MODELO DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE BIODIGESTORES

KELLY CHRISTINA GUTTERRES DE SOUZA

CAMPO GRANDE
2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELO DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE BIODIGESTORES

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

KELLY CHRISTINA GUTTERRES DE SOUZA

Campo Grande, junho de 2010.

MODELO DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE BIODIGESTORES

Kelly Christina Gutterres de Souza

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Energia, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.’

_____

Jéferson Meneguin Ortega, Dr.
Orientador

_____

Luciana Cambraia Leite, Dra.
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

_____

Jéferson Meneguin Ortega, Dr.
Presidente

_____

Paulo Irineu Koltermann, Dr.

_____

Eduardo Mirko Valenzuela Turdera, Dr.

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus exemplos de vida, Jânio Pereira de Souza e Rosa Dely Gutterres de Souza. Estas duas pessoas com muita sabedoria, discernimento, bom senso e dedicação estiveram ao meu lado me encorajando nas horas difíceis e me aplaudindo nos momentos de glória. Obrigada por serem meus pais, fonte de inspiração, apoio e ensino diário.

AGRADECIMENTOS

"A cada vitória o reconhecimento devido ao meu Deus, pois só Ele é digno de toda honra, glória e louvor". Senhor, obrigada pelo cumprimento de mais essa etapa em minha vida.

À minha família, meus pais Jânio e Rosa e ao meu irmão Cleones, os mais profundos agradecimentos por suas sábias lições de esperança; que infundiram-me a confiança necessária para realizar os meus sonhos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jeferson Meneguin Ortega, paciente e organizador dos meus pensamentos desconexos, que sempre demonstrou acreditar em meu potencial, cujo conhecimento e apoio técnico foram imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Aos proprietários e funcionários da Fazenda Rancho Alegre por terem disponibilizado a granja para a realização deste estudo.

Aos demais colegas de mestrado, em especial Me. Márcia Ferreira Cristaldo, Sibelis Aparecida e Jonathan Aldorí que tanto me auxiliaram, me ouviram e trocaram idéias que muito contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos de longa data, em especial Rafael Nishimura e Susana Guimarães que foram além do apoio técnico, me apoiando nos momentos difíceis e me incentivando a nunca desistir.

Aos meus colegas de serviço, Sr° Marco Antônio, Luíza Maura, Rosângela Cristiane, Evelyn Cavalcante, Roberto Lobato e Elizete Souza, que foram pacientes e me apoiaram para concretização deste objetivo.

E finalmente, agradeço ao meu noivo Ricardo Ovelar, por sua extensa paciência, pelo seu amor, por sempre estar disposto a me ajudar em qualquer situação e principalmente pelo seu apoio, que me conforta e me deixa mais forte para superar os desafios diários que a vida impõe.

Resumo da Dissertação apresentada à UFMS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

MODELO DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE BIODIGESTORES

Kelly Christina Gutterres de Souza

Junho/2010

Orientador: Jéferson Meneguin Ortega, Dr.
Área de Concentração: Energia.
Palavras-chave: Geração de Energia Elétrica, Biodigestores,Crédito Carbono.
Número de Páginas: 83.

A geração de energia elétrica a partir da utilização de biodigestores tem se apresentado como uma oportunidade crescente do setor de suinocultura, destacando-se a mitigação do impacto ambiental associado ao interesse no financiamento de projetos MDL. Neste contexto, o trabalho tem por objetivo propor o desenvolvimento de um modelo de simulação para analisar a viabilidade da geração de energia elétrica a partir de biodigestores. A metodologia é baseada na técnica de Dinâmica de Sistemas, na qual permite avaliar através de cenários os riscos associados à tomada de decisão. Observa-se que o aplicativo desenvolvido no trabalho é de fundamental importância na tomada de decisão do produtor. Os resultados mostram que o investimento nesta tecnologia para a produção de energia elétrica é altamente atrativa, uma vez que aumentou a renda da propriedade tornando o produtor rural auto-suficiente em energia elétrica e até mesmo um produtor independente comercializando o excedente de sua geração.

Abstract of Dissertation presented to UFMS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

MODEL OF SIMULATION FOR THE ANALYSIS OF VIABILITY OF ENERGY GENERATION TROUGH THE USE OF BIODIGESTORS

Kelly Christina Gutterres de Souza

June/2010

Advisor: Jéferson Meneguin Ortega, Dr.
Area of Concentration: Energy.
Key words: Electricity Generation, Biodigestors, Carbon Credits.
Number of Pages: 83.

The generation of electric energy through the use of biodigestors has been presented as a growing opportunity swine production sector, especially the mitigation of environmental impacts associated with the interest in the financing of projects CDM. In this context, the work has as objective to propose the development of a simulation model to analyze the feasibility of the generation of electric energy from biodigestion systems. The methodology is based on the technique of dynamic systems, which allows to evaluate through scenarios the risks associated with the decision. It is observed that the application developed in the work is of fundamental importance in the decision of the producer. The results show that the investment in this technology for the production of electric energy is highly attractive, since increased the rent of property making the producer rural self-sufficient in electric energy and even an independent producer trading the surplus of its generation.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO..... 1

1.1. Contextualização..... 1

1.2. Justificativa..... 2

1.3. Objetivos 4

1.3.1 Objetivos Gerais 4

1.3.2 Objetivos Específicos 4

1.4. Revisão Bibliográfica..... 4

1.4.1 Produção de biogás..... 5

1.4.2 Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás 6

1.4.3 Sustentabilidade Associada à Suinocultura..... 7

1.4.4 Modelagem a partir de Sistemas Dinâmicos 8

1.5. Organização do Trabalho..... 9

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS..... 11

2.1 Introdução **11**

2.2 Biogás **11**

2.2.1 Histórico do Biogás..... 11

2.3 Biodigestor **12**

2.3.1 Modelo Indiano 13

2.3.2 Modelo Chinês..... 14

2.3.3 Modelo Canadense 16

2.4 Produção de Biogás **18**

2.5 Geração de Energia Elétrica **21**

2.5.1 Comercialização de Energia Elétrica 22

2.6 Aspectos Ambientais **23**

2.6.1 MDL aplicado à suinocultura brasileira 25
2.7 Considerações Finais 26

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA 27

3.1 Introdução 27
3.2 Estrutura do Modelo Proposto 27
3.3 Aspectos de Implementação 28
3.4 Dinâmica de Sistemas 29
3.5 Diagrama de Laço Causal 32
3.6 Diagramas de Estoque e Fluxo 37
3.7 Módulos Propostos 40
3.7.1 Módulo Técnico 40
3.7.2 Módulo Ambiental 46
3.7.3 Modelo Econômico 48
3.7.4 Módulo Tomada de Decisão 55
3.8 Considerações Finais 59

CAPÍTULO 4 – AVALIAÇÃO ECONÔMICA 60

4.1 Introdução 60
4.2 Caracterização da Propriedade Rural 60
4.3 Produção do Biogás 63
4.4 Configuração do Caso Base 64
4.5 Construção dos Cenários 64
4.5.1 Simulação de Referência 65
4.5.2 Análise de Sensibilidade 67
4.6 Considerações Finais 75

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 76

5.1 Introdução 76

5.2 Conclusões 76

5.3 Recomendações para Trabalhos Futuros 77

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:Biodigestor modelo indiano 13

Figura 2: Representação tridimensional em corte do modelo indiano. 14

Figura 3: Biodigestor modelo chinês 15

Figura 4: Representação tridimensional em corte do modelo chinês. 16

Figura 5: Biodigestor modelo canadense. 17

Figura 6: Representação tridimensional em corte do modelo canadense 18

Figura 7: Constituição do biogás. 19

Figura 8: Estrutura do modelo para análise de viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás. 27

Figura 9: Fluxo de influência 32

Figura 10: Avaliação de geração de energia elétrica através do uso de biodigestores. 34

Figura 11: Avaliação de geração de energia elétrica enfocando o investimento na capacidade do biodigestor. 35

Figura 12: Avaliação de geração de energia elétrica enfocando o investimento de tecnologia. 36

Figura 13: Diagrama de estoque e fluxo da produção de biogás. 42

Figura 14: Relação entre a Potência do Grupo Gerador e seu consumo de biogás. 44

Figura 15: Diagrama de estoque e fluxo da geração de energia elétrica na propriedade a partir do gerador à biogás. 45

Figura 16: Diagrama de estoque e fluxo da modelagem ambiental. 48

Figura 17: Modelagem do Fluxo de Caixa da Propriedade. 50

Figura 18: Diagrama de Estoque e Fluxo da Receita de Geração de Energia Elétrica. 52

Figura 19: Diagrama de Estoque e Fluxo da Receita de Crédito Carbono..... 53

Figura 20: Diagrama de Estoque e Fluxo do Investimento no Empreendimento. 55

Figura 21: Biodigestores modelo canadense 61

Figura 22: *Flare* (queimador) utilizado para queimar o biogás excedente..... 61

Figura 23: Valor do Grupo Gerador em R$/kW. 62

Figura 24: Diagrama esquemático de funcionamento dos sistemas de produção de biogás, biofertilizante e energia elétrica. 63

Figura 25: Simulação do empreendimento financiado 65

Figura 26: Simulação do empreendimento não financiado. 66

Figura 27:Simulação do empreendimento com comercialização de Energia Elétrica. 68

Figura 28: Geração de EE com utilização de dois grupo geradores de mesma potência. 69

Figura 29: Comparativo do investimento em um Grupo Gerador de 112 kVA e dois Grupos Geradores de 56 kVA 71

Figura 30: Geração com utilização de dois grupos geradores de mesma potência considerando a comercialização de Energia Elétrica Excedente. 72

Figura 31: Comparativo do investimento em um Grupo Gerador de 112 kVA e dois Grupos Geradores de 56 kVA considerando a comercialização de EE. 73

Figura 32: Comparativo do investimento em um Grupo Gerador de 112 kVA e um Grupo Gerador de 56 kVA mais um Grupo Gerador de 56 kVA após três anos do investimento inicial. 75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Símbolos de representação dos diagramas de estoque e fluxo. 39

Tabela 2: Variáveis do DEF da produção de biogás. 43

Tabela 3: Variáveis do DEF da Geração de Energia Elétrica..... 46

Tabela 4: Variáveis do DEF da modelagem ambiental 48

Tabela 5: Variáveis do DEF do Fluxo de Caixa da Propriedade 51

Tabela 6: Variáveis de DEF da Receita de Geração de Energia Elétrica..... 52

Tabela 7: Variáveis de DEF da Receita de Crédito Carbono 54

Tabela 8: Variáveis de DEF do Investimento do Empreendimento. 55

Tabela 9: Resultados obtidos do modelo de simulação para a geração de EE. 67

Tabela 10: Resultados obtidos do modelo de simulação para a geração de EE considerando a comercialização da produção excedente. 69

Tabela 11: Resultados obtidos do modelo de simulação para a geração de EE utilizando dois grupo geradores de mesma potência..... 70

Tabela 12: Resultados do comparativo no investimento em um gerador de 112 kVA e dois geradores de 56 kVA. 71

Tabela 13: Resultados obtidos do modelo de simulação para a geração de EE utilizando dois grupo geradores de mesma potência e considerando a comercialização da produção excedente..... 72

Tabela 14: Resultados do comparativo no investimento em um gerador de 112 kVA e dois geradores de 56 kVA considerando a comercialização de EE. 74

LISTA DE SIGLAS

ACL	Ambiente de Contratação Livre
CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de carbono
DEF	Diagrama de estoque e fluxo
DLC	Diagramas de laço causal
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DS	Dinâmica de Sistemas
EE	Energia elétrica
g	Grama
GD	Geração Distribuída
GEE	Gases de efeito estufa
GWP	Global warming potencial
kg	Quilograma
kV	Quilovolt
kVA	Quilovolt-ampère
kWh	Quilowatt-hora
m	Metro
m^3	Metro cúbico
MDL	Mecanismo de desenvolvimento limpo
mm	Milimetro
MME	Ministério de Minas e Energia
MWh	Megawat-hora
N	Nitrogênio
N_2O	Óxido nitroso
O&M	Operação e manutenção
PBD	Payback Descontado
PCH	Pequena central hidrelétrica
PIB	Produto interno bruto
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
ST	Sólidos totais
SV	Sólidos voláteis
tCO_{2eq}	Tonelada de carbono equivalente
TIR	Taxa interna de retorno
TMA	Taxa minima de atratividade
VPL	Valor presente líquido

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

O Brasil é considerado o país com a quarta maior suinocultura do mundo apresentando um plantel de 36,819 milhões de cabeças de suínos, segundo a Pesquisa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. O abate de suínos no ano de 2008 foi de 28,803 milhões de cabeças, aumento de 5,1% com relação ao ano de 2007, segundo os dados da Pesquisa Trimestral do Abate de Animais. O volume de carne produzido por este abate permite estimar um consumo interno per capita de 14 kg/habitante/ano. No abate de suínos, o Brasil ocupa a quinta posição, ficando atrás da China, União Européia, Estados Unidos e da Rússia. [1]

No Mato Grosso do Sul, a chegada de agroindústrias somada ao crescimento da produção de grãos, principalmente milho e soja, tidos como alimento básico dos suínos, têm estabelecido as condições adequadas para o desenvolvimento da suinocultura no Estado.

Com forte tradição agropecuária, é um dos estados de maior crescimento econômico na Região Centro-Oeste. Entre 1990 e 1998, o estado se desenvolveu a um ritmo 25% mais acelerado que a taxa acumulada de crescimento do Brasil. Nesse período, Mato Grosso do Sul mudou também seu perfil econômico, industrializando-se. Em 1990, a atividade agropecuária correspondia a 24,4% do PIB estadual, enquanto a indústria era responsável por 13%. Em 1998, cada um desses setores tinha participação de 22%. Em 2004, tinham, respectivamente, 20,9% e 19,2% e em 2008, 15,8% e 16,7%.

O rebanho suíno do Estado saltou de 508.813 cabeças, segundo o Censo Agropecuário 95/96 [2] para 957.697 cabeças em 2008 [1], sendo o 16º maior rebanho suíno entre os estados brasileiros. A suinocultura constitui a terceira maior atividade pecuária, ficando atrás apenas da bovinocultura e da avicultura.

Atualmente, o plantel de suínos do Estado está distribuído em aproximadamente 300 propriedades rurais, caracterizando a predominância de

médios e grandes produtores de suínos e constitui-se na terceira maior atividade pecuária do estado, ficando atrás da bovinocultura e da avicultura.

1.2. Justificativa

Apesar de ser uma atividade em expansão no Brasil e no estado do Mato Grosso do Sul, a suinocultura pode contribuir para um dos mais graves problemas ambientais que é a intensificação da emissão dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. A produção de dejetos suínos, até meados da década de 70, não representava um fator muito preocupante, uma vez que a concentração de animais era relativamente pequena e o solo das propriedades suinocultoras tinha capacidade para absorver o volume de dejetos produzidos até aquela data, sendo que parte da produção era utilizada na forma de adubo orgânico. A partir da segunda metade dos anos 70, a produção de suínos aumentou e, conseqüentemente, a de dejetos também. Com isso, além da emissão dos gases de efeito estufa a poluição de determinados mananciais de água aumentou drasticamente. [3]

Existem alternativas viáveis a serem empregadas para evitar que uma massa tão grande de dejetos continue a ser lançada nos mananciais d'água, como por exemplo, a racionalização da alimentação dos animais e a utilização do esterco suíno como biofertilizante nas lavouras, trazendo ganhos econômicos ao produtor rural, sem comprometer a qualidade do solo e do meio ambiente.

No entanto, a utilização de dejetos puros como adubo não pode ultrapassar o limite máximo de absorção do solo da propriedade rural. A racionalização na alimentação dos animais, por outro lado, pode representar um custo que venha a tornar a criação dos animais uma prática inviável para o produtor, pois envolve, por exemplo, a contratação de um nutricionista que elabore a quantidade adequada de nutrientes, sais minerais e outros aspectos da dieta dos suínos [4]. Talvez uma das medidas mais eficazes no combate à poluição dos rios e da emissão dos gases de efeito estufa seja a disseminação da implantação de biodigestores nas propriedades rurais criadoras de suínos.

A aprovação de projetos no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, previsto no Protocolo de Kyoto, que utilizam biodigestores para produção de biogás e geração de energia elétrica, tem gerado um positivo impacto na suinocultura, podendo ainda gerar renda ao produtor, uma vez que estabelece um mercado de compra e venda do "direito de emitir gases de efeito estufa" – os créditos carbonos. Assim, países que poluem mais podem comprar créditos daqueles que conseguiram reduzir suas emissões impostas pelo Protocolo de Kyoto. [5]

Sob outra ótica, a suinocultura é uma atividade caracterizada pelo alto consumo de energia. Portanto, o aproveitamento da energia contida no biogás pode diminuir o custo de produção de suínos e melhorar sua eficiência energética.

Estima-se que a população brasileira de suínos gere dejetos suficientes para se produzir cerca de 4 milhões de m^3/dia de biogás. Esse biogás poderia gerar aproximadamente 2 milhões de kWh de energia elétrica por dia, o que representa 60 milhões de kWh/mês. Admitindo-se um consumo médio mensal de 170 kWh, a energia elétrica produzida a partir da suinocultura brasileira poderia atender mais de 350 mil residências. [6]

Ademais, o produtor rural pode se tornar auto-suficiente em energia elétrica ou até mesmo em um produtor independente, através da comercialização do excedente de sua geração nas várias modalidades que o mercado de energia elétrica oferece.

Dessa forma, pode-se verificar que a suinocultura representa uma importante atividade, com grandes benefícios sociais e econômicos. Consequentemente torna-se primordial sob a ótica do produtor rural o desenvolvimento de ferramentas que permitam a análise da viabilidade da geração de energia a partir da utilização de biodigestores, possibilitando assim avaliar como mudanças em partes do sistema afetam o comportamento do todo.

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivos Gerais

Neste contexto, o trabalho tem como objetivo geral desenvolver uma ferramenta utilizando a técnica de Dinâmica de Sistemas para análise da viabilidade econômica de geração de energia elétrica no setor de suinocultura em propriedades rurais, associadas ao uso de biodigestores.

1.3.2 Objetivos Específicos

O trabalho busca representar as relações de influências que afetam as estruturas do sistema, tanto positivas como negativas, caracterizando os diagramas causais, com o estabelecimento dos seguintes objetivos específicos:

- Identificar e estabelecer as relações de causa e efeito entre os principais elementos integrantes do sistema tendo como foco a Geração de Energia Elétrica.

