíveis taxas do país anfitrião, cujo detalhamento está na Tabela 4.

**Tabela 4. Variação estimada de transação do MDL até o registro do estágio do Ciclo do Projeto, em US\$. Fonte: Marques (2007).**

<b>Estágio</b>	<b>Mínimo (US\$)</b>	<b>Máximo (US\$)</b>
Pré-Desenvolvimento	5.000	15.000
DCP	15.000	50.000
Aprovação pela AND	0	5.000
Validação	10.000	40.000
Custos Legais/Contratos	10.000	20.000
<b>Total</b>	<b>40.000</b>	<b>130.000</b>

#### **4.3 Descrição do Complexo Agropecuário da Fazenda Talhado e Gerador Híbrido de Energia FV-Biogás**

Granjas são locais utilizados para confinamento e crescimento de animais, podendo ser utilizadas para criação de aves ou suínos. A Figura 2 apresenta o complexo agropecuário da propriedade estudada, destinado à criação de suínos, localizado na região sudoeste do estado de Goiás, Brasil. Este complexo foi beneficiado por um projeto MDL conduzido pela empresa AgCert (2005), nomeado Mitigação GHG AWMS, que será detalhado a seguir. As granjas suinícolas da região têm capacidade média de alojamento de 12.000 suínos, distribuídos em três núcleos, cujos dejetos são canalizados para o biodigestor, o qual produz o biogás utilizado para geração de energia. O presente estudo baseou-se nas tecnologias de fontes alternativas utilizada nas granjas de suínos e aves, considerando uma referência de custo nas simulações e otimizações do HOMER feitas

pelo autor. Neste trabalho, o sistema híbrido FV-Biogás foi simulado para registrar suas características operacionais, tamanhos dos sistemas foram otimizados e uma análise técnico-econômica do sistema híbrido foi feita para atender ao consumo de todo complexo agropecuário.



Figura 3. Vista aérea das Suinoculturas (SVT) localizadas na zona rural em Rio Verde-GO (Google Earth, 2018)

O sistema de biodigestores e o gerador a biogás estão situados na suinocultura de terminação na Fazenda Talhado, situada na latitude sul de  $18^{\circ} 09' 57''$  e longitude oeste de  $51^{\circ} 05' 07''$ , na zona rural de Rio Verde, cuja operação teve início em fevereiro de 2017 (Figura 4). Já o sistema solar fotovoltaico foi projetado para complementar a demanda de energia do complexo agropecuário.



(a)



(b)

Figura 4. (a) Biodigestores do Projeto AWMS (b) Grupo Gerador a Biogás 330 kVA. Fonte: Autor.

A Tabela 5 apresenta o histórico da geração distribuída a biogás, a quantidade de biogás e de biomassa calculados no estudo no monitoramento de abril/18 a julho/19



da Fazenda Talhado. A finalidade deste projeto é mitigar o efluente animal relacionado ao GHG, aprimorando as práticas de uso dos dejetos, reduzindo as emissões nas granjas.

**Tabela 5. Resumo medições médias da GD Biogás e da geração de biomassa.**

**Fonte: Autor.**

<b>Geração (kWh/dia)</b>	<b>Geração (kWh/mês)</b>	<b>Biogás (Ig)</b>	<b>Biogás (m<sup>3</sup>/dia)</b>	<b>Biogás (m<sup>3</sup>/mês)</b>	<b>Biogás (kg/dia)</b>	<b>Biomassa (kg/dia)</b>	<b>Biomassa (ton/dia)</b>
1689,71	51.357	0,064	772,20	23469,96	555,98	8967,46	8,97

O consumo nas faturas de energia das instalações de cinco granjas de aves, três granjas de suínos, duas residências foi calculado em 56.927 kWh.mês<sup>-1</sup> ou 683.165,57 kWh.ano<sup>-1</sup>. O histórico das médias dos aviários, suinoculturas e residências está listado na Tabela 6.

**Tabela 6. Histórico de consumo energético, em kWh, dos complexos agropecuários e residências. Fonte: Autor.**

<b>Locais</b>	<b>FGO 1</b>	<b>FGO 2</b>	<b>FGO 3</b>	<b>FGO 4</b>	<b>FGO 5</b>	<b>SVT 1</b>	<b>SVT 2-3</b>	<b>Casa 1</b>	<b>Casa 2</b>
<b>Total Ano</b>	122.228	114.912	111.844	111.407	109.684	28.453	71.905	4.500	8230
<b>Média Mês</b>	10.186	9.576	9.320	9.284	9.140	2.371	5.992	375	682

Em síntese, o melhor arranjo técnico do sistema híbrido FV-Biogás no HOMER Energy foi o sistema fotovoltaico, de 168.3 kWp, que corresponde a 35% da produção de eletricidade, com 253.507 kWh.ano<sup>-1</sup>, e um fator de capacidade de 17.2%, sendo a produção específica de 1.506,28 kWh/kWp/ano e a Performance Ratio de 76%. Já o gerador Biogás de 75 kW produz o restante da eletricidade, cerca de 61%, com 439.145 kWh.ano<sup>-1</sup>, e um fator de capacidade de 64%, considerando um consumo de biomassa de 3221 t.ano<sup>-1</sup>. A Tabela 7 detalha as três alternativas que atenderiam à demanda energética do complexo agropecuário.

**Tabela 7. Comparação dos sistemas individuais solar e biogás com o sistema híbrido. Fonte: Autor.**

<b>PV (kWp)</b>	<b>BIO (kW)</b>	<b>Total Grid (kWh)</b>	<b>EPV (kWh)</b>	<b>EBIO (kWh)</b>
168.3	75	692.040	253.507	439.145
460.02		692.918	692.918	
	160	691.979		691.979

#### 4.3.1 Estudo de Caso Fazenda Talhado - Projeto de Mitigação GHG AWMS

Operações agrícolas mundiais estão se tornando, progressivamente, mais intensivas para compreender economias de produção e escala. A pressão para se tornar mais eficiente leva a semelhanças operacionais significativas entre fazendas de um “tipo”, ao passo que entradas, saídas, práticas, genética e tecnologia tornaram-se semelhantes em todo o mundo.