- Desenvolver um modelo de simulação que permita avaliar a viabilidade econômica da produção de energia elétrica a partir de um estudo de caso no Estado do Mato Grosso do Sul.

- Analisar a sensibilidade do processo de tomada de decisão tendo em vista os cenários associados às diferentes estratégias operacionais.

1.4. Revisão Bibliográfica

Para a realização deste trabalho foi feita uma revisão bibliográfica com objetivo de contextualização do assunto. Serão apresentados alguns estudos já realizados associados à produção de biogás, geração de energia elétrica a partir do biogás, aspectos ambientais e modelagem de sistemas dinâmicos.

1.4.1 Produção de biogás

Tratando da produção do biogás a partir da biomassa oriunda de propriedades suinícolas vários trabalhos já foram apresentados.

Gaspar [4] apresentou um estudo de caso em uma propriedade suinícola localizada na região de Toledo, PR, na qual evidenciou que o biodigestor é capaz de gerar quantidade de biogás para diminuir, significativamente, a demanda das pequenas e médias propriedades suinocultoras por energia elétrica. Além disso, o biodigestor proporciona uma quantidade adequada de biofertilizante que pode ser empregado na agricultura ou mesmo para dar volume à ração destinada aos animais.

Foi discutido em 2005 por Henn [7], os resultados obtidos no processo de tratamento e armazenamento de dejetos de suínos, composto por uma esterqueira e um biodigestor seguido de outra esterqueira. Implantado e construído em escala real, o sistema estudado tinha como finalidade a redução da matéria orgânica poluente e a valorização do efluente como biofertilizante e gerador de biogás. A tecnologia implantada na propriedade rural obteve alta remoção das cargas poluidoras.

Em 2006, Oliveira *et al.* [8] realizou experimento instalando dois biodigestores, em propriedade produtora de suínos com a finalidade de gerar de biogás com uso de dejetos e utilizá-lo no aquecimento ambiental do aviário da propriedade. O biodigestor instalado produziu biogás com uma eficiência de produção variando entre 0,35 à 0,60 m^3 de biogás por m^3 de biomassa. E o biogás produzido diariamente, pelos dejetos gerados por 400 suínos na fase de crescimento e terminação foi capaz de gerar energia térmica suficiente para aquecer o ambiente interno do aviário, mantendo a temperatura na faixa de conforto térmico, para a produção de 14.400 frangos de corte.

Nishimura [9] realiza uma análise de balanço energético do sistema de produção de biogás em granja de suínos. Conclui que a quantidade de energia de entrada requerida pelo sistema de produção no período de um mês corresponde a 99,75% do total da energia que entra no sistema. Na ração,

reside o item de maior consumo de energia, responsáveis por 96,57%. Nas saídas de energia, o item mais representativo foi o suíno, respondendo a 71,00% da energia exportada. A produção de biogás apresentou valores significativos, representando 26,60% das saídas de energia. O biofertilizante é responsável por apenas 2,40%.

1.4.2 Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás

No Brasil diversos trabalhos tem se proposto apresentar a geração de energia elétrica a partir do biogás.

Angonese *et al.* [10] discute a geração de energia elétrica a partir do uso de biodigestores e apresenta como uma oportunidade crescente de negócios aos empresários do setor de suinocultura. Conclui que a produção de dejetos tem valor energético em torno de 30% da energia de saída total do sistema, no sentido de sua efetiva utilização no próprio sistema, por meio da renovação de energia, reduzindo o impacto ambiental e minimizando a importação de energia.

Não obstante, Carvalho *et al.* [11] ressalta a viabilidade da utilização do biogás na produção de energia elétrica tanto no aspecto técnico quanto financeiro, pois os custos com a aquisição e manutenção dos equipamentos desenvolvidos para serem utilizados com esta fonte energética é compensado em curto prazo.

Silva *et al.* [12] ressalta que o Programa Proinfa realiza incentivos fiscais e financeiros para cogeração a partir de biomassa motivando assim a utilização desta fonte alternativa.

Lindemeyer [13] analisa a viabilidade econômico-financeira do uso de biogás como fonte de energia elétrica em uma granja localizada em Concórdia-SC. No estudo são demonstrados cenários na qual permite concluir a viabilidade econômica do modelo, além da agregação de renda a partir da comercialização da energia elétrica excedente produzida. No entanto, o autor

se equivoca em seus cálculos demonstrando resultados errôneos para análise do assunto em questão.

Souza *et al*. [14] analisa o custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura e observa que a viabilidade do sistema depende da tarifa paga pelo proprietário rural à concessionária local de energia, ou seja, o retorno do investimento depende da tarifa de energia paga pelo produtor e da disponibilidade da planta. Para uma tarifa de R$ 190,00/MWh e a planta operando 10 horas/dia, o retorno seria de 5,4 anos, o que o autor conclui como sendo um tempo razoável.

1.4.3 Sustentabilidade Associada à Suinocultura

A sustentabilidade associada à suinocultura é um assunto que tem se tornado essencial sob a ótica do produtor rural e já fora abordado em outros estudos.

Segundo Souza *et al.* [14] não se justifica o fato do Brasil, um país possuidor de clima tropical com abundância de resíduos, continuar emitindo metano na atmosfera, sem nenhum aproveitamento e, contribuindo assim para o agravamento do efeito estufa.

Em 2004, Laslowski [15] apresentou as vantagens da utilização do biogás, gerado pelo tratamento dos dejetos dos suínos, avaliando os impactos ambientais e a questão econômica para esta atividade no Município de Castro, Paraná. No trabalho obteve resultados positivos como a melhora da higiene e o padrão sanitário do meio rural, evitando o despejo incorreto e o contato das pessoas diretamente com os dejetos, impedindo a disseminação de doenças. A primeira vista, o custo para a implantação de um sistema como o apresentado, pode aparentar um investimento elevado para o suinocultor. Entretanto, a economia gerada pela utilização dos sub-produtos do sistema permite que o retorno do investimento se processe em dois anos gerando lucro depois deste período.

Vanzin *et al.* [16] discuti a geração de energia elétrica a partir da utilização do biogás proveniente da decomposição anaeróbica de resíduos em aterros sanitários, modelando diversos cenários para a venda de energia e comercialização de créditos de carbonos, na qual demonstrou ser viável economicamente com uma TIR de 13,76% e um VPL de U$ 1.322.238,85 para uma taxa mínima de atratividade de 8% a.a.

1.4.4 Modelagem a partir de Sistemas Dinâmicos

Como este trabalho se propõe a desenvolver um modelo de simulação via Dinâmica de Sistemas, torna-se importante o comportamento dos fluxos de informação, bens e serviços que dirigem a estrutura dos empreendimentos. Neste contexto, diversos trabalhos tem se proposto a utilização de Dinâmica de Sistemas na sua modelagem.

Fernandes *et al.* [17] implementa um modelo computacional para simular a dinâmica operacional de uma linha industrial de abate de suínos. O modelo classificado como dinâmico estocástico e discreto efetua uma caracterização do sistema real, através da criação do modelo conceitual a partir do fluxograma operacional e concluiu que o modelo pode ser aplicado para simular a dinâmica operacional de linhas industriais de abate de suínos, especificamente na previsão das seguintes variáveis: (i) tempo de duração da operação; (ii) tempo de deslocamento da insensibilização até a depiladeira; (iii) tempo de deslocamento da insensibilização até a câmara fria; (iv) número de carcaças re-inspecionadas; e (v) número final de carcaças.

Plà-Aragones [18] propõe uma modelagem para um rebanho de matrizes utilizando um sistema dinâmico e estocástico adaptado ao Processo Markoviano, onde o estado futuro depende apenas do estado presente e não dos estados passados. Ele leva em consideração alguns aspectos para a modelagem, como por exemplo, os estados das matrizes na reprodução, as possíveis ações que o produtor pode tomar em cada fase de transição (inseminação, reprodução, parição) e os lucros de todo o processo para chegar a conclusão da melhor taxa de ocupação em uma instalação de propriedade suinocultora onde o produtor consegue obter um maior lucro.

Sob ótica de Dinâmica de Sistemas, Ortega [19] coloca que a modelagem através desta técnica busca representar as relações de influências entre as estruturas do sistema que afetam as externalidades tanto positivas como negativas, caracterizando os diagramas causais. As informações contidas no diagrama causal podem ser traduzidas através de um modelo de simulação, que permite avaliar através de cenários os riscos associados à tomada de decisão (estratégias) por parte das gerências.

Silva [20] analisa a influência dos aspectos regulatórios na viabilidade dos sistemas de cogeração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro do Estado de Mato Grosso do Sul utilizando a técnica de Dinâmica de Sistemas, uma vez que a técnica permitiu realizar simulações das diversas formas de contratação disponíveis, de modo a maximizar os lucros e, consequentemente, diminuir o tempo de retorno dos investimentos necessários para a implantação das unidades de cogeração em suas plantas industriais.

Lourenzani *et al.* [21], analisa por meio da metodologia de Simulação Dinâmica, o comportamento dos fluxos de informação, bens e serviços que dirigem a estrutura de empreendimentos Agroindustriais de Pequeno Porte utilizando o processo de mapeamento causal, uma estrutura básica para a simulação dinâmica onde é construído para avaliar, compreender e controlar os fatores interdependentes do sistema. A validação e implementação deste protótipo na forma de simuladores *("management flight simulators")* contribuiu para a melhoria e elaboração de diretrizes para a sustentabilidade do setor.

1.5. Organização do Trabalho

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos.

No capítulo introdutório foram descritos a contextualização do assunto, a justificativa e os objetivos geral e específicos, além de apresentar a revisão bibliográfica sobre a produção de energia elétrica utilizando biodigestores, sustentabilidade associada à suinocultura e modelagens de sistemas dinâmicos.

No capítulo 2 serão abordados os fundamentos teóricos necessários à realização deste estudo. São abordados os aspectos ambientais da suinocultura e conceitos sobre biogás, biodigestores, os aspectos energéticos associados ao setor, a comercialização de energia elétrica sob o enfoque do produtor rural e comercialização de créditos carbonos oriundos de projetos de mecanismos de desenvolvimento limpo.

No capítulo 3 descreve a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho, além de apresentar a modelagem matemática e diagramas de laço causais utilizada na modelagem do problema proposto. Será caracterizada a propriedade rural escolhida para este estudo e serão descritas as etapas necessárias para a modelagem do sistema através da técnica de dinâmica de sistemas.

No capítulo 4 serão descritos os diversos cenários utilizados neste trabalho para apresentada a modelagem observando os diversos cenários, baseado em estudo de caso de uma propriedade rural. Os resultados da simulação demonstram o potencial de faturamento desenvolvido na análise do processo de tomada de decisão.

O capítulo 5 apresentará a discussão dos resultados e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada uma breve fundamentação teórica sobre os biodigestores e a utilização do biogás no processo de geração de energia elétrica e créditos carbonos associados a projetos MDL.

2.2 Biogás

O biogás era considerado, até pouco tempo, como um subproduto obtido por meio da decomposição de lixo urbano, do tratamento de efluentes domésticos e resíduos animais. No entanto, o crescente desenvolvimento econômico vem estimulando pesquisas de fontes renováveis para produção de energia tentando criar, deste modo, novas formas de produção energética que possibilitem a redução da utilização dos recursos naturais esgotáveis.

A conversão energética do biogás pode ser apresentada como uma solução para o grande volume de resíduos produzidos por atividades agrícolas e pecuárias, destilarias, tratamento de esgotos domésticos e aterros sanitários, visto que reduz o potencial tóxico das emissões de metano ao mesmo tempo em que produz energia elétrica, agregando, desta forma, ganho ambiental e redução de custos. [22]

2.2.1 Histórico do Biogás

A formação da biomassa tem origem com os povos agrícolas hindus, chineses e japoneses. Pela necessidade de limpar os solos das fazendas os agricultores faziam valas para depositar resto de frutas, dejetos humanos e de animais, água suja, etc.

Essas valas, após a decomposição anaeróbica da matéria orgânica armazenada, transformavam-se em verdadeiros pântanos, que liberavam gases oriundos dessa decomposição. Por esse processo observou-se que a parte sólida, chorume, poderia ser utilizada como fertilizante natural para a agricultura e a parte gasosa, resultante da fermentação por decomposição anaeróbica da matéria orgânica poderia ser utilizada como fonte de energia.

A partir do domínio do processo, o biodigestor foi criado para facilitar e acelerar a fermentação da matéria orgânica e o Biogás, resultante dessa fermentação passou a ser considerado uma grande fonte de energia alternativa e não apenas um subproduto do processo, criando assim uma opção para não utilização de recursos naturais esgotáveis.

De acordo com Pecora [23], com a crise do petróleo, diversos países buscaram alternativas para sua substituição, acarretando em um grande impulso na recuperação de energia gerada pelos processos de tratamento anaeróbio. No Brasil os estudos com Biogás foram iniciados de maneira mais intensa em 1976.

Porém, as soluções para os problemas de desenvolvimento devem ser apropriadas às necessidades, capacidades e recursos humanos, financeiros e culturais. Deste modo, o impulso recebido durante a crise não chegou a substituir os recursos não renováveis por fontes renováveis.

Passados aproximadamente 30 anos os biodigestores ressurgem como alternativa ao produtor, graças à disponibilidade de novos materiais para a construção dos biodigestores e, evidentemente, da maior dependência de energia das propriedades em função do aumento da escala de produção associada aos elevados custos da energia tradicional. [24]

Ademais, devido a atual estrutura do setor elétrico brasileiro, torna possível que o produtor rural comercialize a energia excedente de sua propriedade com a concessionária local de energia elétrica.

2.3 Biodigestor

O biodigestor constitui-se de uma câmara hermeticamente fechada onde é acumulada grande quantidade de material orgânico em solução aquosa, onde sofre decomposição, gerando o biogás e o biofertilizante.

Em relação ao abastecimento de biomassa, o biodigestor pode ser classificado como:

a) Contínuo, quando o abastecimento diário de biomassa, com descarga proporcional à entrada de biomassa,

b) intermitente, quando utiliza sua capacidade máxima de armazenamento de biomassa, retendo-a até a completa biodigestão. Então, retiram-se os restos da digestão e faz-se nova recarga.

Os tipos de biodigestores mais difundidos são os modelos indiano, chinês e canadense, sendo este último o mais utilizado recentemente, principalmente pelo desenvolvimento de geomembranas que facilitam a instalação dos biodigestores. [25]

2.3.1 Modelo Indiano [26]

Este modelo de biodigestor, conforme ilustrado na figura 1 caracteriza-se por possuir uma campânula como gasômetro, a qual pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação e uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras. A função da parede divisória faz com que o material circule por todo o interior da câmara de fermentação. O modelo indiano possui pressão de operação constante, ou seja, à medida que o volume de gás produzido não é consumido de imediato, o gasômetro tende a deslocar-se verticalmente, aumentando o volume deste, portanto, mantendo a pressão no interior deste constante.

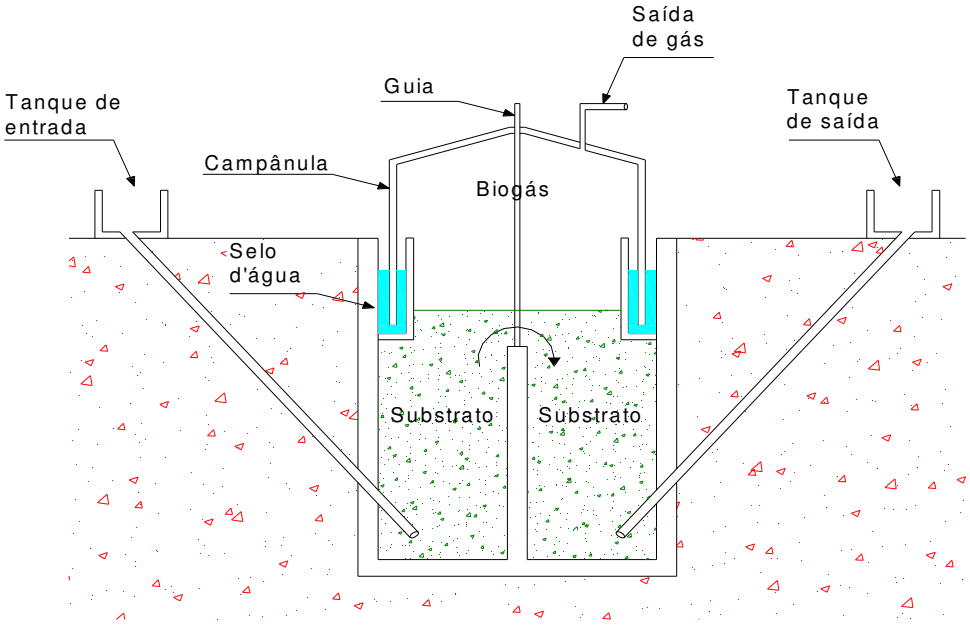

Figura 1:Biodigestor modelo indiano

Fonte: Nishimura [9]

O resíduo a ser utilizado para alimentar o biodigestor indiano, deverá apresentar uma concentração de sólidos totais (ST) não superior a 8%, para facilitar a circulação do resíduo pelo interior da câmara de fermentação e evitar entupimentos dos canos de entrada e saída do material. O abastecimento também deverá ser contínuo, ou seja, geralmente é alimentado por dejetos bovinos e/ou suínos, que apresentam certa regularidade no fornecimento de dejetos.

Do ponto de vista construtivo, apresenta-se de fácil construção, contudo o gasômetro de metal pode encarecer o custo final, e também à distância da propriedade pode dificultar e encarecer o transporte inviabilizando economicamente a implantação deste modelo de biodigestor.

A figura 2 mostra a representação tridimensional em corte mostrando todo o interior do biodigestor.