Isso é especialmente verdadeiro em operações de criação de gado (suíno, vacas leiteiras, etc.), que podem criar consequências ambientais profundas, como emissões de gases de efeito estufa, odores e contaminação da água/terra (incluindo infiltração, escoamento e aplicação excessiva), resultante do armazenamento (e eliminação) de dejetos animais. Operações de alimentação de animais confinados (*Confined Animal Feeding Operations - CAFOs*) utilizam opções semelhantes ao Sistema de gerenciamento de dejetos animais (*Animal Waste Management System - AWMS*) para armazenar efluentes animais. Esses sistemas emitem metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), resultantes dos processos de decomposição aeróbica e anaeróbica.

As atividades do projeto proposto mitigarão emissões de GHG AWMS de uma maneira economicamente sustentável e resultarão em outros benefícios ambientais, como qualidade superior da água e odor reduzido. Em termos simples, o projeto propõe mover as fazendas designadas a partir de uma prática AWMS de alto GHG; uma lagoa a céu aberto a uma prática AWMS de baixo GHG; um digestor anaeróbico a temperatura ambiente com a captura e combustão do biogás resultante.

Problemas de energia também são uma questão majoritária em regiões rurais do Brasil. Digestores anaeróbicos produzem biogás contendo alto percentual de metano, que pode ser utilizado para a produção de energia localizada, calor ou eletricidade. Este potencial energético anteriormente não explorado pode servir para aumentar ou deslocar o fornecimento local.

Um exemplo de um sistema melhorado de gestão de resíduos animais seria um digestor anaeróbico. Os digestores são projetados otimizando o tempo de retenção, normalmente entre 22 e 28 dias, para maximizar a captura de  $\text{CH}_4$ . Este sistema aproveita as vantagens da baixa exigência de manutenção de uma lagoa durante a captura de biogás sob uma capa impermeável.

Ao incorporar os Sistemas de Manejo de Dejetos Animais (AWMS), as emissões de GHG serão capturadas e inflamadas. Os créditos da redução da emissão resultantes

seriam, então, vendidos a grandes emissores em países desenvolvidos, ajudando a deslocar os custos de implementação da alteração de AWMS. O mecanismo foi o principal fator de influência na decisão de instalar os digestores anaeróbicos em temperatura ambiente nestas fazendas.

A Figura 5 ilustra duas abordagens para mitigar as emissões de GHG AWMS. A configuração mínima constrói células e um sistema de combustão, como descrito acima. O upgrade opcional incorpora a utilização de outros sistemas de energia renovável para a produção de eletricidade e/ou aquecimento na fazenda, utilizando o metano produzido pelas células cobertas como combustível. O queimador de configuração mínima é mantido para queimar o metano não exigido pelo outro equipamento de energia renovável.

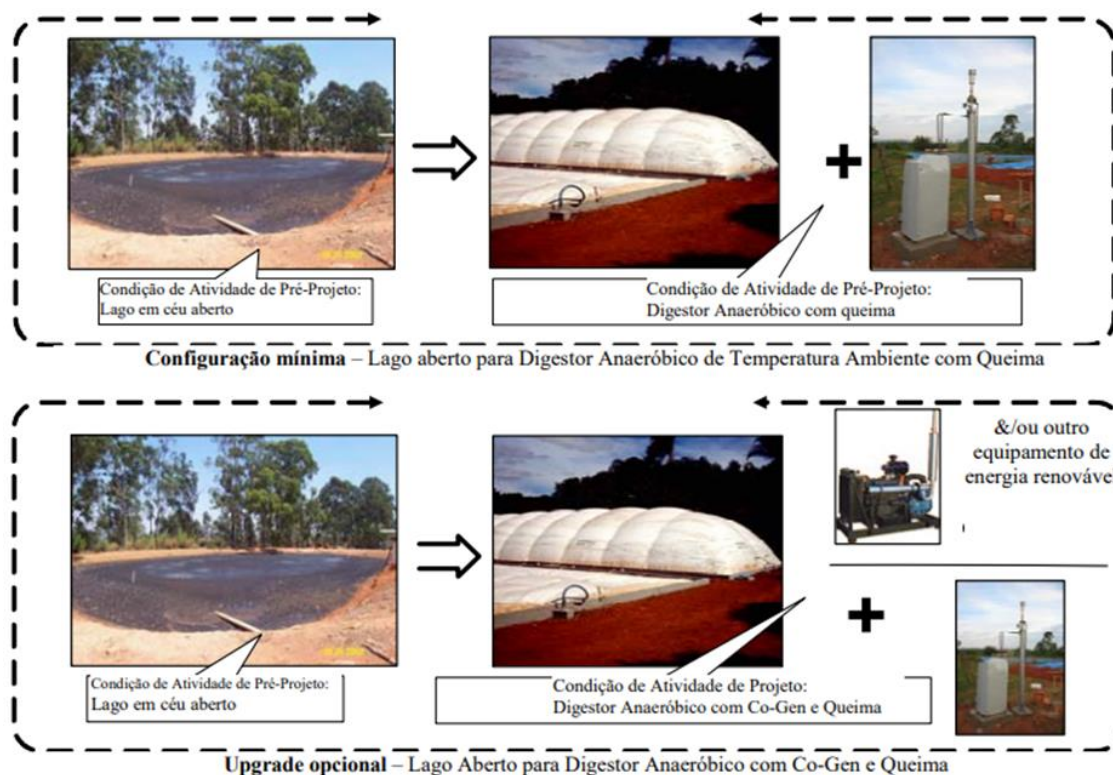


Figura 5. Configurações da atividade do projeto. (AgCert, 2005).

O limite do projeto proposto considera as emissões de GEE advindas das práticas AWMS, incluindo o GEE resultante da captura e da combustão do biogás. Os locais de atividade do projeto utilizam sistemas de duas ou mais lagoas. A prática AWMS proposta inclui a cobertura de cada lagoa principal em um digestor em temperatura ambiente, que inclui células que capturam o biogás resultante, que é, então, inflamado. O limite do

projeto considera essas alterações da prática assim como as opções futuras que o produtor pode escolher utilizar.

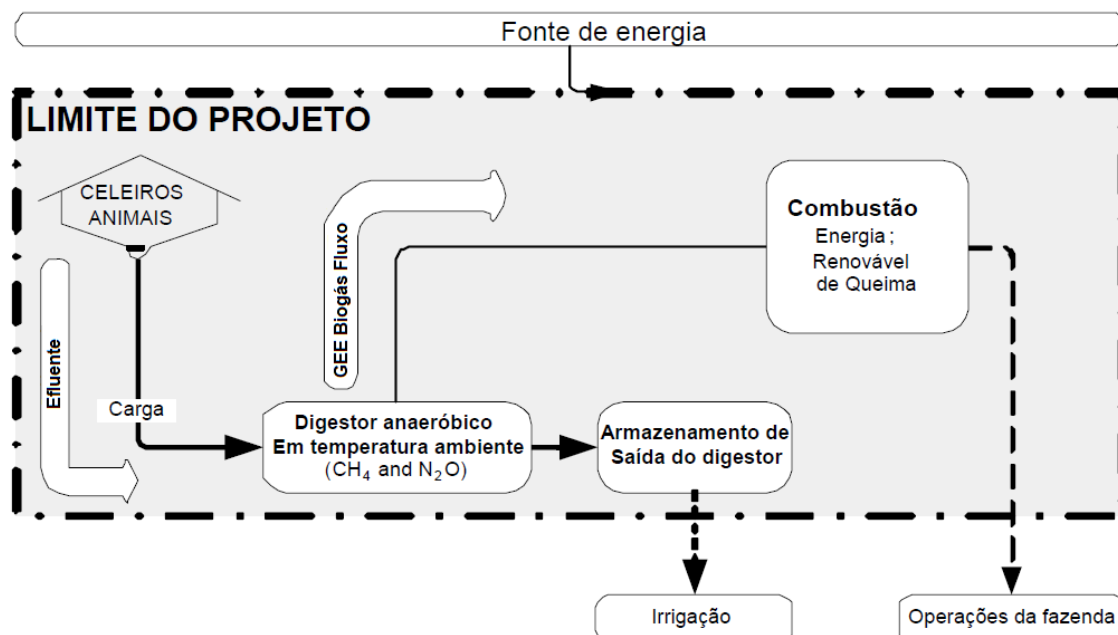


Figura 6. Escopo do Projeto de Mitigação GHG AWMS (AgCert, 2005)

A tecnologia a ser empregada pela atividade do projeto inclui a substituição total da principal lagoa aberta nos locais de atividade do projeto por “células” da lagoa coberta de pressão positiva, criando digestores anaeróbicos de temperatura ambiente. O sistema será formado por uma ou mais células, com capacidade suficiente para criar um tempo de retenção hidráulica adequado.

As células foram designadas para permitir a remoção de resíduos sólidos, sem quebrar o selo, e o biogás de cada célula pode ser seccionado de forma independente. A manutenção e os reparos podem ser feitos em uma célula sem afetar a operação das outras células. Todos os componentes das células serão originados de fabricantes nacionais. O efluente processado das células da lagoa será encaminhado à(s) lagoa(s) de clarificação, e o gás capturado será encaminhado a um queimador e/ou gerador para ser inflamado.

Além do benefício principal da mitigação das emissões de GEE, principal foco do projeto proposto, as atividades propostas também resultarão em benefícios ambientais positivos e incluirão: Redução das emissões atmosféricas dos Compostos orgânicos voláteis, que causam odor; e Redução do risco (de liberação) de vetores transmissores de doenças e patogenias por vias aéreas.

### 4.3.2 Estimativa da quantidade dos gases $CH_4$ e $CO_2$ presentes no biogás

Com a estimativa da produção de biogás, considerando a alternativa mais eficiente, será calculada a produção de gás metano e do dióxido de carbono presentes no biogás. De acordo com a NBR 12.209/2011, o percentual destes gases no biogás é de, aproximadamente, 65% de metano e 27% de dióxido de carbono. Com base nesses percentuais de concentrações, foi estimada a produção do  $CH_4$  e  $CO_2$ , em kg/ano, por meio das equações (1) e (2), respectivamente. Esses cálculos foram feitos com base no balanço de massa e foi considerado que o volume do gás é de 0,02271 m<sup>3</sup>/mol nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTTP) e que o valor de massa molar do metano é de 0,016 kg/mol e a do dióxido de carbono é de 0,044 kg/mol.

$$CH_{4volume} = \frac{P_{total} * 65\% * 365 \text{ dias} * MM_{CH_4}}{Vol_{gás}} \quad (1)$$

$$CO_{2volume} = \frac{P_{total} * 27\% * 365 \text{ dias} * MM_{CO_2}}{Vol_{gás}} \quad (2)$$

Onde:

$CH_{4volume}$  = produção do gás metano, em kg/ano;

$CO_{2volume}$  = produção do gás dióxido de carbono, em kg/ano;

$P_{total}$  = produção total de biogás, em m<sup>3</sup>/dia;

$MM_{CH_4}$  = massa molar do metano, em kg/mol;

$MM_{CO_2}$  = massa molar do dióxido de carbono, em kg/mol;

$Vol_{gás}$  = volume do gás nas condições CNTTP, em m<sup>3</sup>/mol.

### 4.3.3 Estimativa das emissões de $CO_2$ e $CH_4$ segundo metodologia pelo EPA

Segundo a EPA (*Environmental Protection Agency*, 2010), sistemas de tratamento anaeróbios produzem tanto  $CO_2$  quanto  $CH_4$ . Seguindo a metodologia estabelecida pela EPA, foram calculadas as emissões de GEE desses gases para os volumes resultantes de  $CO_2$  e  $CH_4$  no biogás, utilizando as equações (3) e (4).

$$CO_2 = 10^{-6} \times Q_w \times OD \times Eff_{OD} \times CF_{CO_2} \times [(1 - MCF_w \times BG_{CH_4})(1 - \lambda)] \quad (3)$$

$$CH_4 = 10^{-6} \times Q_w \times OD \times Eff_{OD} \times CF_{CH_4} \times [(MCF_w \times BG_{CH_4})(1 - \lambda)] \quad (4)$$

Onde:

$CO_2$  = taxa de emissão de  $CO_2$ , em mg/h;

$CH_4$  = taxa de emissão de  $CH_4$ , em mg/h;