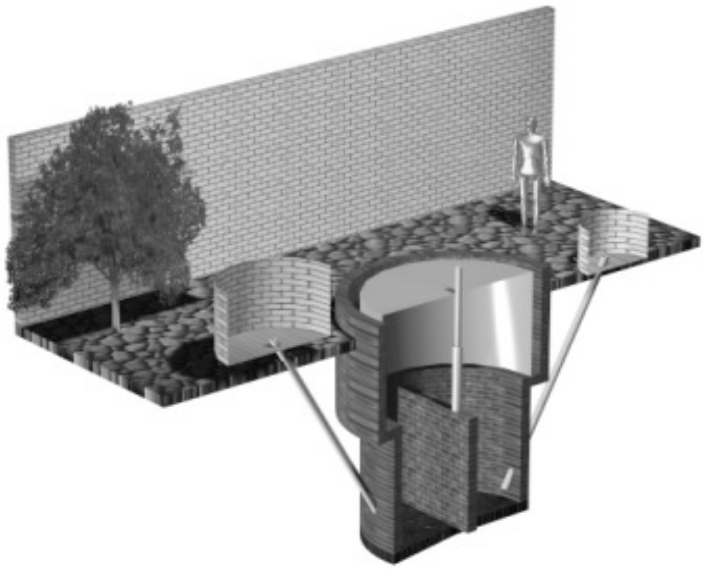

Figura 2: Representação tridimensional em corte do modelo indiano.
Fonte: Deganutti [26]

2.3.2 **Modelo Chinês** [26]

O modelo chinês, conforme ilustrado na figura 3 é formado por uma câmara cilíndrica em alvenaria (tijolo) para a fermentação, dispensando o uso

de gasômetro em chapa de aço, reduzindo assim os custos. Possui teto abobado, impermeável, destinado ao armazenamento do biogás. Este biodigestor funciona com base no princípio de prensa hidráulica, de modo que aumentos de pressão em seu interior resultantes do acúmulo de biogás resultarão em deslocamentos do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída, e em sentido contrário quando ocorre descompressão.

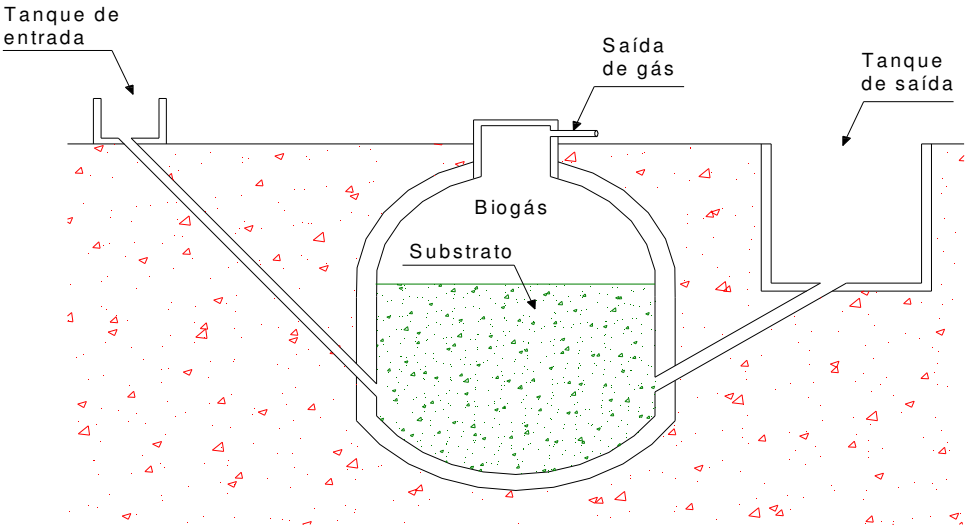

Figura 3: Biodigestor modelo chinês

Fonte: Nishimura [9]

Neste tipo de biodigestor uma parcela do gás formado na caixa de saída é libertada para a atmosfera, reduzindo parcialmente a pressão interna do gás, por este motivo as construções de biodigestor tipo chinês não são utilizadas para instalações de grande porte.

Semelhante ao modelo indiano, o substrato deverá ser fornecido continuamente, com a concentração de sólidos totais em torno de 8%, para evitar entupimentos do sistema de entrada e facilitar a circulação do material.

A figura 4 a representação tridimensional em corte, tem se a noção exata de todo o interior do biodigestor.

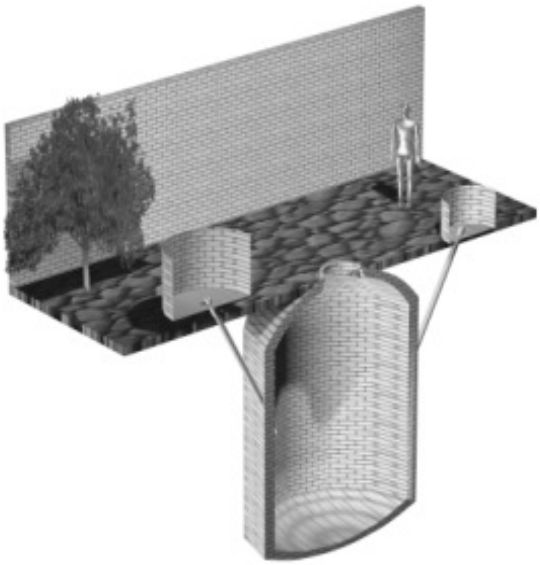

Figura 4: Representação tridimensional em corte do modelo chinês.
Fonte: Deganutti [26]

Em termos comparativos, os modelos Chinês e Indiano, apresentam desempenho semelhante, apesar do modelo indiano ter se apresentado ligeiramente mais eficiente quanto à produção de biogás e redução de sólidos no substrato.

2.3.3 **Modelo Canadense** [26]

O modelo canadense trata-se de um sistema bastante simples e de pequena exigência operacional. Sua instalação poderá ser apenas um tanque anaeróbio, ou vários tanques em série. Esse tipo de biodigestor é abastecido de uma única vez, portanto não é um biodigestor contínuo, mantendo-se em fermentação por um período conveniente, sendo o material descarregado posteriormente após o término do período efetivo de produção de biogás.

Enquanto, os modelos chinês e indiano prestam-se para atender propriedades em que a disponibilidade de biomassa ocorre em períodos curtos,

como exemplo aquelas que recolhem o gado duas vezes ao dia para ordenha, permitindo coleta diária de biomassa, que deve ser encaminhada ao biodigestor, o modelo em canadense adapta-se melhor quando essa disponibilidade ocorre em períodos mais longos, como ocorre em granjas avícolas de corte, cuja a biomassa fica a disposição após a venda dos animais e limpeza do galpão.

A figura 5 mostra a vista frontal em corte do biodigestor e a figura 6 mostra a representação tridimensional em corte mostrando todo o interior do biodigestor.

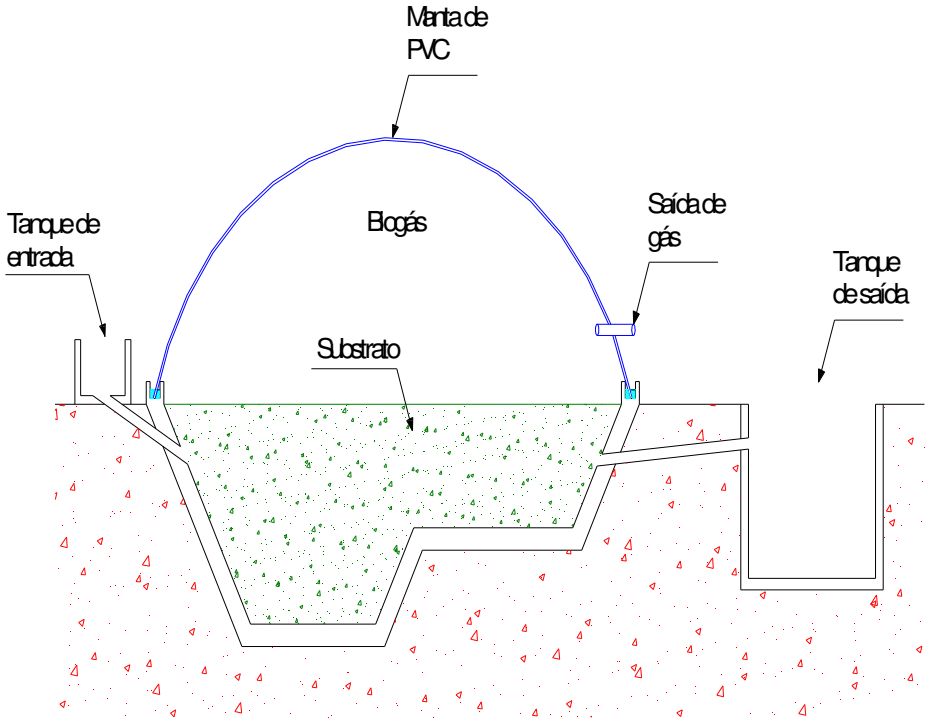

Figura 5: Biodigestor modelo canadense.

Fonte: Nishimura [9]

Figura 6: Representação tridimensional em corte do modelo canadense
Fonte: Deganutti [26]

2.4 Produção de Biogás

O biogás é um gás inflamável produzido por microorganismos, a partir da digestão anaeróbia, que com a ausência de oxigênio, as matérias orgânicas são fermentadas dentro de determinados limites de temperatura, teor de umidade e acidez, e em um ambiente impermeável ao ar. É constituído basicamente por metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e por dióxido de carbono (CO_2) como pode ser observado na figura 7. O seu poder calorífico está diretamente relacionado com a quantidade de metano existente na mistura gasosa. [27]

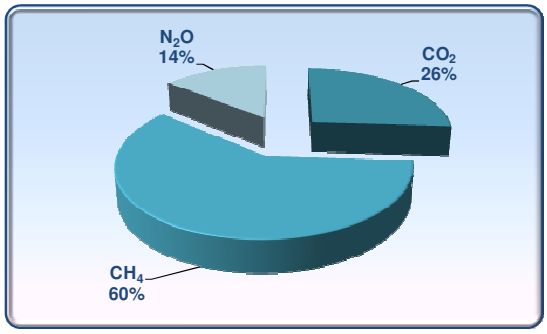

Figura 7: Constituição do biogás.

O poder calorífico do biogás aumenta quanto maior a concentração de metano, uma vez que o dióxido de carbono presente no biogás é uma forma oxidada do carbono, não podendo ser queimado.

O processo de digestão anaeróbia apresenta quatro etapas:[28] [29]

- Hidrólise: nesta etapa as bactérias liberam enzimas extracelulares, as quais irão promover a hidrólise das partículas e transformar as moléculas maiores em moléculas menores e solúveis ao meio.
- Acidogênese: nesta etapa as bactérias produtoras de ácidos transformam moléculas de proteínas, gorduras e carboidratos em ácidos orgânicos (ácido láctico, ácido butílico), etanol, amônia, hidrogênio dióxido de carbono e outros.
- Acetogênese: nesta etapa as bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substrato apropriado para as bactérias metanogênicas; os produtos gerados são o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato.
- Metanogênese: é a etapa final do processo de degradação da matéria orgânica, sendo esta convertida em metano e dióxido de carbono por ação das bactérias metanogênicas.

Sendo a fermentação anaeróbica um processo biológico que ocorre devido à ação de bactérias, é evidente que quanto maior a população bacteriana mais eficiente e rápida será a digestão.

A partir do processo de produção de biogás, pode-se obter o biofertilizante, líquido derivado dos resíduos do biodigestor. Este biofertilizante apresenta alta qualidade, além de reduzido teor de carbono e elevado teor de nitrogênio (N) e outros nutrientes, o que melhora as condições do material para fins agrícola. Contudo, os custos de transporte, a topografia ondulada, o tamanho das propriedades e a ausência de mecanização podem ser obstáculos para a otimização do uso de dejetos animais como biofertilizantes.

Sob a ótica de produção de biogás, a idéia de que os biodigestores com grandes volumes de biomassa produzem altas quantidades de biogás nem sempre é verdadeira. O correto dimensionamento do biodigestor deve levar em consideração o tempo de residência hidráulica, a temperatura da biomassa e a carga de sólidos. [24]

O processo de geração do metano em biodigestores pode ocorrer em três níveis de temperatura, ou seja:

- entre 45 e 60ºC, o processo é considerado termofílico;
- de 20 a 45ºC é mesofílico e com a digestão anaeróbia de matéria orgânica;
- menores que 20ºC é chamada de digestão psicrofílica. A maioria dos biodigestores anaeróbios têm sido projetados na faixa mesófila. [6]

O nível de carga está relacionado com a quantidade de sólidos voláteis (SV), responsáveis diretos pela produção de biogás. Quanto maior a quantidade de sólidos voláteis na alimentação diária do biodigestor, maior será a capacidade do biodigestor para a produção de biogás. [30]

No entanto, os dejetos tendem a ser extremamente liqüefeitos, 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. [24]

Dessa forma, ao passar pelo biodigestor, o efluente perde carbono na forma de CH_4 e CO_2, havendo assim a diminuição na relação entre carbono e nitrogênio da matéria solubilidade de alguns nutrientes.

2.5 Geração de Energia Elétrica

A conversão energética de biogás em energia elétrica pode ser realizada de diversas formas devido aos atuais avanços tecnológicos. As tecnologias mais utilizadas são as microturbinas a gás e os motores de combustão interna de ciclo Otto. A utilização de microturbinas ainda apresenta custos elevados e o seu tempo de vida útil operando com biogás ainda é baixo. [14]

Os motores de ciclo Otto caracterizam-se pela combustão da mistura ar-combustível ser provocada por uma centelha produzida pela vela de ignição, enquanto que nos motores de ciclo Diesel, a combustão ocorre em função da compressão da mistura.

Os motores de combustão interna de ciclo Otto necessitam de pequenas modificações para poderem utilizar o biogás como combustível. Dessa forma, não são os mais indicados para geração de eletricidade. O mais apropriado é o motor de ciclo Diesel, pela sua maior robustez e menor custo para uma mesma potência, comparado ao de ciclo Otto. A introdução de biogás em motores de ciclo Diesel pode ser obtida mediante duas tecnologias: a ottolização e a conversão dual (bicombustível diesel/gás). [31]

Na ottolização, grandes modificações nos motores são necessárias. Todo o sistema de injeção de Diesel é retirado e, em seu lugar, instalam-se um sistema de carburação do gás ao ar de admissão e o sistema elétrico com velas para a ignição, que passa a ser feita por centelha. Também são necessárias modificações nos cabeçotes dos motores para a adequação de sua taxa de compressão (motores do ciclo Otto trabalham com taxas de compressão inferiores aos motores Diesel). Não são raras perdas de potência e performance de um motor ottolizado.

Na operação bicombustível (diesel e biogás) em motores de ciclo Diesel, é uma tecnologia em que, o gás natural substitui o diesel na faixa de 30 a 80%. O motor passa a queimar gás natural e o diesel continua a ser injetado na câmara apenas para promover o início da combustão da mistura ar-combustível, ou seja, ambos os combustíveis são queimados simultaneamente. A conversão dual apresenta a vantagem de não necessitar troca de componentes do motor original, porém não é indicado para aplicações que

necessitam de alto torque ou alta potência, sendo necessária nesses casos, uma proporção maior de óleo Diesel na queima. [32]

Nessa conversão energética, a energia química contida nas moléculas do biogás é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica ativa um gerador que a converte em energia elétrica.

2.5.1 Comercialização de Energia Elétrica

Os sistemas de produção de biogás, além de produzirem energia elétrica necessária às atividades agropecuárias, podem gerar um excedente energético. Quando se opta por sistemas de cogeração, parte da energia elétrica pode ser utilizada nas próprias instalações e parte pode ser comercializada com a concessionária local.

A Geração Distribuída (GD) deriva de diversas fontes primárias de energia, tanto renováveis (biomassa, lixo etc.) quanto não renováveis (sobretudo gás natural), não se vinculando a uma tecnologia específica. Atualmente, há muitas possibilidades técnicas em operação e várias em desenvolvimento e não implica em propriedade onde os equipamentos geradores junto ao consumidor podem ser, ou não, de sua propriedade.

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia - PROINFA, criado com base na Lei nº 10.438/02 do MME, tem como objetivo o aumento da participação da energia elétrica gerada por Produtores Independentes a partir de fontes eólica, pequenas centrais hidrelétricas (PCH´s) e biomassa no sistema interligado nacional (SIN). Abre-se uma oportunidade para que sistemas de geração de energia elétrica, utilizando biogás como fonte primária de energia, venham a ser implantados, promovendo, com isso, uma participação dessa fonte renovável alternativa de energia na matriz energética nacional. [33]

Silva [12] ressalta que o Programa Proinfa realiza incentivos fiscais e financeiros para cogeração a partir de biomassa motivando assim a utilização desta fonte alternativa, tais como:

- Incentivos para conexão / transmissão / distribuição: um desconto de 50% sobre as taxas de utilização dos sistemas elétricos de transmissão e distribuição.
- Incentivos na aquisição de energia: A garantia da compra da energia produzida, de 20 anos, pela Eletrobrás, de acordo com o estabelecido no artigo 3o da Lei n º 10.438 de 26 de abril de 2002, alterada pela 9a Artigo na Lei n ° 10.762 de 11 de novembro de 2003.
- Incentivos no acesso ao mercado: A ACL mercado - Free contratantes Ambiente (médio e curto prazo contratos bilaterais) reserva de 500kW até 3MW apenas para fontes alternativas: bio-eletricidade, (Small hidráulica Plantas) PCH, eólica, solar, Qualificada cogeração. Incentivos no financiamento: Benefício do sistema de atribuição do Consumo Combustível Bill - CCC, para a geração de energia elétrica nos sistemas isolados.

O interesse da geração distribuída sob a ótica do consumidor está em não poder tolerar variações de freqüência e/ou tensão, bem como interrupções no abastecimento. Do ponto de vista econômico, o investimento em GD só interessa ao consumidor se a eletricidade gerada tiver um custo menor que o abastecimento via empresa concessionária. [34]

Sob o ponto de visto do setor elétrico, a geração distribuída pode ser economicamente atraente em função das reduções de custo que ela possibilita. A geração distribuída reduz perdas nas linhas transmissão e distribuição, proporciona maior estabilidade à tensão elétrica, reduz perdas reativas de potência e adia investimentos em subestações de transformação e em capacidade adicional para a transmissão. [35]

2.6 Aspectos Ambientais

O crescimento da emissão de gases na atmosfera, principalmente de dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), que contribuem para o aumento do efeito estufa, tem sido objeto de grande preocupação e discussão devido as suas consequências sobre o clima de todo o planeta. Com o objetivo de

contribuir para a diminuição das emissões atmosféricas dos gases do efeito estufa (GEE) o Protocolo de Quioto, proposto em 1997 e em vigor desde fevereiro de 2005, preconiza que os países desenvolvidos denominados Anexo I[1], que são os maiores emissores, comprometem-se a reduzir em 5,2% as emissões de GEE, no período de 2008 a 2012, tomando-se como base os níveis globais registrados em 1990.