$10^{-6}$  = unidades de fator de conversão, em mg/g;

$Q_w$  = vazão de esgoto afluente, em  $m^3/h$

$OD$  = demanda de oxigênio dos esgotos afluentes à unidade de tratamento biológico, ou seja, concentração de DBO no lodo do esgoto, em mg/L ou  $g/m^3$ ;

$Eff_{OD}$  = eficiência de remoção de DBO na unidade de tratamento biológico;

$CF_{CO_2}$  = fator de conversão para a geração máxima de  $CO_2$  por demanda de oxigênio ( $44/32 = 1,375g CO_2/g$  demanda de oxigênio);

$CF_{CH_4}$  = fator de conversão para a geração máxima de  $CH_4$  por demanda de oxigênio ( $16/32 = 0,5 g CH_4/g$  demanda de oxigênio);

$MCF_w$  = fator de correção de metano para o lodo do digestor (indica a fração da demanda de oxigênio que é digerida no digestor por processo anaeróbio);

$BG_{CH_4}$  = fração de carbono na forma de  $CH_4$  no biogás gerado;

$\lambda$  = rendimento de biomassa (g de carbono convertido em biomassa/ g de carbono consumido no efluente no processo de tratamento);

Na digestão anaeróbia do lodo, os parâmetros utilizados de  $BG_{CH_4}$  e  $MCF_w$  são de 0,65 e 0,80 respectivamente, conforme recomendado pela EPA (2010). Ainda seguindo a recomendação da EPA (2010), para a concentração de DBO ( $OD$ ), foi adotado o valor de 500mg/L; para eficiência de remoção de DBO no tratamento ( $Eff_{OD}$ ), foi utilizado o valor de 95%; e para rendimento de biomassa ( $\lambda$ ), foi utilizado o valor padrão igual a 0,65. Segundo Embrapa (2018), a produção média diária de dejetos ( $Q_w$ ) para suínos em terminação é de 10 litros.animal<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup>, neste caso, 5m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> pela capacidade de 12.000 suínos.

#### 4.3.4 Determinação do $CO_2$ equivalente segundo metodologia situada no EPA

Para determinar os impactos das emissões de GEE de diferentes tipos de gases, é preciso utilizar uma métrica comum para somá-los e compará-los. Conforme EPA (2010), a métrica usual é a do potencial de aquecimento global (Global Warming Potential – GWP). O GWP mede quanto da emissão de uma tonelada de um determinado gás será

absorvido em um período de tempo, relativo à emissão de uma tonelada de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>equivalente).

Geralmente, o período de tempo usado é de 100 anos. Desta forma, quanto maior o GWP, maior sua contribuição para o aquecimento da Terra. A Tabela 8 apresenta os valores para os gases CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> que compõem, em maior parte, o biogás proveniente de processos anaeróbios. Por definição, o CO<sub>2</sub> tem GWP de 1 por ser o gás de referência.

**Tabela 8. Valor correspondente para o GWP dos gases CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>**

Gás	Símbolo	GWP
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	1
Metano	CH <sub>4</sub>	21

Fonte: EPA (2010).

O cálculo para estimar o dióxido de carbono equivalente, conforme EPA (2010), é o mostrado na equação (5).

$$CO_{2eq} = \sum_{i=1}^n GHGi \times GWPi \quad (5)$$

Onde:

CO<sub>2eq</sub> = emissões em equivalentes de dióxido de carbono, em toneladas por ano;

GHGi = emissões por cada GEE, em toneladas por ano;

GWPi = GWP do respectivo GEE (Tabela 4);

n = número de GEE emitidos a partir da fonte.

## 4.4 Resultados e discussão

### 4.4.1 Quantitativos estimados da geração de gases CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> e emissões de CO<sub>2</sub> equivalentes

A partir dos resultados encontrados para a geração de biogás, foi possível estimar a produção de CH<sub>4</sub> e de CO<sub>2</sub>. A tabela (9) apresenta as estimativas da geração anual em kg/ano de CH<sub>4</sub> e de CO<sub>2</sub>. Neste caso, a produção de CO<sub>2</sub> será maior devido a massa molar ser superior em comparação ao CH<sub>4</sub> na composição do biogás.

**Tabela 9. Valores estimados da geração anual de CH<sub>4</sub> e de CO<sub>2</sub> a partir do biogás produzido. Fonte: Autor.**

Produção de Biogás m <sup>3</sup> /dia	Produção de CH <sub>4</sub> kg/ano	Produção de CO <sub>2</sub> kg/ano
772,20	129.073,69	147.441,87

Foram estimadas as emissões de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, seguindo a metodologia estabelecida pelo EPA (2010). Os resultados encontrados nas emissões de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> estão reunidos na Tabela 10.

**Tabela 10. Valores estimados da geração anual de CH<sub>4</sub> e de CO<sub>2</sub> a partir do biogás produzido pelos biodigestores. Fonte: Autor.**

Emissões de CO <sub>2</sub> kg/ano	Emissões de CO <sub>2</sub> ton/ano	Emissões de CH <sub>4</sub> kg/ano	Emissões de CH <sub>4</sub> ton/ano
1.163.096,756	1.163,097	458.189,631	458,190

Seguindo a metodologia estabelecida pelo EPA, foram multiplicados os valores de GWP correspondentes, cujos resultados estão apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11. Valores estimados e convertidos a unidade comum de CO<sub>2</sub> equivalente. Fonte: Autor.**

Emissões de CO <sub>2</sub> eq para CO <sub>2</sub> ton CO <sub>2</sub> eq/ano	Emissões de CO <sub>2</sub> eq para CH <sub>4</sub> ton CO <sub>2</sub> eq/ano	Emissão Total ton CO <sub>2</sub> eq/ano
1.163,097	9.621,982	10.785,079

Dados de CO<sub>2</sub> equivalente de 2014 do relatório do MCTI (2016) mostram que as emissões de GEE do tratamento de resíduos orgânicos, de que fazem parte as ETEs, contribuem com cerca de 5% das emissões brasileiras. Comparadas às emissões de outros setores no Brasil, as emissões da ETE não representam uma quantidade expressiva. Dados da Tabela 12 mostram um comparativo das emissões por setores. Apesar de o valor de emissão de GEE no tratamento de resíduos não ser muito significativo, se considerarmos os dados do MCTI de 2016, as contribuições de CO<sub>2</sub> equivalente aumentaram, em 2014, em 16%, quando comparadas às emissões do ano de 2010.

Admitindo que esse incremento da emissão dos GEEs produzida pelo tratamento de resíduos sólidos tenha sido causado pelo aumento da população brasileira, pode-se concluir que sua participação tenderá a aumentar.

**Tabela 12. Emissões em CO<sub>2</sub> equivalente por setor no ano de 2014.**

Setor	Gg CO <sub>2</sub> eq	%
Energia	469.832	37
Processos industriais	94.263	7
Agropecuária	424.473	33
Mudança de uso da terra e florestas	233.140	18
Tratamento de resíduos	62.787	5
Total emissões	1.284.495	100

Fonte: Adaptado de MCTI (2016). Gg = milhares de toneladas

Na situação avaliada, deixariam de serem lançados 10.785,079 t CO<sub>2</sub>eq/ano para a atmosfera, o que mostra que o aproveitamento do biogás pode ser considerado um grande benefício ambiental para a questão do aquecimento global. Este índice equivale a 12,693 hectares de florestas (EPA, 2018). Um estudo de Santos (2016) avaliou os créditos



provenientes de uma Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) com potencial de geração de 540.000 tCO<sub>2</sub>eq para 300.000 habitantes. Os resultados demonstraram que a consideração de créditos de carbono (mesmo com um valor baixo por tonelada [0,5 US\$ / tCO<sub>2</sub>]) permitiria um preço de venda de energia reduzido de 6,2 [US\$ / MWh], sem prejudicar a lucratividade. Isso mostra como o mercado de créditos de carbono pode ajudar a viabilidade econômica de projetos de bioenergia.

#### 4.4.2 Mercados de Carbono - Análise de Viabilidade

Existem atualmente uma variedade de referências de preços, formas de comercialização e maneiras de contratação no mercado de carbono para venda e compra de sua moeda: os Certificados de Emissão Reduzida (CER). Estes certificados são organizados tanto nos moldes do mercado “oficial” quanto no mercado voluntário, em que compradores não qualificados mostram interesse na aquisição dos créditos.

A oferta e a demanda são encontradas sob diferentes maneiras: através de flexíveis acordos bilaterais - negociação de balcão - entre as partes (instituições financeiras, comercializadoras independentes, empresas privadas, entidades jurídicas federais e municipais, entre outras); e através de negociações em bolsas internacionais por meio de contratos futuros de opções e à vista.

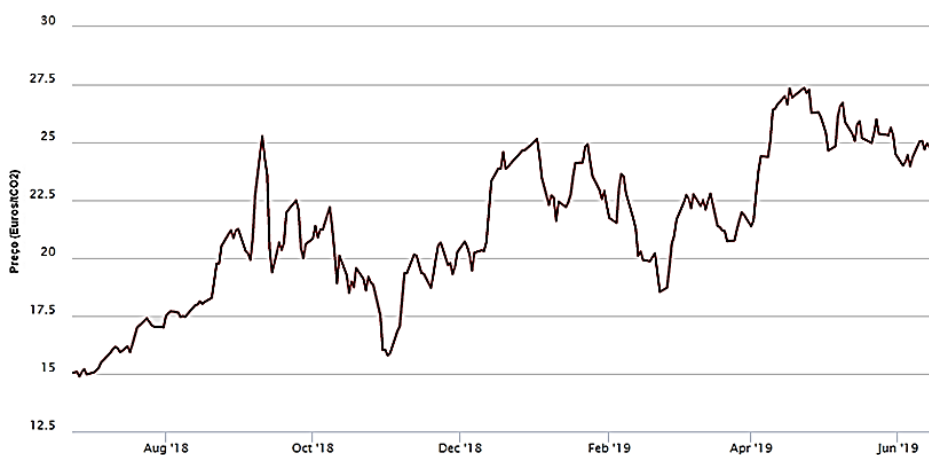


Figura 7. Preço de contratos futuros EEX EUA. Fonte: adaptado de EEX, 2019.

Existindo diferentes custos de abatimento de GEE, passam a existir incentivos econômicos para que empresas comecem a oferecer este tipo de serviço, denominado comércio de emissões (*emissions trade*). Cria-se, portanto, um valor de mercado para o carbono. O Banco Mundial, citado no BNDES & MCT (1999), estima que o valor de

mercado dos CER de gases de efeito estufa estará entre US\$ 5 e US\$ 15 por tonelada de carbono reduzida. O nível de incerteza do mercado é bem ilustrado na Figura 7, mostrando a volatilidade dos preços desde junho de 2018 na bolsa EEX EUA.

A Compensação de Carbono representa uma redução das emissões de gases de efeito estufa pela compra de créditos de carbono ou financiamento de projetos exteriores às atividades de uma empresa, indústria ou país (BOARD, 2006). Considerando uma margem de custos de certificação MDL de US\$ 40.000 a US\$ 130.000 para comercialização de toneladas de CO<sub>2</sub> nas bolsas, proposta por Amaral (2007), preço atual da US\$ 27.76 t/CO<sub>2</sub> (EEX, 2019), uma taxa média de comercialização anual de CER em 9%, além da receita do gerador a biogás pela cogeração de energia, teríamos uma receita extra anual pela comercialização destes créditos de carbono considerando a geração anual de biogás das granjas de 281.640 m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup> ou 202.780 kg.ano<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub>.

Com a instalação dos sistemas fotovoltaicos para todas as granjas da Fazenda Talhado, pode-se obter uma redução de 20,534 toneladas de carbono por ano, considerando um fator de emissão de 81 g CO<sub>2</sub>eq/kWh (IEA, 2012; PVSyst, 2018) e que o dimensionamento do sistema híbrido para atender a todas as granjas tenha resultado em uma potência instalada de 168,3kWp solar e de 75kW em geração a biogás. A Tabela 13 apresenta as reduções de CO<sub>2</sub> evitadas e as rentabilidades com a implantação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede e ao gerador a biogás para o complexo agropecuário.