Estes países poderão cumprir suas metas de redução através do chamado Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Este instrumento, contido no artigo 12 do Protocolo de Quioto, permite aos países do Anexo I alcançar suas metas financiando e desenvolvendo projetos de redução de emissões que busquem o desenvolvimento sustentável nos países menos desenvolvidos. O Brasil, pelas suas condições naturais, é um forte candidato a hospedar uma significativa parte de projetos MDL, beneficiando-se com o acesso a tecnologias mais avançadas, recebimento de investimentos e a consequente melhoria em suas condições ambientais. [**5**]

Jotzo *et al.* [36]. estimam que o MDL poderá absorver cerca de 32% da demanda do mercado global por créditos de carbono. Este volume corresponderia a 300 milhões de tCO_{2eq} anualmente ou 1,5 bilhão tCO_{2eq} no período de compromisso do Protocolo de Quito. Considerando valores estimados por diferentes especialistas, variando entre US$ 8 e US$ 32 o preço da tonelada do CO_{2eq}.

Projetos de tratamento de dejetos de suínos, que captam o gás metano (CH_4) antes que esse possa chegar à atmosfera, enquadram-se perfeitamente na categoria de MDL. No Brasil, já existem iniciativas lançando mão da tecnologia de biodigestores, que através da degradação dos dejetos de suínos de forma anaeróbia, e posterior aproveitamento energético, reduzem a emissão de GEE, tanto por mitigar CH_4 quanto por substituir combustíveis fósseis.

---

[1] *Anexo I* é a relação dos 40 países e a Comunidade Européia, listados na *Convenção do Protocolo de Quioto,* que assumiram compromissos de reduzir emissões de *gases de efeito estufa* (GEE). São, basicamente, os países da *Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico* (OCDE): Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Bielo-Rússia, Bulgária, Canadá, Comunidade Européia, Croácia, Dinamarca, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Estônia, Federação Russa, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Japão, Letônia, Liechtenstein, Lituânia, Luxemburgo, Mônaco, Holanda, Nova Zelândia, Noruega, Polônia, Portugal, Reino Unido da Grã-Bretanha e Irlanda do Norte, República Tcheca, Romênia, Suécia, Suíça, Turquia, Ucrânia e Estados Unidos.

2.6.1 MDL aplicado à suinocultura brasileira

O Protocolo de Quioto, por sua vez, pode ser considerado como a origem do atual mercado de carbono, na medida em que cria instrumentos de mercado que permitem a negociação de emissões entre países quem apresentam uma maior capacidade de reduzir as emissões e aqueles que porventura não atingiram suas próprias metas de redução.

Este protocolo apresenta duas categorias básicas de signatários. No Anexo I, estão os países desenvolvidos com a missão de reduzir, até 2012, as emissões dos gases poluentes, em 5,2% abaixo dos níveis de 1990. No Não-Anexo 1[2], estão listadas as nações em desenvolvimento, sem essa missão, mas com a recomendação de auxiliarem o primeiro grupo em suas metas de redução.

O Protocolo de Quioto estabelece algumas estratégias para os países desenvolvidos cumprirem suas metas de redução de gás estufa, sendo que a de grande interesse para o Brasil refere-se ao chamado mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL), que permite aos países do Anexo I alcançar suas metas financiando e desenvolvendo projetos de redução de emissões que busquem o desenvolvimento sustentável nos países em desenvolvimento.

O principal foco na abordagem de dejetos suínos tem sido o de ações envolvendo a geração e consumo do biogás. Este gás contém majoritariamente metano (CH_4) que apresenta um poder estufa 21 vezes [**37**] superior ao dióxido de carbono (CO_2). Portanto, projetos que diminuam a emissão e o consumo deste gás para geração de energia podem concorrer para o MDL. A proposta é que criadores de suínos adquiram biodigestores para suas instalações, já que o biodigestor é um dispositivo aprovado por lei [**36**].

---

[2] Os países *"não-Anexo I"* (países em desenvolvimento) são aqueles que não se comprometeram em assumir metas obrigatórias de redução de emissão, apesar de alguns adotarem ações voluntárias nesse sentido.

2.7 Considerações Finais

Neste capítulo procurou-se descrever os aspectos relacionados ao uso de biogás na produção de energia elétrica através da utilização do biodigestor, tecnologias delineando o meio ambiente no qual o produtor rural está inserido.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

3.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada a estrutura do modelo e a modelagem matemática do problema de viabilidade econômica de geração de energia elétrica no setor de suinocultura em propriedades rurais. Os diagramas de laços causais permitem entender as inter-relações das forças sistêmicas num contexto global, permitindo assim a implementação do modelo via técnica de dinâmica de sistemas.

A seguir, são apresentados os parâmetros e as equações que serviram de base para a elaboração do modelo.

3.2 Estrutura do Modelo Proposto

Para analisar a viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás em propriedades suinocultoras, este trabalho propõe o modelo estruturado em quatro módulos principais (módulo técnico, módulo econômico, módulo ambiental e módulo da tomada de decisão), como pode se observar a figura 8.

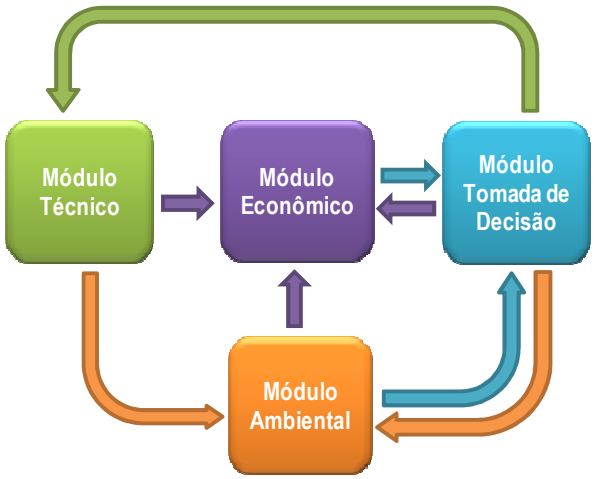

Figura 8: Estrutura do modelo para análise de viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás.

O módulo técnico tem por objetivo modelar os aspectos técnicos associados a geração de energia elétrica e, consequentemente, determinar a quantidade de biogás necessária para suprir a demanda da propriedade rural.

O módulo ambiental demonstra a conversão do biogás em toneladas de dióxido de carbono equivalente – crédito carbono nos mecanismos de desenvolvimento limpo para posterior comercialização.

O módulo econômico utiliza-se dos resultados obtidos tanto no módulo técnico como no módulo ambiental para determinar resultados econômicos e a influência das estratégias a serem adotadas – taxas, fluxo de caixa, valor presente líquido, taxa interna de retorno.

O módulo de tomada de decisão, por sua vez, com base nas informações fornecidas pelo módulo econômico, avalia as estratégias propostas e permite a implementação de fatores que podem afetar os módulos econômicos, ambientais e/ou técnicos

3.3 Aspectos de Implementação

É importante observar que o ambiente competitivo, conseqüência do processo de reestruturação do setor elétrico brasileiro, exige o uso combinado de métodos qualitativos (aspectos estratégicos) e quantitativos (aspectos operacionais). Neste contexto, este trabalho utiliza uma abordagem na qual se procura compreender uma determinada situação sem se preocupar diretamente com a resolução de um suposto problema. [38] Esta abordagem é denominada por Senge [42] de *"soft"* e abrange a técnica de: Dinâmica de Sistemas (DS).

Sob esta ótica, o modelo proposto a ser implementado utiliza-se principalmente dos diagramas de laço causal para explicitar as "relações" de influência e estabelecer as "relações" causais no modelo do problema. [38]

3.4 Dinâmica de Sistemas

A técnica de Dinâmica de Sistemas surgiu inicialmente na década de 60, com o trabalho de Jay Forrester no MIT (*Massachussetts Institute of Technology*). Sua teoria foi baseada em sistemas de *feedback* e de controle com a finalidade de avaliar negócios e contextos organizacionais e sociais. Isto fez com que fosse desenvolvida uma metodologia analítica de modelagem.[39]

Forrester [**40**] desenvolveu uma técnica de modelagem, análise e simulação de sistemas que possuem inter-relacionamentos complexos e processos não-lineares, utilizando conceitos de gestão, teoria de sistemas de controle e de simulação computacional, permitindo compreender a operação do sistema real, determinar os fatores que exercem maior influência sobre o sistema, avaliar as conseqüências da implementação de diversas formas de controle e obter funções de controle viáveis que garantam a máxima satisfação.

Uma visão do que representa a Dinâmica de Sistemas, segundo Saito [**41**] pode ser aceita como aquela que tem sua ênfase na estrutura e no processo dentro da estrutura, assumindo que essa é a melhor maneira que o comportamento dinâmico no “mundo real” pode ser caracterizado. A Dinâmica de Sistemas considera então, o comportamento sendo causa principalmente de sua estrutura. Estrutura, nesse caso não consiste somente em aspectos físicos de plantas e processos de produção, mas também com referências importantes a políticas e tradições, ambas tangíveis e intangíveis, que dominam as tomadas de decisões.

Partindo desse ponto de vista a Técnica de Dinâmica de Sistemas assume que análises de uma situação podem ser compreendidas de um ponto de vista objetivo externo, e que a estrutura e o processo dinâmico do “mundo real” podem ser recriados em ambos os sistemas de diagramas e modelos matemáticos. Essas idéias podem ser transmitidas para um contexto organizacional.

A Dinâmica de Sistemas também é orientada para examinar a inter-relação de forças, e vê-las como parte de um todo, avaliando como processos complexos de realimentação podem gerar padrões problemáticos de

comportamento dentro das organizações e sistemas humanos de grande escala. [**42**] [**43**]

A simulação permite que se verifique o funcionamento de um sistema real em um ambiente virtual, considerando a variabilidade do sistema e demonstrando o que acontecerá na realidade de forma dinâmica. Isto permite que se tenha uma melhor visualização e um melhor entendimento do sistema real, compreendendo as inter-relações existentes no mesmo. [44]

No entendimento de um sistema real seriam necessárias repetidas experimentações, muitas vezes arriscadas, as quais demandariam um longo período de tempo para análise. Conseqüentemente, a utilização de modelos que emulam sistemas reais e possibilitam a realização de simulações tornam-se necessários.

O diagrama de laço causal para análise econômica, apresentado no próximo capítulo, visa identificar as relações de influência sob a ótica do produtor rural no processo de tomada de decisão a respeito do seu investimento em produção de energia elétrica. A análise das alternativas de investimento corresponde, somente, a uma parte do processo de solução do problema, tendo em vista que o emprego de técnicas adequadas de modelagem é essencial para que haja resultados confiáveis e representativos.

Pidd [**45**] coloca que, de um modo geral, os sistemas para os quais justificam-se a utilização da Simulação, são ‘dinâmicos’ (seu comportamento pode variar ao longo do tempo), são ‘interativos’ (possuem ‘n’ componentes que interagem entre si, afetando o comportamento do sistema) e são ‘complexos’ (o número de variáveis que interagem é muito grande e sua dinâmica precisa ser considerada).

Para tais sistemas, a estocasticidade e natureza dinâmica são características que devem ser analisadas para definição de ações na realidade. Uma das vantagens da simulação com relação a outras técnicas de apoio à tomada de decisão é justamente a observação da estocasticidade dos sistemas, que não é levada em conta quando os mesmos são representados por modelos analíticos/determinísticos. [46]

Ademais, algumas características justificam a utilização da técnica de dinâmica de sistemas as quais são: [46]

- Permite testar várias alternativas para a situação atual sem interferir na realidade, poupando tempo e evitando a implementação de alternativas avaliadas de forma insuficiente;
- Permite a observação de alternativas simuladas em longo prazo, ou seja, longos períodos de tempo, em poucos minutos.

Porém, como a maioria das técnicas/ferramentas de auxílio à tomada de decisão, a Simulação apresenta algumas desvantagens:

- Necessidade de várias replicações (dependendo da variabilidade do sistema) para que o modelo possa representar o sistema real;
- Grande esforço/tempo computacional necessário para execução de modelos complexos: historicamente a demanda computacional relativa à modelagem de sistemas complexos tem sido um dificultador à construção de modelos de Simulação. Porém, com a evolução progressiva e contínua dos sistemas
- A definição das variáveis importantes do sistema em estudo é dificultada para modelos complexos: haja vista que a realidade completa dificilmente será modelada, precisa-se definir no sistema as variáveis mais importantes para construção do modelo. Esta definição precisa ser feita com cuidado, a fim de não prejudicar a validade do modelo construído.

A despeito destas questões, a dinâmica de sistemas, do ponto de vista da aprendizagem organizacional, tem sido usada de uma maneira cujo objetivo principal não é a simulação exata do comportamento dos sistemas organizacionais, pois o idéia chave não é a resolução de problemas através da modelagem, mas a possibilidade de avaliar os padrões de comportamentos do

sistema visando o aprimoramento dos modelos mentais compartilhados das pessoas que têm o poder de tomar ações.

É importante ressaltar que em um sistema, as partes influenciam-se umas às outras de maneira mútua, quer direta ou indiretamente. Tais fluxos de influência teriam um caráter "recíproco, uma vez que toda e qualquer influência é, ao mesmo tempo, causa e efeito – a influência jamais tem único sentido". Este fluxo de influência, como ilustrado pela figura 9, é recíproco no sentido que uma influência de um elemento A sobre B, causa influência de B sobre C, que pode voltar a influenciar novamente A, num ciclo de causa e efeito circular denominado enlace ou feedback. [47]

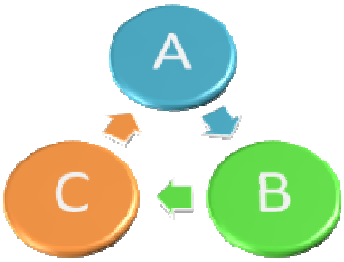

Figura 9: Fluxo de influência

De posse destes conceitos, cabe refinar o foco principal da dinâmica de sistemas. De uma forma mais específica, ela busca a compreensão da estrutura e do comportamento dos sistemas compostos por enlaces de *feedback* interagentes.[48]

3.5 Diagrama de Laço Causal

Os diagramas de laço causal (DLC), de natureza qualitativa, são estruturas em forma de grafos, utilizados para a visualização de qualquer sistema, através da identificação de suas características estruturais, das relações de causa e efeito e dos tempos de espera (*delays* ou atrasos) presentes no comportamento do sistema. Estas estruturas facilitam a representação do problema real, ou seja, permitem a visualização de como

seus elementos interagem e influenciam o todo, e o conseqüente desenvolvimento dos modelos matemáticos. [**49**]

No DLC, uma relação de causa e efeito indica a influência que uma variável exerce sobre outra, ou seja, o efeito de qualquer outra variável é ignorado quando é analisada uma relação causal. É enfatizado pela simplicidade de representação do comportamento de um sistema, através do mapeamento dos seus elementos formadores e dos relacionamentos entre eles, isto é, de que forma um elemento influencia o comportamento de outro.

Identificando as variáveis de interesse, é possível apresentar uma proposta de modelagem baseada na técnica de Dinâmica de Sistemas (DS), permitindo a simulação, análise e discussão de problemas complexos (problemas de difícil formulação matemática ou com grande espaço de busca) e não lineares, formando uma via importante para enfocar e tomar decisões concernentes ao problema.

O diagrama de laço causal é utilizado para análise econômica e visa identificar as relações de influência sob a ótica do produtor rural no processo de tomada de decisão a respeito do seu investimento em produção de energia elétrica. A análise das alternativas de investimento corresponde, somente, a uma parte do processo de solução do problema, tendo em vista que o emprego de técnicas adequadas de modelagem é essencial para que haja resultados confiáveis e representativos.

A figura 10 ilustra o diagrama de laço causal apresentando as relações de causa e efeito para as variáveis de interesse, como determinantes para a produção de energia através da utilização do biodigestor sob a ótica do produtor rural.

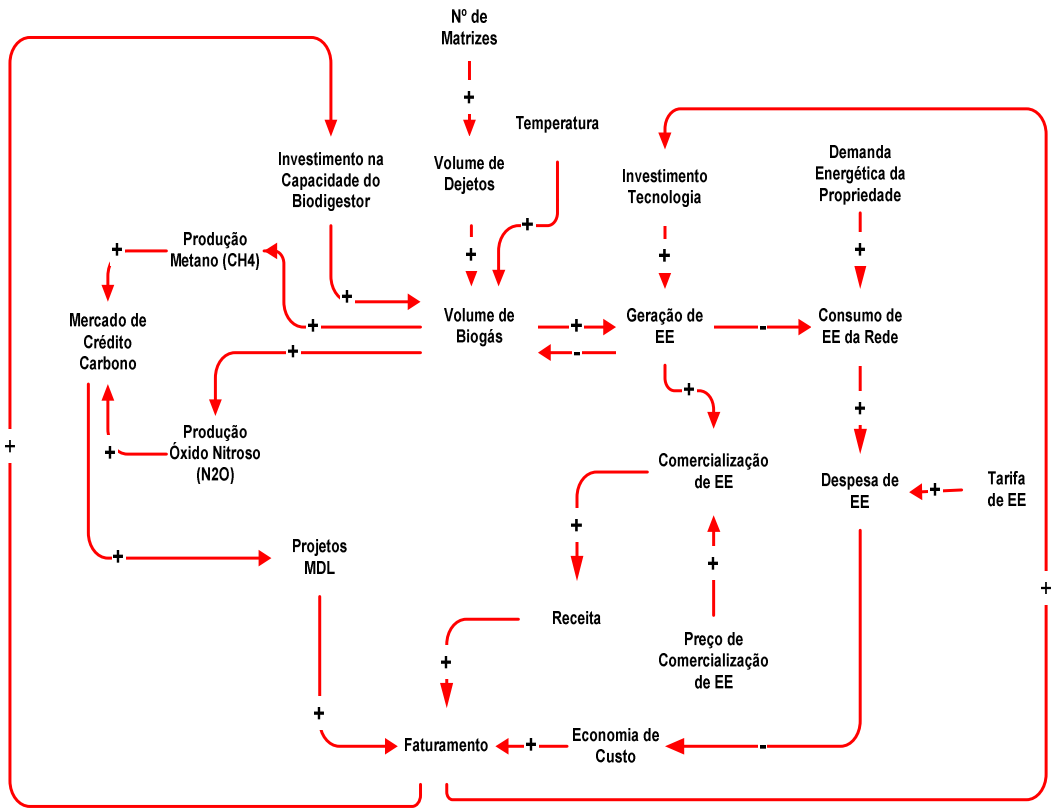

Figura 10: Avaliação de geração de energia elétrica através do uso de biodigestores.

Tais relações de causa e efeito servem de base para a criação de um ambiente de simulação que permita ao usuário a tomada de decisão, considerando a influência de múltiplos critérios qualitativos e quantitativos.

Na construção do DLC considerou-se uma quantidade inicial de suínos produzindo biomassa e a utilização de biodigestores para a produção de biogás gerando energia elétrica.

É importante ressaltar que o DLC foi construído em função do conhecimento relativo ao sistema, onde, por muitas vezes, resulta da subjetividade e intuição do modelador.

Para melhor entender os laços de realimentação e a própria dinâmica do sistema, analisa-se os laços de realimentação individualmente na figura 11 e 12.

O DLC enfocando o investimento na capacidade do biodigestor mostra que a tomada de decisão envolve laços de realimentação com dinâmicas

diferentes. Ou seja, os investimentos na capacidade do biodigestor resultam, conforme mostra Figura 11 em um aumento na produção de volume de biogás que conseqüentemente aumenta a geração de energia elétrica. Logo, o aumento na produção de biogás implica na possibilidade de comercialização do excedente de energia elétrica, contribuindo assim para um aumento da receita, como também aumenta o mercado de crédito carbono através de projetos de mecanismos de desenvolvimento limpo e, conseqüentemente, leva a um acréscimo no faturamento da propriedade rural. Vale ressaltar que quanto maior for a produção de energia maior será a demanda de matéria-prima disponível, ou seja, para que o investimento na capacidade do biodigestor se concretize para uma dada geração de energia é preciso que haja um número adequado de suínos na propriedade. Logo, a decisão de investimento na capacidade do biodigestor e/ou tecnologia de geração de energia elétrica deve ser avaliada levando em consideração o número atual e futuro de suínos da propriedade.

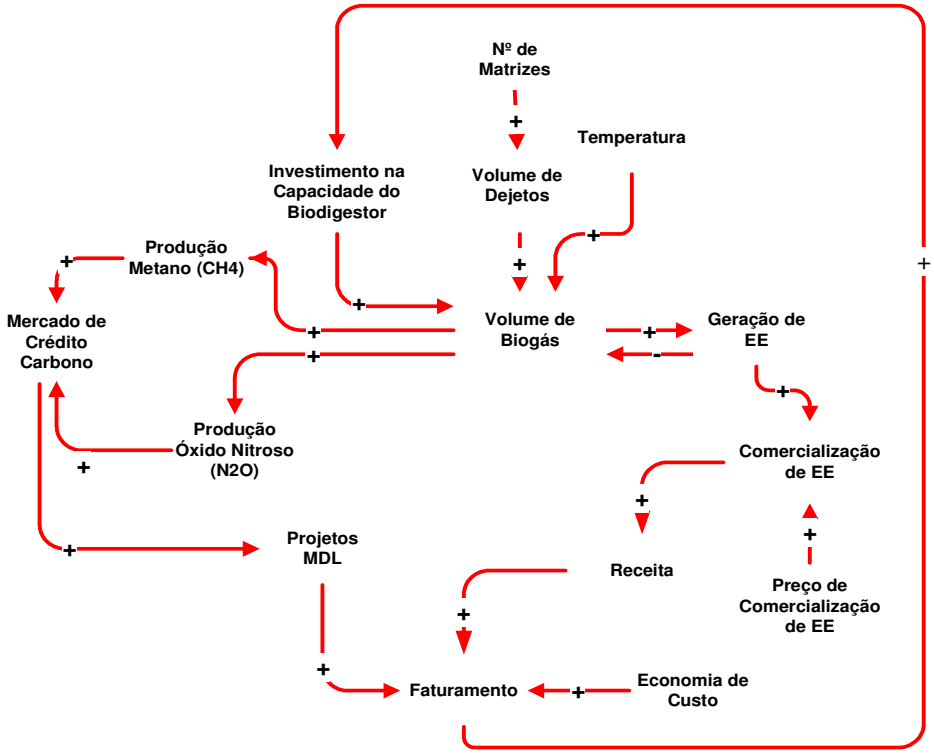

Figura 11: Avaliação de geração de energia elétrica enfocando o investimento na capacidade do biodigestor.

Por outro lado, a figura 12 enfoca o investimento em tecnologia. Dessa forma, o aumento no investimento em tecnologia afeta a disponibilidade de energia elétrica colocada tanto no mercado para a comercialização como para o abastecimento da propriedade rural, observa-se que a diminuição do consumo de energia elétrica da rede da concessionária e, consequentemente, das despesas associadas, ocasionam uma elevação na receita devido as despesas evitadas e dessa forma aumentam também o faturamento do produtor rural.

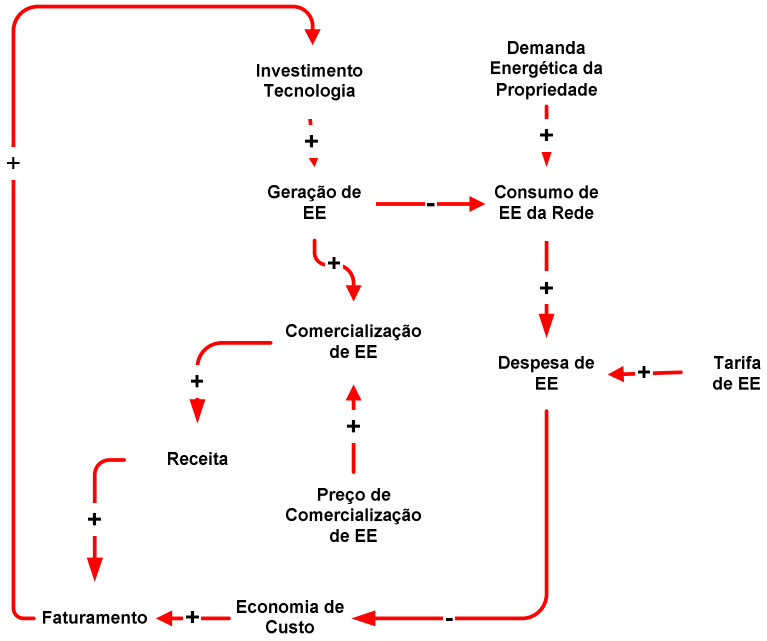

Figura 12: Avaliação de geração de energia elétrica enfocando o investimento de tecnologia.

Não obstante o diagrama de laço causal seja responsável pela representação da estrutura geral do sistema e ajuda na visualização dos principais laços do modelo, os Diagramas de Estoque e Fluxo (abordagem quantitativa) visam representar, de forma clara, as relações entre as variáveis e acentuar a existência dos laços de realimentação na representação do sistema. [49]

3.6 Diagramas de Estoque e Fluxo

Em um diagrama de estoque e fluxo (DEF), a estrutura do sistema é representada matematicamente, permitindo quantificar as relações de causa e efeito entre os elementos e também a exploração da evolução do sistema ao longo de certo período de tempo.

O uso das variáveis de Nível ou Estoque se dá quando há necessidade de acúmulo de uma determinada informação no tempo e/ou entender o seu comportamento no tempo. Em Dinâmica de Sistemas, as condições correntes dos níveis dentro de um sistema correspondem ao estado do sistema. Na modelagem de sistemas de *feedback* é importante identificar os níveis relevantes do sistema, uma vez que estes níveis estão sujeitos à algum controle pelo gerenciamento da organização. Examinando estes níveis dentro do sistema, o seu estado pode ser compreendido e ter uma ação de correção apropriada.

As variáveis auxiliares, são informações dinâmicas que não possuem ação comportamental no tempo, geralmente são cálculos que por sua vez podem sofrer inúmeras alterações durante o processo de simulação. A variável de taxa, também designada variável de fluxo (*flow*), determina a que velocidade uma variável de nível muda de valor. O seu valor é baseado somente em variáveis de nível e constantes, não dependendo de valores passados e nem de outras variáveis de taxa. As variáveis auxiliares representam uma operação algébrica com qualquer combinação de variáveis de estoque, de fluxo, constantes, e até mesmo com outras variáveis auxiliares.

As constantes e/ou parâmetros representam informações que o usuário do sistema tem acesso durante o processo de simulação sendo que pode alterá-las a qualquer momento verificar sua influencia (análise de sensibilidade) no processo de tomada de decisão.

As atividades de um sistema dinâmico devem ser representadas por um fluxo que controla os níveis do sistema. Essas taxas de fluxos variam continuamente e devem ser representadas de tal forma que se possa capturar essa variação. Fluxos ocorrem instantaneamente, mas podem ter medidas úteis, como taxas médias sobre um período.

Os Fluxos podem representar, por exemplo, um fluxo físico (representam quantidades conservativas, que podem ser movidas de um lugar para outro no sistema); um fluxo de informação (desempenham papel de interconexão entre fluxos físicos, isto é, auxiliam na tomada de decisão); ou um fluxo de inicialização de variáveis de nível. São extremamente utilizados, pois toda a ligação entre os demais símbolos será efetuada a partir deles.

Neste trabalho, foi utilizado o *software* de simulação *Powersim Studio Enterprise 2003,* para a representação dos diagramas de estoque e fluxo, no qual utiliza a simbologia apresentada na tabela 1.

Tabela 1: Símbolos de representação dos diagramas de estoque e fluxo.

Símbolo	*Representação*
	Variável de Nível
	Variável de Nível com mais de uma Dimensão
	Variável Auxiliar
	Variável Auxiliar com mais de uma Dimensão
	Constante
	Constante com mais de uma Dimensão
	Variável de Taxa
	Variável de Taxa com mais de uma Dimensão
	Fluxo de Informação
	Fluxo de Inicialização
	Fluxo Físico
	Direção na Transferência da Conexão da Variável: Entrada (in)
	Direção na Transferência da Conexão da Variável:Saída (out)

É importante ressaltar que, segundo Cardozo [50] a abordagem de um problema a partir da perspectiva de Dinâmica de Sistemas, compreende um conjunto de oito etapas:

- Aquisição de conhecimentos sobre o sistema, identificando as variáveis mais importantes do modelo;
- Especificação do comportamento dinâmico;
- Construção do diagrama de laço causal representando os "mapas mentais" dos analistas e tomadores de decisão, os

quais visam o entendimento explícito de um problema e a busca das relações entre os componentes da estrutura;

- Construção do diagrama de estoque e fluxo;
- Estimativa de valores dos parâmetros;
- Verificação da consistência ou simulação do modelo;
- Análise de sensibilidade;
- Aplicação de testes de políticas.

3.7 Módulos Propostos

Sob a ótica de DS, o modelo proposto, que permite a análise dos aspectos relacionados com seu equilíbrio econômico, foi estruturado em quatro módulos principais (módulo técnico, módulo econômico, módulo ambiental e módulo tomada de decisão), conforme descrito a seguir.

3.7.1 Módulo Técnico

O módulo técnico tem por objetivo, baseado no número de matrizes e quantidade de biomassa média por cada uma dessas matrizes, determinar a produção de biogás na propriedade rural.

Neste contexto, o biogás total gerado (BG_t) a partir da biomassa das matrizes pode ser expresso:

$$BG_t^{\ N} = \frac{CH_{4t}^{\ N}}{DQO_t^{\ N} \times k \times B \times E_{bd}} \tag{3.1}$$

onde,

t: Mês de simulação;

N: Número de matrizes na propriedade;

BG_t^N *:* Biogás total produzido por “N” matrizes da prpriedade (m^3);

CH_4^N*:* Quantidade de metano total por “N” matrizes da propriedade (m^3);

DQO_t^N: Demanda química de oxigênio total por "N" matrizes da propriedade (g);

k: constante de conversão de DQO em CH_4;

B: Biodegradabilidade da matéria orgânica do chorume (%);

E_{bd}: Eficiência de conversão da matéria orgânica em CH_4 no biodigestor(%).

A demanda química de oxigênio total por "N" matrizes no mês "t" pode ser apresentado por:

$$DQO_t^N = N \times DQO \times CH \tag{3.2}$$

onde,

DQO: Demanda Química de Oxigênio de cada matriz da propriedade (g/l);

CH: Quantidade de chorume médio de cada matriz da propriedade (l/dia).

A figura 13 apresenta a modelagem do biodigestor para a obtenção do biogás total produzido na propriedade, além do biogás necessário para produção de energia elétrica, utilizada para consumo do autoprodutor e o excedente de biogás, que quando não queimado, pode ser gerada energia elétrica para comercialização.

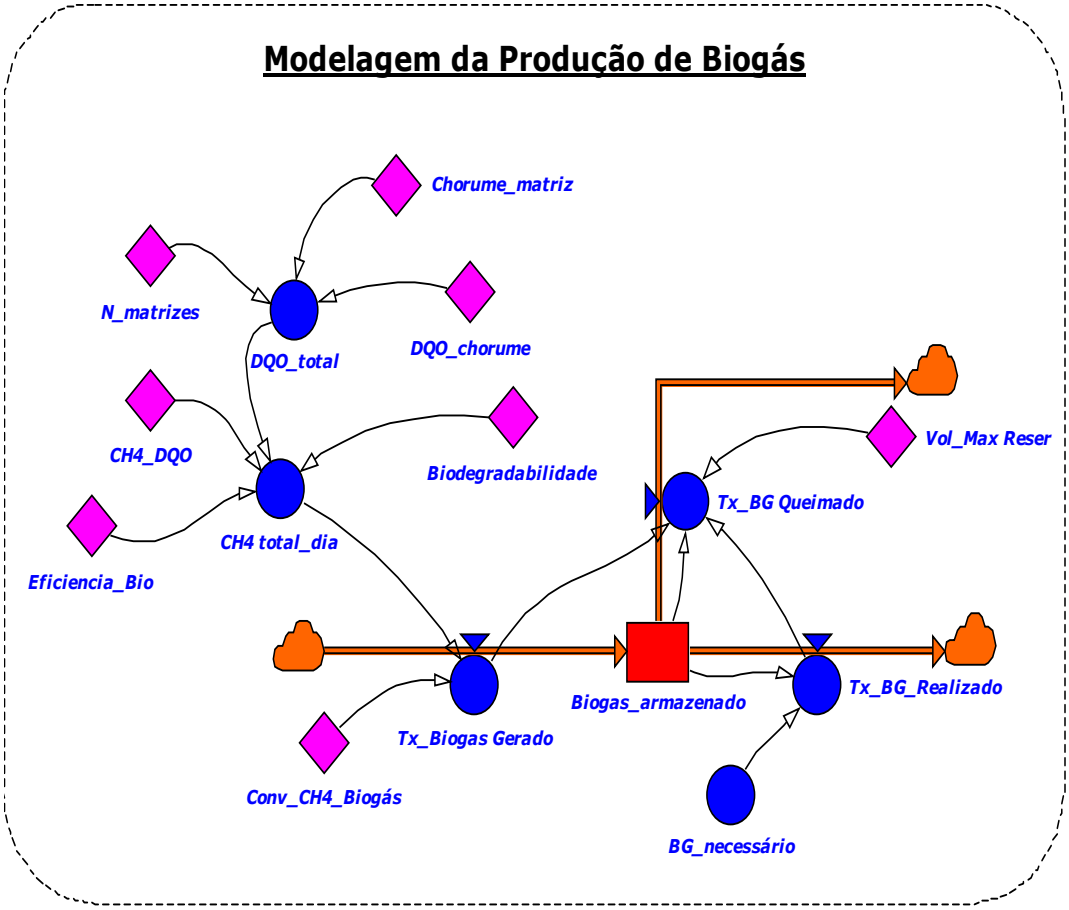

Figura 13: Diagrama de estoque e fluxo da produção de biogás.

Tabela 2: Variáveis do DEF da produção de biogás.

Variável	Unidade	Descrição
N_matrizes	_	Número de matrizes da propriedade rural
Chorume_matriz	l/dia	Quantidade de chorume por matriz
DQO_chorume	g/l	Demanda química de oxigênio do chorume de cada matriz
DQO_total	g	Demanda química de oxigênio total
CH4_DQO	m³/kg	Fator de conversão do DQO em CH4
Eficiencia_Bio	%	Eficiência de conversão do biodigestor
Biodegradabilidade	%	Biodegradabilidade da matéria orgânica do chorume
CH4_total_dia	m³	Quantidade total de metano produzido por dia
Conv_CH4_Biogás	%	Fator de conversão de CH4 em biogás
Tx_Biogas Gerado	m³/mês	Biogás gerado por mês na propriedade
Biogás_armazenado	m³	Biogás armazenado no biodigestor
Tx_BG_Realizado	m³/mês	Consumo de biogás realizado
BG_necessário	m³	Biogás necessário para o consumo da propriedade
Tx_BG Queimado	m³/mês	Biogás excedente a ser queimado ou utilizado na produção de enrgia elétrica a ser comercializada
Vol_Max Reser	m³/dia	Volume máximo do biodigestor

O biogás necessário para a utilização da potência máxima do grupo gerador pode ser expresso por:

$$BG_{nec} = C_{BG} \times 720 horas \tag{3.3}$$

onde,

BG_{nec}: Biogás necessário(m³);

C_{BG}: Consumo de biogás (m³).

A energia elétrica produzida pelo grupo gerador à biogás pode ser expressa por:

$$EE_{BG} = P_{kW} \times 720 horas \tag{3.4}$$

onde,

EE_{BG}: Energia elétrica produzida a partir do biogás (kWh);

P_{kW}: Potência ativa do grupo gerador (kW).

A relação entre a potência ativa do gerador e o consumo de biogás necessário para a geração de energia elétrica pode ser observado na figura 14.