**Tabela 13. Impactos ambientais com a instalação de sistemas híbrido para a Fazenda Talhado. Fonte: Autor.**

<b>Descrição dos índices e custos de projeto</b>	<b>Rentabilidade das emissões</b>
Emissões de CO <sub>2</sub> evitadas (toneladas/ano) – Fotovoltaico	20,534 ton
Emissões de CO <sub>2</sub> evitadas (toneladas/ano) – Biogás	10.785,079 ton
Custos de Implantação de Biodigestores	US\$ 481.673,75
Custos para implantação de Gerador a Biogás de 75kW	US\$ 65.452,13
Rentabilidade Anual pela Comercialização de tCO <sub>2</sub>	US\$ 272.448,35
Rentabilidade Anual pela Geração Distribuída de Energia	US\$ 85.990,00
Payback estimado nos cenários MDL	1,64 a 1,89 anos

#### 4.5 Conclusões

Os projetos de MDL, dentro do que se propõe, têm potencial para constituir uma das ferramentas mais importantes e viáveis na contenção da emissão dos gases de efeito estufa. Contudo, para que haja maior difusão deste mecanismo, alguns obstáculos precisam ser transpostos, entre os quais estão: a adequação dos projetos ao disposto na

legislação ambiental de licenciamento e, a elaboração de projetos que tenham transparência e credibilidade verificável. Este último ponto é uma das principais características para que sejam negociadas nos ambientes de Bolsa, de forma a atender à necessária liquidez de negociação e ao adimplemento de contratos, condições asseguradas pelos ambientes versáteis.

O biogás tem despertado diversas iniciativas de fomento pelo mundo, com ênfase em países como Alemanha e EUA, isso em razão das crescentes preocupações ambientais para acelerar as substituições dos combustíveis fósseis e melhorar as alternativas de tratamento de resíduos orgânicos.

Em 2016, o Brasil tinha capacidade instalada de geração de energia a partir do biogás de 120MW, esse número é seis vezes maior que o registrado em 2007, sendo que o biogás gerado a partir de resíduos urbanos representa 95% do valor apresentado, deixando claro que a energia obtida de resíduos urbanos deve continuar em ascensão.

Com o desenvolvimento tecnológico de tratores e caminhões movidos a gás, abre-se excelente oportunidade para substituição gradativa do diesel pelo biogás, o que evidencia que o biogás não se limita à geração de energia renovável. Esse fato é de grande importância no âmbito da sustentabilidade ambiental, visto que, com essa possível substituição, haverá também contribuição para redução das emissões de CO<sub>2</sub>. Entretanto é de extrema relevância que haja políticas públicas de incentivo ao consumo do produto, além também dos estímulos de desenvolvimento do biogás, para que esse potencial seja aproveitado.

É importante ressaltar que a análise apresentada foi feita sob perspectivas nacionais, entretanto um estudo adicional poderia acrescentar algo a respeito dos impactos globais sobre as Políticas da GD, tais como os tratados internacionais e a pressão pela utilização de tecnologias de eletricidade ambientalmente amigáveis e redução de emissões de GEE, além também das perspectivas sobre as mudanças de preços dos combustíveis fósseis, entre outras. Outras análises também poderiam incluir informações sobre os aspectos aplicados no Brasil que poderiam ser explorados em outros países no sentido de uma metodologia adequada para avaliar as opções apropriadas da DG de maneira ampla.

O mercado de carbono, particularmente o MDL, por si só não irá resolver a questão do aquecimento global, tampouco muito dos problemas ambientais e sociais brasileiros ou do planeta, mas representa uma importante fonte de divisas e de

oportunidades que podem e devem ser exploradas. Vários projetos vêm sendo propostos e negociados. Contudo, ainda há muito a aprimorar e consolidar no ambiente político-econômico e institucional, de forma a elevar a competitividade dos projetos brasileiros de mitigação do efeito estufa, pelo aumento de sua credibilidade, redução dos custos de transação e tramitação apropriada e ágil dos projetos MDL.

Segundo Milanez (2018), as principais barreiras à realização do potencial do biogás no país incluem:

- Mercado com pequena relevância e previsibilidade;
- Inconsistências entre os marcos regulatórios estaduais e federal;
- Diversidade de substratos, com grande variedade regional;
- Custo dos equipamentos para biodigestão e acesso a financiamentos para sua realização; e
- Desconhecimento dos benefícios do produto e das condições de viabilidade técnico-econômica do investimento em biogás.

Dessa forma, as propostas de política devem contemplar:

- Aperfeiçoamento dos marcos regulatórios, incentivando a inserção do biogás na matriz energética nacional;
- Avanços na geração distribuída de modo a alavancar o desenvolvimento regional;
- Incentivos à aquisição de biodigestores;
- Diversificação dos riscos bem como do conjunto dos investidores em produto com mínima exposição cambial; e
- Estudos independentes que avaliem a viabilidade técnico-econômica de diferentes modelos de produção de biogás.

#### **4.6 Referências Bibliográficas**

**ABISOLO – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE TECNOLOGIA EM NUTRIÇÃO VEGETAL.** Anuário brasileiro de tecnologia em nutrição vegetal. 2016. Disponível em: <<http://abisolo.com.br/anuario-edicoesanteriores/>>. Acesso em: 5 fev. 2019.

**AGCERT. Projeto de Mitigação GHG AWMS BR05-B-03, Brasil. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo UNFCCC.** Documento de Design do Projeto. 2005.

**AMARAL, P. C., Créditos de carbono e suinocultura brasileira: Situação atual e possibilidades advindas do mecanismo de desenvolvimento limpo.** Dissertação

(Graduação em Engenharia Agrônômica). 53p. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista. Jaboticabal, 2007.

Amponsah, N. Y., Troldborg, M., Kington, B., Aalders, I., & Hough, R. L. (2014). **Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of lifecycle considerations**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 461-475.

ANEEL, **Banco de Informações de Geração (2019)**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>> Acesso em: 07 jun. de 2019.

Asdrubali, F., Baldinelli, G., D'Alessandro, F., & Scrucca, F. (2015). **Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1113-1122.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.209 **Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro, 2011.