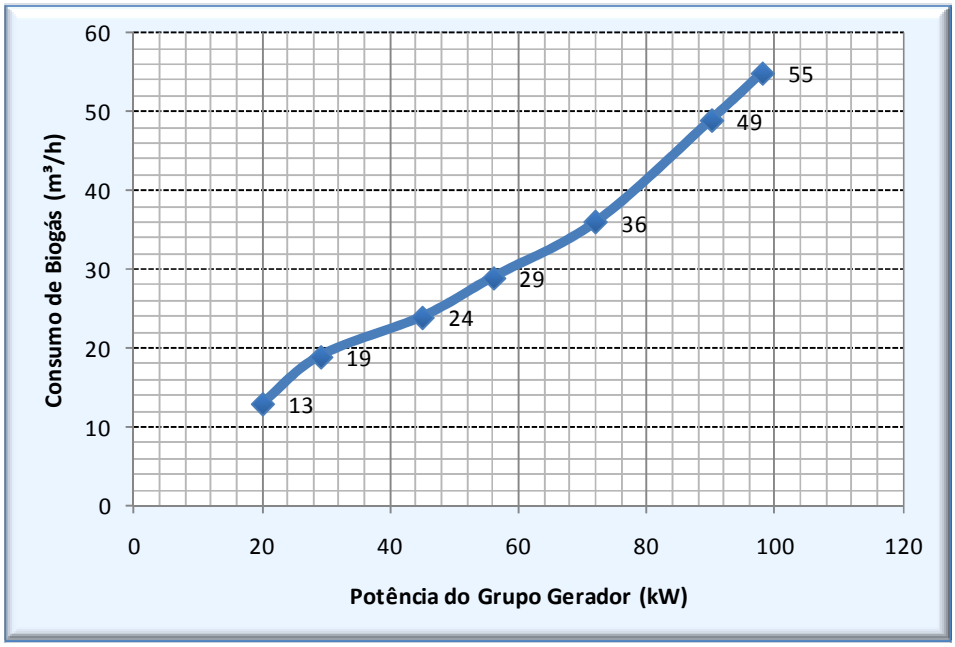

Figura 14: Relação entre a Potência do Grupo Gerador e seu consumo de biogás.

O custo evitado de energia elétrica pode ser expresso por:

$$CE_{EE} = EE_{BG} \times \$_{EE} \tag{3.5}$$

onde,

CE_{EE}: Custo evitado de energia elétrica (R$/mês);

$\$_{EE}$: Tarifa de energia elétrica (R$/kWh).

A energia elétrica disponível para a comercialização no mercado livre pode ser expresso por:

$$EE_{venda} = EE_{BG} - CP \tag{3.6}$$

onde,

EE_{venda}: Energia elétrica disponível para a comercialização no mercado livre (kWh);

C_P: Consumo da propriedade rural aferida nas contas de energia elétrica (kWh).

A figura 15 apresenta a modelagem de geração de energia a partir do biogás produzido na propriedade, sendo determinada a quantidade de Energia Elétrica para consumo da propriedade e energia elétrica excedente para ser comercializado no mercado livre.

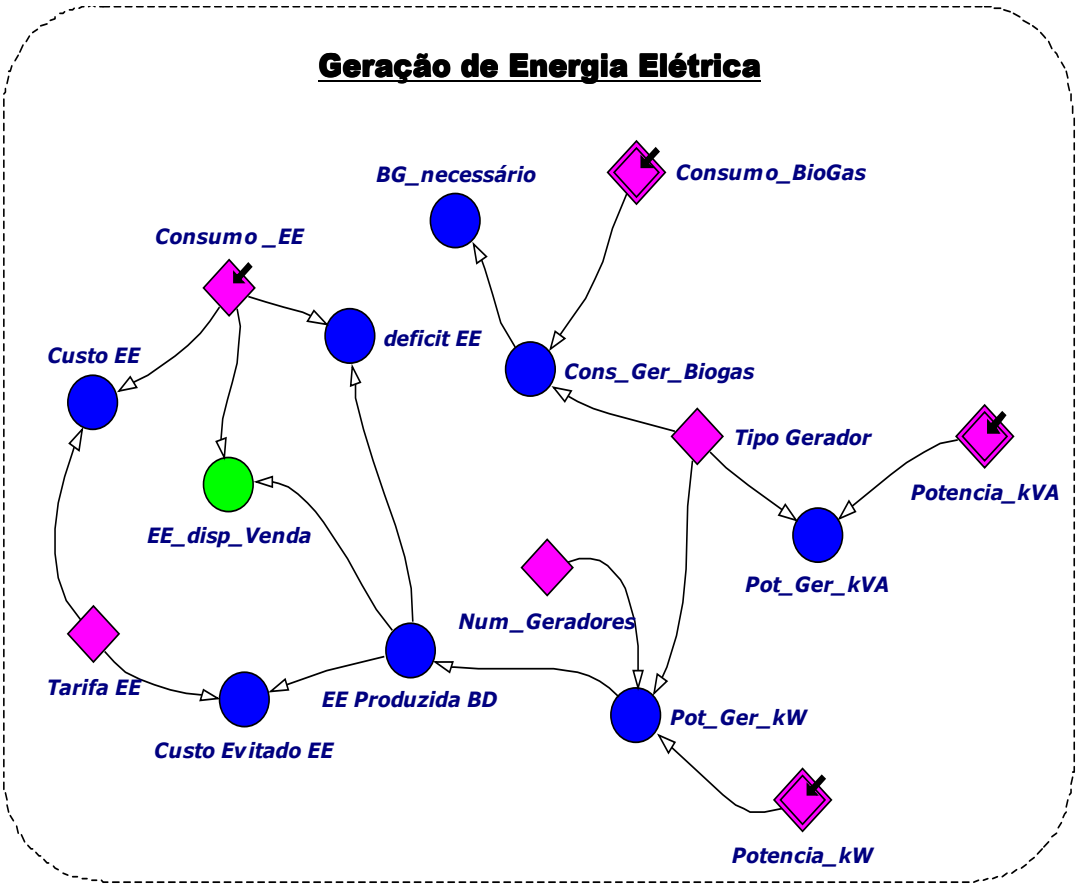

Figura 15: Diagrama de estoque e fluxo da geração de energia elétrica na propriedade a partir do gerador à biogás.

Tabela 3: Variáveis do DEF da Geração de Energia Elétrica

Variável	Unidade	Descrição
Potência_kVA	kVA	Potência Aparente do Gerador à Biogás (Entrada dos dados)
Pot_Ger_kVA	kVA	Potência Aparente do Gerador à Biogás
Tipo Gerador	_	Escolha de qual gerador será utilizado
Potencia_kW	kW	Potência Ativa do Gerador à Biogás (Entrada dos dados)
Pot_Ger_kW	kW	Potência Ativa do Gerador à Biogás
Num_Geradores	_	Quantidade de geradores a ser colocado na propriedade
Consumo_Biogas	m³/hora	Quantidade de Biogás a ser utilizada pelo gerador dado a potência aparente (Entrada dos dados)
Cons_Ger_Biogas	m³/hora	Quantidade de Biogás a ser utilizada pelo gerador dado a potência aparente
BG_necessario	m³	Biogás necessário para a produção de energia elétrica dada a potência máxima do gerador
EE Produzida BD	kWh	Energia Elétrica produzida pelo gerador a partir do biogás necessário
Consumo _EE	kWh	Consumo de energia elétrica mensal da propriedade aferido da contas de energia elétrica da concessionária
Custo Evitado EE	R$/mês	Custo de energia elétrica produzida evitado por se utilizar gerador a biogás dada tarifa empregada pela concessionária
Custo EE	R$	Custo das contas de energia elétrica
Tarifa EE	R$/kWh	Tarifa de energia elétrica
EE_disp_Venda	kWh	Energia Elétrica gerada excedente disponível para comercialização no mercado livre
deficit EE	kWh	Deficit de Energia Elétrica - quando o consumo é maior do que a energia produzida pelo gerador à Biogás

3.7.2 Módulo Ambiental

O módulo ambiental tem por objetivo a conversão do biogás produzido pelo biodigestor da propriedade em toneladas de dióxido de carbono equivalente a ser comercializado no mercado de crédito carbono.

A quantidade de toneladas métricas de Biogás provenientes da decomposição anaeróbica do esterco, pode ser expressa:

$$ton_{BG} = \frac{BGM_{mês} \times ME_{BG}}{1000} \quad (3.7)$$

onde,

ton_{BG}: Toneladas de biogás por mês (ton/mês):

$BGM_{mês}$: Biogás gerado por matriz por dia (m^3/mês);

ME_{BG}: Massa específica do biogás (kg/m^3).

Para se executar o cálculo da quantidade de metano produzida por mês em toneladas, deve- se utilizar o total de Biogás produzido por ano e o valor correspondente à percentagem de metano existente no Biogás (60%). Assim, temos a seguinte equação:

$$ton_{CH4} = ton_{BG} \times 60\% \quad (3.8)$$

onde,

ton_{CH4}: Toneladas de metano por mês (ton/mês).

A quantidade de óxido nitroso produzido por mês, em toneladas, deve-se utilizar o total de Biogás produzido por mês e o valor correspondente a percentagem de óxido nitroso existente no Biogás (14%). Assim, pode ser expresso por 3.9:

$$ton_{N2O} = ton_{BG} \times 14\% \quad (3.9)$$

onde,

ton_{N2O}: Toneladas de óxido nitroso por mês (ton/mês).

Conforme Carvalho [**11**], para o cálculo da quantidade de toneladas métricas reduzidas de dióxido de carbono por mês no projeto deve-se considerar o total em toneladas de metano por mês, o total em toneladas de óxido nitroso por mês e o GWP (*global warming potencial*) do CH_4 e N_2O,respectivamente, 21 e 310. Assim temos a seguinte equação:

$$ton_{CO2} = ton_{CH4} + ton_{N2O} \quad (3.10)$$

A figura 16, apresenta a modelagem ambiental, sendo possível a conversão do biogás produzido em toneladas de dióxido de carbono equivalente a ser comercializado no mercado de crédito carbono.

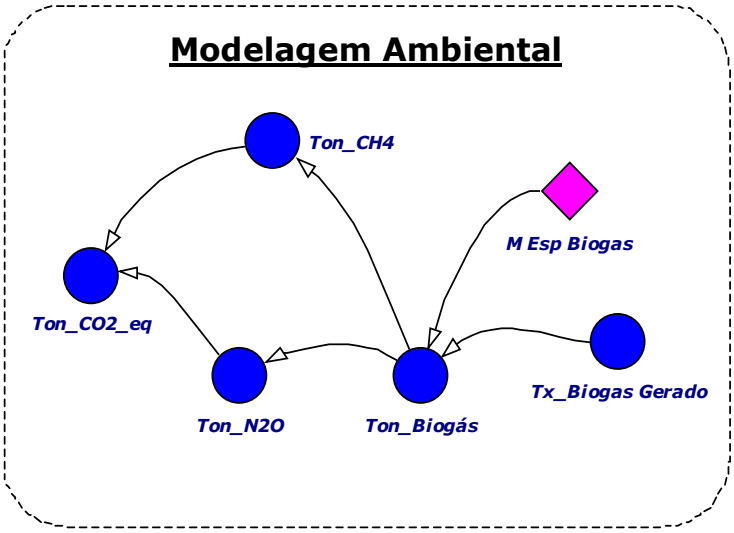

Figura 16: Diagrama de estoque e fluxo da modelagem ambiental.

Tabela 4: Variáveis do DEF da modelagem ambiental

Variável	Unidade	Descrição
Ton_CO2_eq	ton/mês	Tonelada de CO2 equivalente
Ton_CH4	ton/mês	Tonelada de CH4 gerado
Ton_N2O	ton/mês	Tonelada de N2O gerado
M Esp Biogas	kg/m³	Massa especifica do biogás
Tx_Biogas Gerado	m³/mês	Taxa de biogás gerado na propriedade
Ton_Biogás	ton/mês	Tonelada de Biogás gerado

3.7.3 Modelo Econômico

Na análise econômica o foco principal é a avaliação do fluxo de caixa, uma vez que o empreendimento necessita de investimento inicial com a implantação do grupo gerador a biogás e do biodigestor, além de gasto com operação e manutenção periódicas. Em contrapartida, com a implantação do mecanismo de desenvolvimento limpo na propriedade, poderão ser geradas receitas provenientes da geração de energia elétrica e comercialização de crédito carbono.

A partir desta avaliação, é possível o produtor/empreendedor analisar se a alternativa poderá ser ou não implantada, visando a sua longevidade e a maximização dos fluxos de caixa gerados por suas operações.

Deste modo, a análise de viabilidade da geração de energia elétrica a partir do biogás em propriedades rurais, pode ser formulada com uma análise de maximização do valor presente líquido (VPL), como definido em 3.11:

$$Max(VPL) = Max(S) - I \qquad (3.11)$$

onde,

S é a receita líquida no horizonte de estudo;

I é o investimento do projeto.

Deve-se observar que a receita líquida, S, é calculada pela diferença da Receita Operacional (RO_T) com os Custos Operacionais (CO_T) da propriedade rural.

A Receita Operacional pode ser expressa por 3.12:

$$RO_T = \sum_{k=1}^{j}(\beta_k \times REE^k{}_{venda}) + \sum_{k=1}^{j}(\beta_k \times CE^k{}_{EE}) + \sum_{k=1}^{j}(\beta_k \times RCC^k{}_{vend} \qquad (3.12)$$

Os Custos Operacionais podem ser expressos por 3.13:

$$CO_T = \sum_{k=1}^{j}(\beta_k \times OM^k) + \sum_{k=1}^{j}(\beta_K \times D^k{}_{TUSD}) \qquad (3.13)$$

onde:

$$\beta_k = \frac{1}{(1+i)^k} \qquad (3.14)$$

sendo:

β_k é a taxa de atualização;

i é a taxa de desconto;

$REE^k{}_{venda}$ é o receita da energia elétrica disponível para a venda no período “k”;

RCC^{k}_{venda} é a receita da comercialização dos Créditos Carbono no período "k";

OM^{k} são as despesas com operação e manutenção do biodigestor e grupo gerador no período "k".

D^{k}_{TUSD} é a despesa com o uso do sistema de distribuição no período "k".

A figura 17 ilustra o diagrama de estoque e fluxo que representa o módulo econômico utilizado na análise de maximização do valor presente líquido.

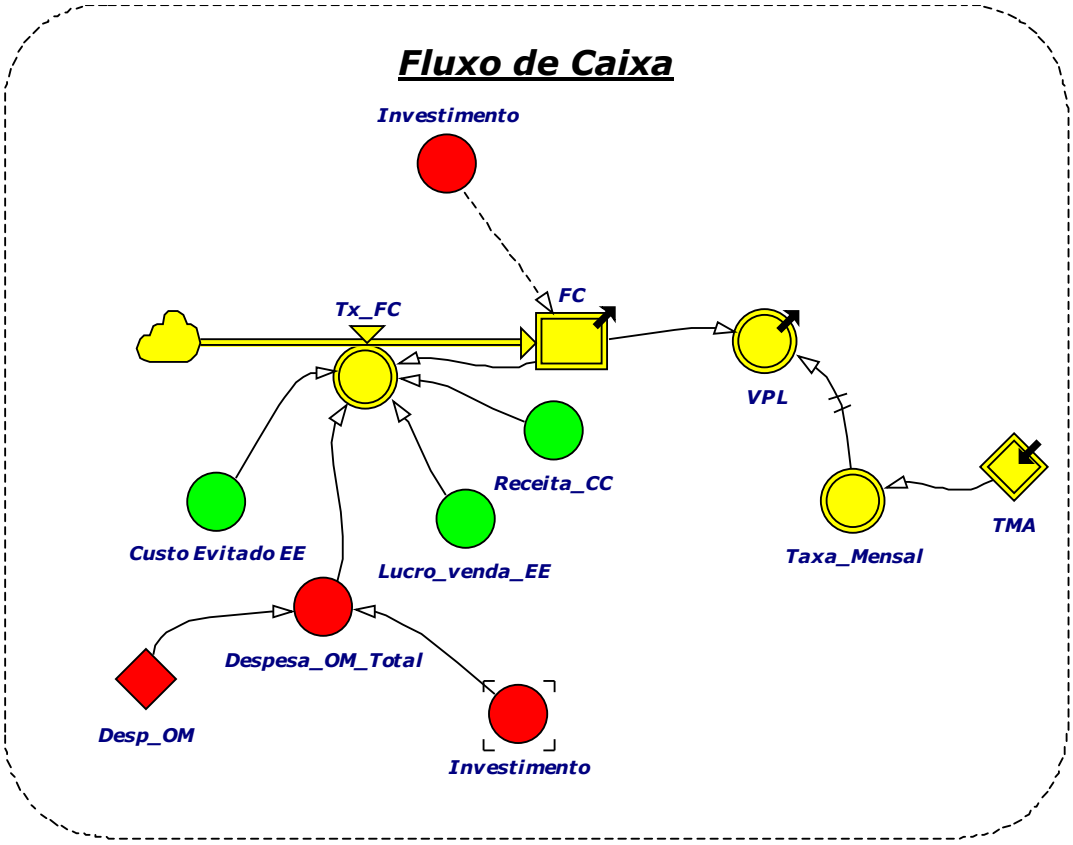

Figura 17: Modelagem do Fluxo de Caixa da Propriedade.

Tabela 5: Variáveis do DEF do Fluxo de Caixa da Propriedade

Variável	Unidade	Descrição
Investimento	R$	Investimento total do conjunto biodigestor e grupo gerador à biogás
Custo Evitado EE	R$/mês	Custo de energia elétrica produzida evitado por se utilizar gerador a biogás dada tarifa empregada pela concessionária
Receita_CC	R$/mês	Receita com a comercialzação do crédito carbono
Lucro_Venda_EE	R$/mês	Lucro com a venda de energia elétrica excedente no mercado livre
Despesa_OM_Total	R$/mês	Despesa com operação e manutenção total
Desp_OM	R$/mês	Despesa com operação e manutenção
Tx_FC	R$/mês	Taxa do fluxo de caixa
FC	R$	Fluxo de caixa
VPL	R$	Valor Presente Líquido
Tavxa_Mensal	%	Taxa de descont mensal
TMA	%	Taxa mínima de atratividade

A receita obtida com a comercialização de energia elétrica excedente gerada por ser expressa por:

$$REE^{k}{}_{venda} = \alpha \times \sum_{k=1}^{j} (EE^{k}{}_{venda} \times PEE^{k}{}_{venda}) \qquad (3.15)$$

$$D^{k}{}_{TUSD} = \alpha \times \sum_{k=1}^{j} (EE^{k}{}_{venda} \times T^{k}{}_{TUSD}) \qquad (3.16)$$

onde:

α é a variável de decisão com relação à comercialização de energia elétrica excedente.