AZENHA, M., 2010. **A energia hidrelétrica não é limpa, nem barata**. IEE-USP. Disponível em: <<https://www.viomundo.com.br/entrevistas/bermann-a-energia-hidreletrica-nao-e-limpa-nem-barata.html>>. Acesso em: 18 ago. de 2019.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES; MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA – MCT. **Efeito estufa e a convenção sobre mudança no clima**. Rio de Janeiro: BNDES, Departamento de Relações Institucionais, 1999. 38p.

Bertasiene, A., Borg, R. P., & Azzopardi, B. (2015). **A review of Life Cycle Impact Analysis of Wind Turbines. Trends and Challenges for Wind Energy Harvesting**.

BOARD, C. E. **Consolidated baseline methodology for grid-connected electricity generation from renewable sources**. UNFCCC ACM0002/Version, v. 1, 2006.

BOLSA DE MERCADORIAS & FUTUROS E BOVESPA – BM&FBOVESPA. **Mecanismo de desenvolvimento limpo**. Disponível em: <<http://www.bmfbovespa.com.br/>>. Acesso em: 07 jul. 2019.

BRASIL.Ministério da ciência, tecnologia e inovação (MCTI). **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 3ª. Edição, 2016.

**Ecoinvent Database Report**. LCA factors for emissions from biogas (2015). Disponível em: <<http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-33/ecoinvent-33.html>> Acesso em: 07 jun. de 2019.

**Empresa de Pesquisa Energética (EPE)**. Balanço Energético Nacional 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>. Acesso em: 07 jun. 2019.

**European Emission Allowances (EUA) – EEX.** Disponível em: <<https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/spot-market/european-emission-allowances>> Acesso em: 18/06/2019.

FARIA, Priscila Vieira de. COELHO, José Luiz. **Créditos de Carbono no Brasil: Mecanismos Existentes, Implementação e Negociação na Bolsa de Mercadorias e Futuros.** Monografia (Especialização). Curso de Gestão Ambiental e Negócios do Setor Energético, Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, 2007.

Ferreira LR, Otto RB, Silva FP, De Souza SNM, De Souza SS, Ando Junior OH. **Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil.** *Renew Sustain Energy Rev* 2018;94:440–55.

GUIGAND, N.; LAGADEC, S.; ROBIN, P.; HASSOUNA, M.; 2011. **Mise au point d'une méthode de mesure simplifiée des émissions d'ammoniac et des gaz à effet de serre des bâtiments d'élevage de porcs en engraissement.** In: Journées de la Recherche Porcine, 43, Paris, France, Actes..., Paris, France, 199-203.

GUINGAND, N.; QUINIOU, N.; COURBOULAY, V.; 2010. **Emissions comparées d'ammoniac et de gaz à effet de serre par des porcs charcutiers élevés au froid sur caillebotis partiel ou à la thermoneutralité sur caillebotis intégral.** In: Journées de la Recherche Porcine, 42, Paris, France. Actes..., Paris, France: 277-284.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa da Pecuária Municipal.** 2016. Disponível em: <[https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/84/ppm\\_2016\\_v44\\_br.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/84/ppm_2016_v44_br.pdf)>. Acesso em: 16 fev. 2018.

International Energy Agency (IEA), ' **CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion HIGHLIGHTS**', OECD/IEA, 2012

International Renewable Energy Agency, **Renewable capacity statistics; 2016.**

IPCC Guidelines for Inventories. [Chapter 10]. **Emissions from Livestock and manure management; 2006**

IPCC, 2007: The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “**2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**”, volume 2 (Energy), April 2007. KAMMEM, D. A.; PACCA, S. **Assessing the costs of electricity.** *Annual Review of Environment Resources*, v. 29, p. 301-344, 2004.

LOURENÇO, T.M.F. **Emissão de Gases de Efeito Estufa na produção de energia elétrica gerada por usinas hidroelétricas, eólicas e termoelétricas no Brasil 2016.** 89f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

Mambeli Barros R, Tiago Filho GL, da Silva TR. **The electric energy potential of landfill biogas in Brazil.** *Energy Policy* 2014;65:150–64. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.028>.

MIRANDA, M. M. **Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida**. 162p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

MILANEZ, Artur Yabe et al. **Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 47, p. [221]-275, mar. 2018. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/15384>

Kaparaju, P., Rintala. J., **Mitigation of greenhouse gas emissions by adopting anaerobic digestion technology on dairy, sow and pig farms in Finland**. Renewable Energy 36 (2011), p. 31-41. Available from doi:10.1016/j.renene.2010.05.016.

PEREIRA, E. R. et al. **Biodigestores: tecnologia para manejo de efluentes da pecuária. São Paulo, 2009**. Disponível em: <<http://www.iz.sp.gov.br/pdfs/1255981651.pdf>>. Acesso em: 1 nov. 2017.

PVSYST SA. **Portal do Software PVsyst**. 2018. Disponível em: <<http://www.pvsyst.com/en/>>. Acesso em: 23 jun. 2019.

REN21. Renewables 2015 **Global Status Report, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century; 2015**. (<[http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015\\_Onlinebook\\_low1.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf)>). [Accessed 12 June 2018].

ROBIN, P. et al.; 2010. **Reference procedures for the measurement of gaseous emissions from livestock houses and storages of animal manure**. Final Report, ADEME, Paris, France: 260 p.

SALEH, B. B., **Determinação das emissões de metano (CH<sub>4</sub>) em lagoas de estabilização de dejetos de suínos na região de Rio Verde-GO**. Tese (doutorado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós- Graduação em Fitotecnia, 2014.

Santos, I. F. S.; Vieira, N. B. D.; Barros, R. M. ; Tiago Filho, G. L. ; Soares, D. M. ; Alves, L. V. **Economic and CO<sub>2</sub> avoided emissions analysis of WWTP biogas recovery and its use in a small power plant in Brazil**. Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 17, p. 77-84, 2016.

Santos, Ivan Felipe Silva Dos; Barros, Regina Mambeli; Tiago Filho, Geraldo Lucio. **Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential**. Journal of Cleaner Production, v. 126, p. 504-514, 2016.

TAVARES, Jorge Manoel R. **Modelagem do consumo de água, produção de dejetos e emissão de gases de efeito estufa e amônia na suinocultura**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2016. 229p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: EPE 2016.