Quando α =1, o produtor irá vender energia elétrica no mercado livre.

Quando α = 0, o produtor não vende energia elétrica para o mercado livre.

$PEE^{k}{}_{venda}$ é o preço da energia elétrica a ser comercializada no mercado livre no período “k”;

T^k_{TUSD} é a tarifa de uso do sistema de distribuição no período “k”.

A figura 18 apresenta o diagrama de estoque e fluxo da receita de comercialização da energia elétrica excedente da propriedade no mercado livre, onde é determinado o lucro com a venda de energia, a partir da energia disponível para venda, da tarifa do uso do sistema de distribuição (despesa) e preço de energia elétrica disponível para a venda (receita).

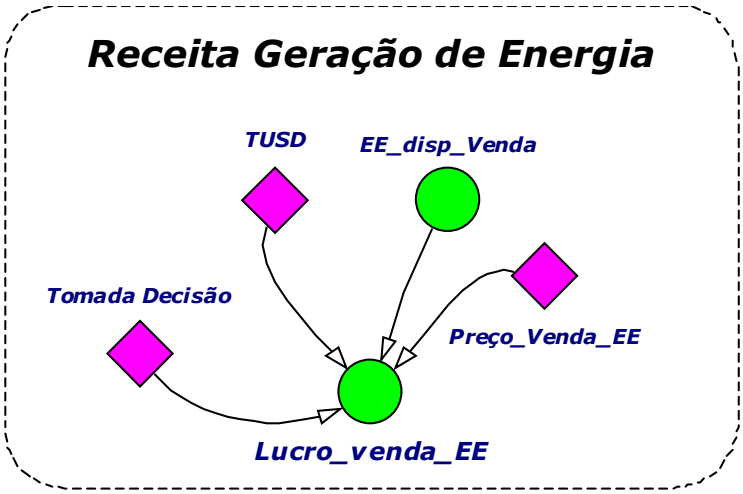

Figura 18: Diagrama de Estoque e Fluxo da Receita de Geração de Energia Elétrica.

Tabela 6: Variáveis de DEF da Receita de Geração de Energia Elétrica

Variável	Unidade	Descrição
Tomada Decisão	–	Decisão do produtor se vende ou não a energia elétrica produzida
TUSD	R$/kWh/mês	Tarifa de uso do sistema de distribuição de energia elétrica
EE_disp_Venda	kWh	Energia elétrica disponível para a venda
Preço_Venda	R$/kWh/mês	Preço da energia elétrica a ser vendida
Lucro_Venda_EE	R$/mês	Lucro com a venda da energia elétrica

A receita com a comercialização das toneladas de CO_2 equivalente, denominada crédito carbono, pode ser expressa por 3.17:

$$RCC^k_{venda} = \delta \times \sum_{k=1}^{j} (ton^k_{CO_2} \times PCC^k_{venda}) \qquad (3.17)$$

onde,

δ é a variável de decisão que interfere no modelo com relação ao financiamento do empreendimento (instalação do gerador e grupo gerador). Quando:

δ =1, o produtor irá financiar o empreendimento.

δ =0, o produtor não irá financiar o empreendimento.

ton^k_{CO2} é a tonelada de dióxido de carbono equivalente no período "k";

PCC^k_{venda} é o preço de comercialização do crédito carbono no período "k".

A figura 19 apresenta o diagrama de estoque e fluxo da receita de comercialização do crédito carbono no mecanismo de desenvolvimento limpo.

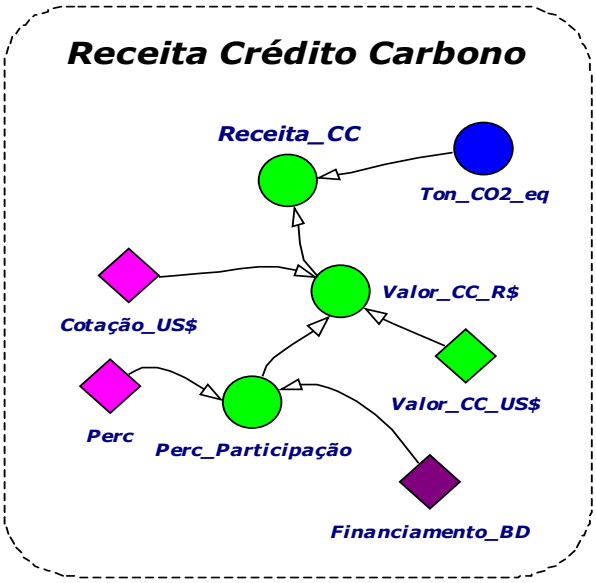

Figura 19: Diagrama de Estoque e Fluxo da Receita de Crédito Carbono.

Tabela 7: Variáveis de DEF da Receita de Crédito Carbono

Variável	Unidade	Descrição
Receita_CC	R$/mês	Receita com a comercialização do crédito carbono
Valor _CC_R$	R$/ton	Valor em R$ por tonelada de CO2 equivalente a ser comercializado
Cotação_US$	R$/US$	Cotação do US$
Perc	%	Percentual de participação na comercialização do crédito carbono
Perc_Participação	%	Percentual de participação na comercialização do crédito carbono dado a tomada de decisão do produtor em financiar ou não o empreendimento
Financiamento_BD	_	Tomada de decisão do produtor em financiar ou não o empreendimento
Valor _CC_US$	US$/ton	Valor em US$ por tonelada de CO2 equivalente a ser comercializado
Ton_CO2_eq	ton/mês	Tonelada de CO2 equivalente
Ton_CH4	ton/mês	Tonelada de CH4 gerado
Ton_N2O	ton/mês	Tonelada de N2O gerado
M Esp Biogas	kg/m³	Massa especifica do biogás
Tx_Biogas Gerado	m³/mês	Taxa de biogás gerado na propriedade
Ton_Biogás	ton/mês	Tonelada de Biogás gerado

O investimento do empreendimento com o grupo gerador e o biodigestor e a instalação do conjunto, no caso haja o financiamento pode ser expresso por 3.18:

$$I^k = \delta \times (\sum_{k=1}^{j} (I^k{}_{MG_2}) + \sum_{k=1}^{j} (I^k{}_{BD}) + \sum_{k=1}^{j} (I^k{}_I)) \qquad (3.18)$$

onde,

I^k_{MG} é o investimento com a aquisição do motor gerador à biogás no período “k”;

I^k_{BD} é o investimento com a aquisição do biodigestor no período “k”;

I^k_I é o investimento com a instalação do conjunto motor gerador e biodigestor à biogás no período “k”.

A figura 20 apresenta o diagrama de estoque e fluxo do investimento no empreendimento da aquisição do motor gerador e biodigestor e instalação do conjunto.

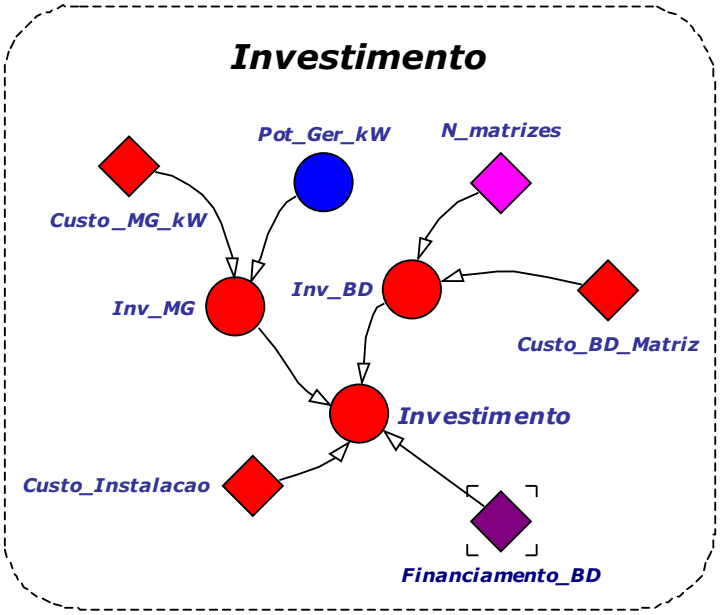

Figura 20: Diagrama de Estoque e Fluxo do Investimento no Empreendimento.

Tabela 8: Variáveis de DEF do Investimento do Empreendimento.

Variável	Unidade	Descrição
Custo_MG_kW	R$/kW	Custo do gerador a biogás associado a potência ativa
Inv_MG	R$	Investimento total com o grupo gerador
Pot_Ger_kW	kW	Potência aparente do gerador à biogás
Custo_Instalação	R$	Custo de instalação do grupo gerador e do biodigestor
Custo_BD_Matriz	R$	Custo com o biodigestor associado ao número de matrizes da propriedade
Inv_BD	R$	Investimento total com o biodigestor
N_matrizes	_	Número de matrizes da propriedade
Investimento	R$	Investimento total com grupo gerador e biodigestor
Financiamento_BD	_	Tomada de decisão do produtor em financiar ou não o empreendimento

3.7.4 Módulo Tomada de Decisão

No processo de tomada de decisão, através do uso dos cenários associados à análise de sensibilidade, busca-se examinar o impacto que

variações nos *input´s*, como receitas, custos operacionais, financiamentos podem ocasionar no valor presente líquido ou em qualquer outro elemento de decisão.

A geração do Fluxo de Caixa a partir das entradas de receitas e despesas é a parte predominante e necessária inferir se o projeto é capaz de remunerar adequadamente o capital investido. Neste módulo são apresentados três métodos de avaliação: o método do Valor Presente Líquido, o método da Taxa Interna de Retorno e o método do *Payback* Descontado.

3.7.4.1. Método do Valor Presente Líquido

O Valor Presente Líquido (VPL) ou método do Valor Atual é um método na qual um projeto de investimento deve ser empreendido se o valor presente de todas as entradas de caixas subtraídos do valor presente de todas as saídas do caixa for maior do que zero.

Esse tipo de técnica desconta os fluxos de caixa da empresa a uma taxa especificada. Essa taxa, frequentemente chamada de taxa de desconto, custo de oportunidade ou custo de capital, refere-se ao retorno mínimo que deve ser obtido por um projeto, de forma a manter inalterado o valor de mercado da empresa.

O valor presente líquido (VPL) é obtido subtraindo-se o investimento inicial do valor presente das entradas de caixa, descontadas a uma taxa igual ao custo de capital da empresa, logo pode ser expresso por:

$$VPL = -I + \sum_{k=1}^{j} \frac{FC_k}{(1+i)^{-k}} \tag{3.19}$$

onde:

FC_k é o montante de caixa recebido e gasto pela propriedade rural, específico para os custos relacionados à geração energia elétrica, no período “k”;

i é taxa requerida de juro;

I é o valor do investimento inicial.

Através do uso do VPL, tanto as entradas como as saídas de caixa são traduzidas para valores monetários atuais.

3.7.4.2. Taxa Mínima de Atratividade - TMA

A taxa mínima de atratividade é utilizada como parâmetro de retorno exigido do investimento, sinalizando ao produtor rural optar ou não pelo mesmo. Sendo assim, a TMA deve ser no mínimo a taxa de juros equivalente à rentabilidade das aplicações correntes de menor risco do investimento.

3.7.4.3. Método da Taxa Interna de Retorno - TIR

A taxa interna de retorno é taxa de desconto que iguala o valor presente dos fluxos líquidos recebidos com o gasto (investimento) inicial, ou seja, aquela que torna o VPL nulo. Pode ser expressa por:

$$0 = -I + \sum_{k=1}^{j} \frac{FC_k}{(1+i)^{-k}} \tag{3.20}$$

A TIR do investimento pode ser:

- Maior do que a TMA, representado que o investimento é economicamente atrativo;
- Igual a TMA, representando que o investimento está economicamente em uma situação de indiferença;
- Menor do que a TMA, representando que o investimento não é economicamente atrativo ao empreendedor.

Entre vários investimentos, o melhor será aquela que tiver maior TIR.

3.7.4.4. Critério de decisão

O valor presente líquido (VPL) e a taxa interna de retorno (TIR) são os métodos mais utilizados para avaliação de investimentos. Estes métodos baseiam-se na análise do fluxo de caixa do investimento, normalmente composto por fluxos monetários negativos (investimentos) no período inicial, seguido de fluxos monetários positivos (receitas).

Quando o VPL é usado para tomar decisões do tipo "aceitar-rejeitar", adotou-se o seguinte critério no modelo proposto:

- Se o VPL > 0 (TIR > i), o que indica que o valor atualizado dos recebimentos é maior que o investimento inicial, logo deve-se aceitar o projeto do empreendimento.

- Se o VPL < 0 (TIR < i), o que indica que o valor atualizado dos recebimentos é menor que o investimento inicial, logo deve-se rejeitar o projeto do empreendimento.

- Se o VPL = 0 (TIR = i), o que indica que o valor atualizado dos recebimentos é igual ao do investimento inicial, logo à escolha entre aceitar e rejeitar o projeto é indiferente.

3.7.4.5. Método de *Payback*

Para aplicar o método PBD (*Payback* Descontado), é necessário definir o tempo máximo TMT, no caso do modelo proposto adotou-se um horizonte de 10 anos, para recuperar o capital investido e remunerado e também que haja apenas uma mudança no sinal dos fluxos de caixa.

Se forem aplicados os procedimentos de cálculo do PBD com taxa requerida igual a zero, têm-se tempo necessário para recuperar apenas o capital investido, ou seja, o *Payback* Simples.

Para decidir se o investimento deve ser aceito o PBD calculado com a taxa requerida “i” deve ser comparado com o TMT, valor de referência, de forma que:

- Se PBD < TMT o projeto deve ser aceito.
- Se PBD > TMT, o projeto não deve ser aceito.

3.8 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os diagramas de laço causal e os diagramas de estoque e fluxo, que permite a estruturação da modelagem do problema de decisão proposta via Técnica de Dinâmica de Sistemas.

O modelo proposto foi estruturado em módulos (técnico, ambiental, econômico e tomada de decisão), dando origem a uma ferramenta de apoio aos produtores rurais que desejam implementar a geração de energia elétrica a partir do biogás em granjas de suínos.

CAPÍTULO 4 – AVALIAÇÃO ECONÔMICA

4.1 Introdução

Neste capítulo é feita a caracterização de uma dada propriedade rural e são apresentados os resultados de avaliação econômica, tomando por base a metodologia de modelagem proposta no capítulo anterior. A análise de sensibilidade permite avaliar a robustez das estratégias adotadas para a tomada de decisão na geração de energia elétrica a partir do biogás.

4.2 Caracterização da Propriedade Rural

Para avaliar o desempenho do modelo desenvolvido neste trabalho, adotou-se como estudo de caso a Fazenda Rancho Alegre localizada no Distrito de Anhanduí, no município de Campo Grande, MS. Esta propriedade já foi alvo de estudos relacionados à análise do balanço energético com o aproveitamento de biogás e de biofertilizante.

A Suinocultura Rancho Alegre produz suínos desde 1983, mas foi a partir de 2004 que aconteceram as inovações mais impactantes, por meio da instalação de biodigestores e do grupo gerador para produção de energia elétrica e queima de gás metano, que é gerado com a biomassa dos animais.

Com 2.300 matrizes, 20 reprodutores na Central de Inseminação Artificial própria e cerca de 42.000 suínos por ano em ciclo completo, a Rancho Alegre passou a trabalhar com desenvolvimento limpo na suinocultura, o que trouxe bons rendimentos, economia e ainda possibilidade de abastecimento de mercados antes considerados carentes como, por exemplo, matéria-prima para produção de farinha e torta de carne para alimentação de suínos.

A propriedade rural possui três células biodigestoras modelo canadense, visualizadas na Figura 21 com capacidade para 1.700 m³ de efluentes cada unidade. São constituídos de dois troncos de pirâmide, escavados no solo, sendo um com 4,85 m de profundidade e o outro com 2,35 m. Cada célula é composta também por duas mantas de PVC flexível de 1 mm

de espessura, uma inferior para evitar infiltrações dos dejetos no solo e outra superior que permite as características anaeróbicas e serve como gasômetro.

Figura 21: Biodigestores modelo canadense

A produção de biogás é obtida através de leituras mensais efetuadas no medidor de vazão de gás da marca Dresser, modelo 7M175. O biogás produzido é parcialmente utilizado pelo grupo motor-gerador que gera energia elétrica para a fábrica de ração, sendo seu excedente queimado pelo *flare* (queimador), conforme ilustrado na Figura 22.

Figura 22: *Flare* (queimador) utilizado para queimar o biogás excedente.

O conjunto motor-gerador movido a biogás, montado e acoplado pelo Grupo *Fockink,* possui capacidade de 90 kVA em regime de emergência. O motor de combustão interna é da marca Mercedes-Benz, modelo OM-366LA, originalmente de ciclo diesel e posteriormente convertido para o ciclo Otto. Sua potência mecânica é de 116 cv e seu consumo é de aproximadamente 36 m^3 de biogás por hora.

O grupo gerador atende a fábrica de ração que possui potência instalada de 60,9 kW e consumo médio mensal em torno de 7.500 kWh. As demais instalações possuem consumo médio mensal de aproximadamente 24.500 kWh e são atendidas pela concessionária de energia elétrica.

A fazenda possui um motor de combustão interna da marca Perkins (também convertido para funcionar com biogás) de aproximadamente 75 cv, usado para bombear o biofertilizante do tanque para o pasto.

Segundo Souza [**14**] o custo de produção da eletricidade com aproveitamento do biogás é composto do capital investido na construção e manutenção do biodigestor e sistema motor/gerador, onde o biodigestor representa cerca de R$ 200,00/suíno

No intuito de avaliar o impacto do investimento em diferentes tecnologias de geração, foram levantado junto ao fabricante [51] o valor do grupo gerador à biogás por kW instalado, conforme ilustrado através da figura 23.