U.S. Environmental protection agency (EPA). **Greenhouse gas emissions estimation methodologies for biogenic emissions from selected source categories: solid waste disposal wastewater treatment ethanol fermentation**, 2010.

U.S. **GEOLOGICAL SURVEY (USGS)**. **Hydroelectric power water use: Hydropower and the Environment**. Howard Perlman (Org) **ESTADOS UNIDOS**. 2016. Disponível em: <<http://water.usgs.gov/edu/wuhy.html>>. Acesso em: 07 nov. 2016.

UNESA. **Metodología para la implementación de los mecanismos flexibles de Kioto: mecanismo de desarrollo limpio en Latinoamérica**. 2005. Disponível em: <<http://www.unesa.es/>>. Acesso em: 22 mai. 2010.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC. **Approved baseline and monitoring methodologies**. Disponível em: <<http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/approved.html>>. Acesso em: 12 jun. 2019.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Foreign Agricultural Service. Livestock and poultry: world markets and trade. Out. 2017**. Disponível em: <<http://usda.mannlib.cornell.edu/MannUsda/viewDocumentInfo.do?documentID=1488>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

WEISSER, D. **A guide to life-cycle greenhouse gases (GHG) emissions from electric supply technologies**. Energy, v. 32, p. 1543-1559, 2007.

**Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil** / Jessica Yuki de Lima Mito ... [et al.]. - Concórdia : Embrapa Suínos e Aves, 2018. 52 p.; 21 cm. (Documentos / Embrapa Suínos e Aves, ISSN 01016245; 196).



## 5. CONCLUSÃO GERAL

Além dos aspectos econômicos, a utilização do biogás tem impactos ambientais e sociais. A geração distribuída com o biogás da suinocultura e complementar de solar, além de suprir a energia da propriedade, pode desempenhar papel importante para o conjunto do Sistema Interligado Nacional e incentivar políticas energéticas nacionais.

Por meio das análises dos resultados, foi possível observar que, com uma quantidade de 12.000 animais alojados, a propriedade tem uma produção de 772,20 m<sup>3</sup>.dia<sup>-1</sup> de biogás, gerando 1.689,71 kWh.dia<sup>-1</sup> em 11,26 horas diárias de operação do grupo motor gerador. A qualidade do biogás manteve-se, de maneira geral, bem constante ao longo do tempo, tendo um valor médio de 68% de concentração de CH<sub>4</sub>.

Em relação à emissão de CO<sub>2</sub>eq atual nas granjas de terminação em estudo na região de Rio Verde-GO, foram obtidos 10.785,079 t CO<sub>2</sub>eq ano<sup>-1</sup>. Para as condições específicas da granja em estudo, chegou-se a um valor de emissão de metano para as granjas em terminação, nas condições da região, de 281.640 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup>, ou seja, um potencial de energia para cogeração e/ ou créditos de carbono de US\$ 272.448,35 ano<sup>-1</sup>.

Enfim, conclui-se que a produção de eletricidade a partir do biogás e solar na propriedade estudada é viável, levando em consideração que o custo para geração de energia é de 0,077 US\$.kWh<sup>-1</sup> e o valor pago pela venda do excedente é de 0,12 US\$.kWh<sup>-1</sup>, atingindo um valor de Payback de 6,36 anos para o sistema híbrido, além da possível comercialização dos créditos de carbono, que pode aumentar a viabilidade.

Há uma grande capacidade instalada de produção de biogás nas granjas suinícolas da região, portanto, com também possibilidade de oferta de energia gerada por meio da queima do CH<sub>4</sub> em geradores movidos pelo gás. Porém o grande gargalo está justamente na produção pulverizada de biogás por toda a área dos municípios no entorno de Rio Verde-GO bem como na falta de informação técnica sobre estas tecnologias para mensurar as reais viabilidades e a rentabilidades dos projetos GD a biogás.

Podem-se salientar, como contribuições efetivas deste trabalho, a simulação e a otimização de um modelo realístico para representar as variáveis aleatórias radiação solar,

volume de biomassa e eficiência energética, considerando diversos cenários de sensibilidade no HOMER; a estimativa de uma métrica de geração de biogás para região de Rio Verde ( $0,064 \text{ m}^3 \cdot \text{suíno}^{-1} \cdot \text{dia}$ ), cuja informação não era conhecida; o detalhamento dos índices de poluição referentes à geração distribuída a biogás e suas vantagens com relação à comercialização dos créditos de carbono; a criação de um informativo técnico com detalhamento de custos das tecnologias, metodologias de cálculo para produtores rurais e profissionais da área colaborando com projetos renováveis; a incorporação de todos os possíveis parâmetros econômicos associados ao dimensionamento, inclusive dados referentes a subsídios, prazos e taxas de financiamento, períodos de carência para o início do pagamento etc.; a criação de histórico anual de geração de energia a biogás e fotovoltaico para estudos futuros; e a confirmação da viabilidade do sistema híbrido biogás-solar (1~2 anos de Payback) se comparado a outras fontes convencionais considerando os CER. São apresentados também gráficos e tabelas referentes ao balanço energético calculado.

Em síntese, o modelo desenvolvido representa uma nova concepção para o dimensionamento de fontes energéticas híbridas, com resultados robustos e confiáveis. Além disso, os projetos renováveis contribuem com a redução dos impactos ambientais, incentivam criação de empregos e desenvolvimento socioeconômico na região.

Tendo como referência as experiências acumuladas e as dificuldades ainda não solucionadas, são propostos os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Analisar os benefícios energéticos e econômicos resultantes da fertirrigação com o biofertilizante, de modo a avaliar o desempenho do modo circular de produção por completo ou comercialização do produto para aumento da viabilidade;
- Considerar a possibilidade de comercialização do excedente energético para outras propriedades ou comunidades rurais, atuando como produtor independente de energia;
- Estudos de tecnologias de biodigestão anaeróbica na construção de biodigestores com os seguintes controles de: a) Temperatura; b) Agitação; c) Bactérias.
- Estudos para purificação do biogás também são sugeridos, principalmente na adoção de filtros de remoção de  $\text{H}_2\text{S}$  e de sistemas de remoção de  $\text{CO}_2$ ; e
- Investigar os impactos positivos e negativos na análise técnica e econômica das taxações de crédito de carbono;