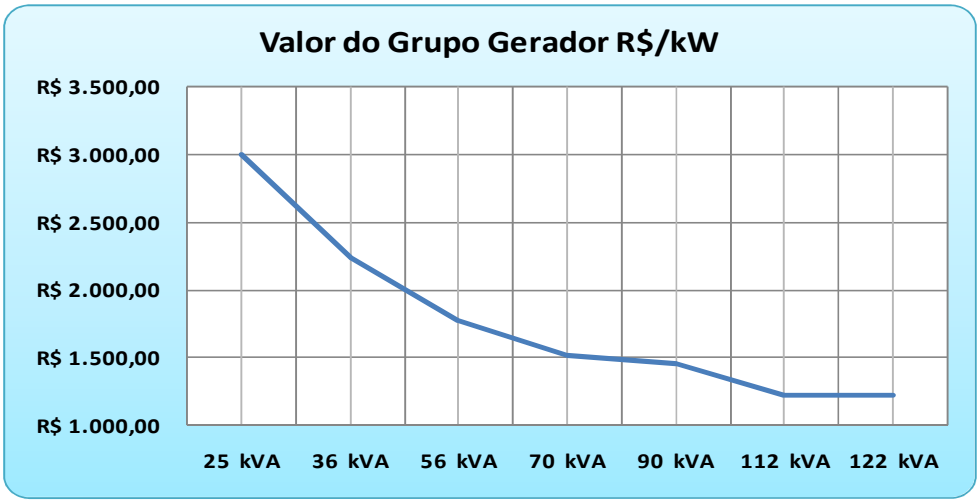

Figura 23: Valor do Grupo Gerador em R$/kW.

A Figura 24 apresenta o diagrama geral de funcionamento dos sistemas de produção de biogás, biofertilizante e energia elétrica.

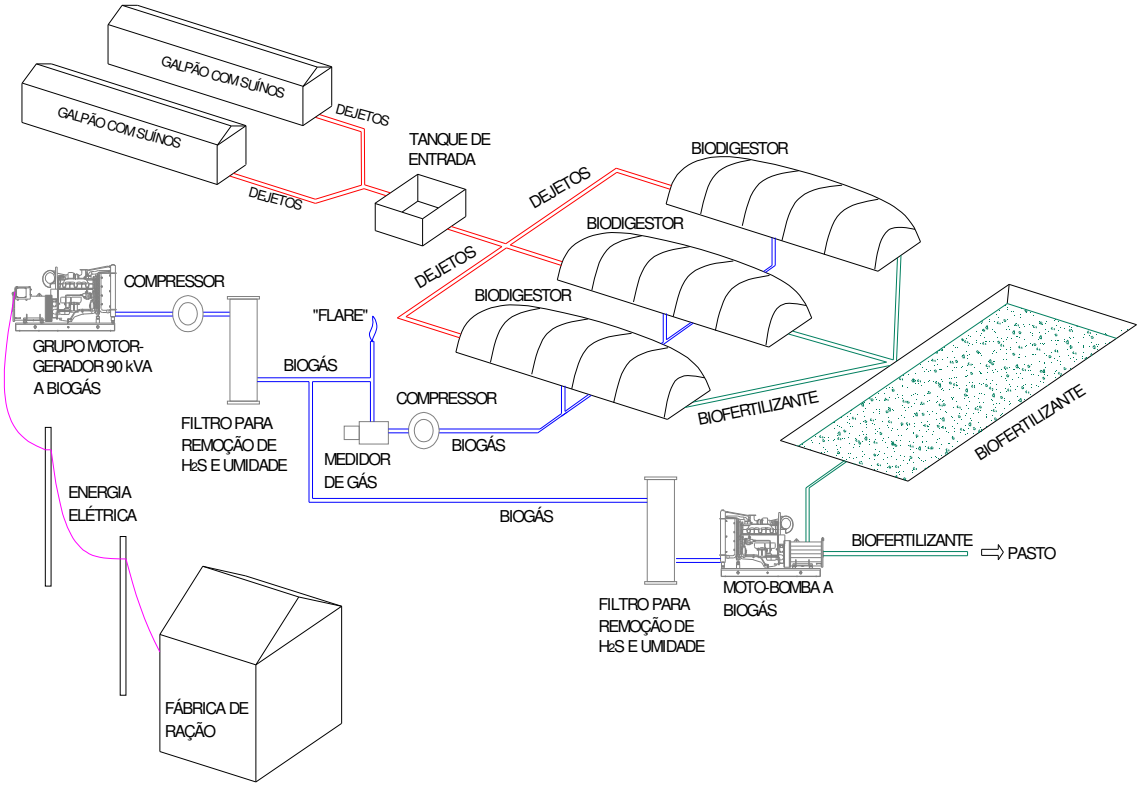

Figura 24: Diagrama esquemático de funcionamento dos sistemas de produção de biogás, biofertilizante e energia elétrica.
Fonte: Nishimura [9]

4.3 Produção do Biogás

A produção de biogás, utilizando-se resíduos da suinocultura, é realizada por meio de biodigestores (reatores anaeróbios), onde o resíduo é geralmente diluído com água de lavagem, constituindo-se no chamado chorume, quantificado em 72 litros por dia/cabeça de suíno e com uma Demanda Química de Oxigênio de 33 g/litro. [52]

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) é utilizada para estimar a produção teórica de metano, Potencial Bioquímico do Metano – Bmp em processos anaeróbios [53]. Segundo Speece e CCE a produção teórica de

metano assume sempre um valor fixo, expresso em função da DQO, onde 1 kg de DQO convertido corresponde a 0,35 m^3 de metano (CH_4). A conversão do chorume em biogás leva em consideração a biodegradabilidade da matéria orgânica (75%), a eficiência de conversão no biodigestor (85%).[54][52]

Um suíno tem uma produção de 72 litros/dia, o que corresponde a uma carga orgânica de 2,376 kg de DQO. Considerando-se as eficiências do processo a produção de metano em função da carga orgânica seria da ordem de 0,504 m^3/cabeça dia, sendo portanto a produção de biogás é de aproximadamente 0,775 m^3 de biogás/cabeça de suíno/dia. [52]

4.4 Configuração do Caso Base

Adotou-se como configuração do caso base a caracterização da Fazenda Rancho Alegre apresentada com 2300 matrizes, para obter a produção de biogás mensal e geração de energia elétrica proveniente do grupo gerador à biogás e capacidade total do biodigestor de 5400 m^3.

O biodigestor opera na propriedade rural durante o ano inteiro, sob condições adequadas de operação e manutenção. Quanto menor for o tempo de operação, maior o custo de geração de energia elétrica, aumentando, com isso, o tempo de retorno do investimento.

Os gastos com O&M (operação e manutenção) durante o ano representam cerca de 4% do investimento total. [14]

4.5 Construção dos Cenários

Frente a um processo de tomada de decisão sob incertezas, torna-se necessário a elaboração de cenários representativos de diferentes estratégias, tais como: decidir por financiar ou não o empreendimento, comercializar ou não a energia elétrica excedente e os créditos carbonos dado a um investimento no grupo gerador e no biodigestor. Neste contexto, optou-se pela construção de um cenário de referência como elemento de análise para avaliação da sensibilidade destas estratégias no desempenho econômico da propriedade.

4.5.1 Simulação de Referência

Para a simulação inicial, considerou-se que o investimento no empreendimento - implantação do biodigestor e do grupo gerador seria financiado por projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL). Dessa forma não haveria investimento inicial por parte do produtor rural. Considerou-se ainda a opção por não vender a energia elétrica excedente, de maneira a não ter gastos com o uso do sistema de distribuição.

A figura 25 pode ilustrar o comportamento do valor presente líquido para cada opção de motor gerador na produção de energia elétrica.

Vale ressaltar que como o empreendimento será financiado, a participação a ser considerada na comercialização dos créditos carbono no mercado de mecanismos de desenvolvimento limpo será de 10% do valor total da receita.

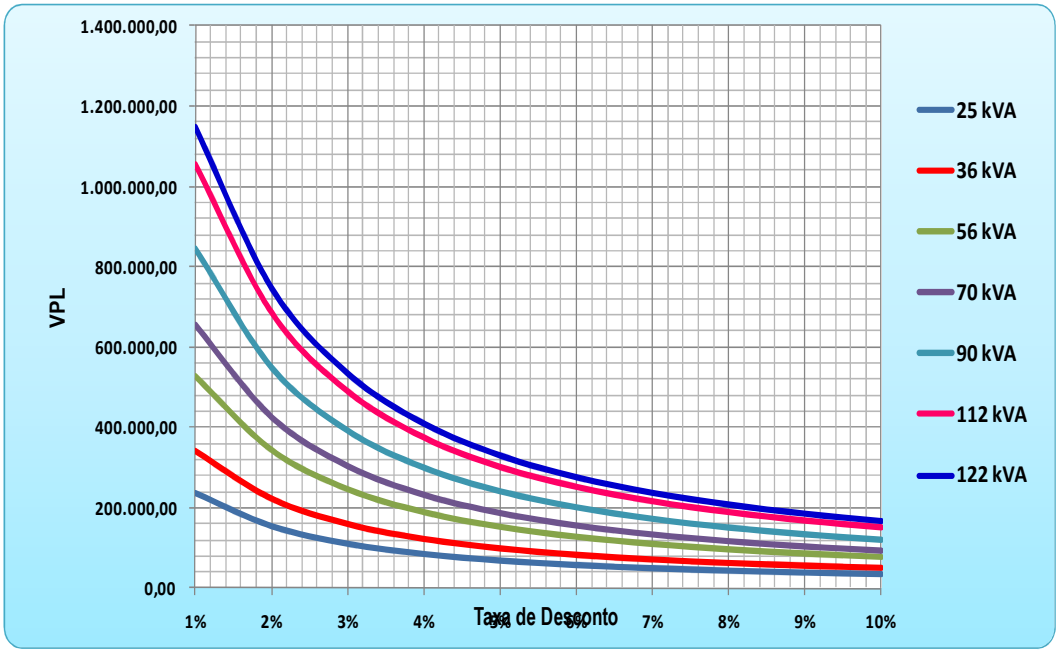

Figura 25: Simulação do empreendimento financiado

É possível observar que o VPL somente será positivo, uma vez que não haverá investimento inicial por parte do produtor rural, logo é um empreendimento de alta atratividade ao produtor, de forma a repassar ao financiador os créditos de carbono gerados por não se emitir gases de efeito estufa para atmosfera.

Em contrapartida, a figura 26 utiliza o mesmo cenário descrito acima, no entanto considera-se que o empreendimento agora será financiado pelo produtor rural. Desta forma haverá gasto com investimento na implantação do biodigestor e grupo gerador. As receitas provenientes da comercialização do crédito carbono serão consideradas 100% do produtor rural.

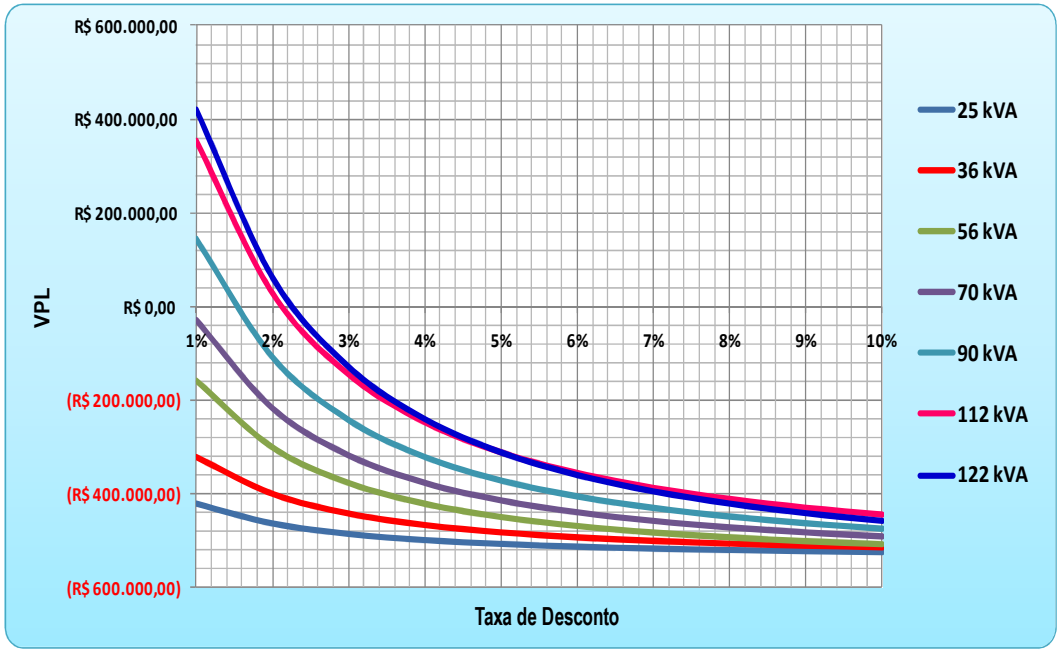

Figura 26: Simulação do empreendimento não financiado.

Neste caso o VPL mostrado, é positivo para grupo geradores acima de 90 kVA, o que indica que o valor atualizado dos recebimentos é maior que o investimento inicial, logo deve-se aceitar o projeto do empreendimento.

No entanto, o investimento de um grupo gerador menor ou igual à 70 kVA, apresenta valores de VPL negativos, apresentando uma TIR inferior à taxa mínima de atratividade, o que indica que o investimento, neste caso, não é atrativo ao produtor rural, mesmo recebendo 100% da receita gerada pela comercialização dos créditos carbono no mercado MDL.

Os resultados apresentados no gráfico da figura 26 podem ser visualizados na tabela 9, na qual é possível observar que para um horizonte simulação de 10 anos, o investimento em grupo gerador igual ou menor a 70 kVA não apresentam atratividade ao produtor, uma vez que não existe um retorno neste período.

Tabela 9: Resultados obtidos do modelo de simulação para a geração de EE.

GRUPO GERADOR	TIR (%)	PAYBACK (MESES)	HORIZONTE DE SIMULAÇÃO
25 kVA	-	-	10 anos
36 kVA	-	-	10 anos
56 kVA	-	-	10 anos
70 kVA	-	-	10 anos
90 kVA	1,50	57	10 anos
112 kVA	2,13	42	10 anos
122 kVA	2,27	41	10 anos

4.5.2 Análise de Sensibilidade

Dentre os diversos fatores presentes na análise de viabilidade econômica, observou-se a influência da venda EE excedente produzida a partir do grupo gerador a biogás em diversas potências,considerando empreendimentos não financiados pelos projetos MDL's, de forma verificar a atratividade do investimento.

A figura 26 apresentada demonstra a simulação para o empreendimento não financiado, na qual se mostra atrativo para a utilização de grupo gerador de potência igual ou maior a 90 kVA, no entanto sem a comercialização da energia elétrica excedente.

Dessa forma, para comparar o cenário apresentado anteriormente, foi realizada simulação do empreendimento, observada na figura 27, considerando as mesmas potências do grupo gerador, no entanto foi considerada a comercialização de energia elétrica excedente produzida.

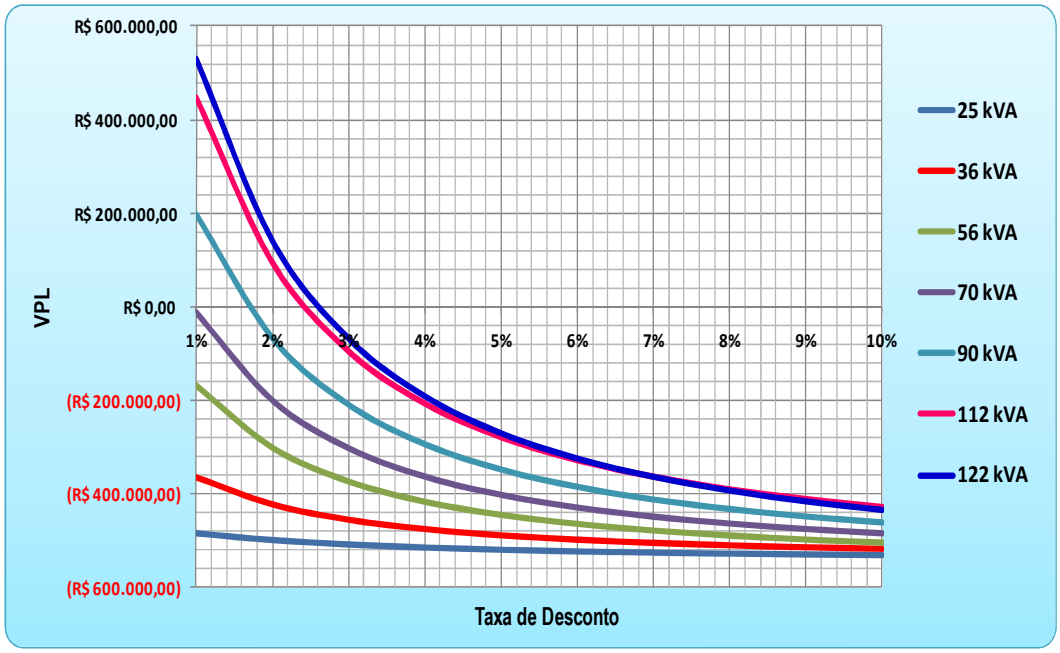

Figura 27:Simulação do empreendimento com comercialização de Energia Elétrica.

A figura 27 mostra que, da mesma forma como a simulação anterior, o empreendimento é atrativo ao produtor, quando utilizado grupo gerador de potência maior que 90 kVA. Entretanto, o valor presente líquido é cerca de 20% maior quando ocorre a comercialização da energia.

É possível verificar também que os geradores com potência de 70 kVA não conseguem produzir energia elétrica excedente, mas produzem energia elétrica apenas para abastecer a propriedade, uma vez que a potência do gerador é baixa em relação à quantidade de biogás produzido. Logo, o biogás gerado não utilizado é queimado no *flare* da propriedade.

Os resultados apresentados no gráfico da figura 27 podem ser visualizados na tabela 10, para um horizonte simulação de 10 anos.

Tabela 10: Resultados obtidos do modelo de simulação para a geração de EE considerando a comercialização da produção excedente.

GRUPO GERADOR	TIR (%)	PAYBACK (MESES)	HORIZONTE DE SIMULAÇÃO
25 kVA	-	-	10 anos
36 kVA	-	-	10 anos
56 kVA	-	-	10 anos
70 kVA			10 anos
90 kVA	1,68	55	10 anos
112 kVA	2,43	41	10 anos
122 kVA	2,61	39	10 anos

Na tabela 10 verifica-se que o tempo de retorno do investimento é menor quando comercializado a energia elétrica mesmo com os gastos no uso do sistema de distribuição da concessionária local.

Para não se obter desperdício e/ou queima do biogás foi considerado um novo cenário de forma a utilizar todo o biogás gerado, com a utilização de dois geradores de mesma potência na propriedade. A figura 28 demonstra a simulação deste cenário.

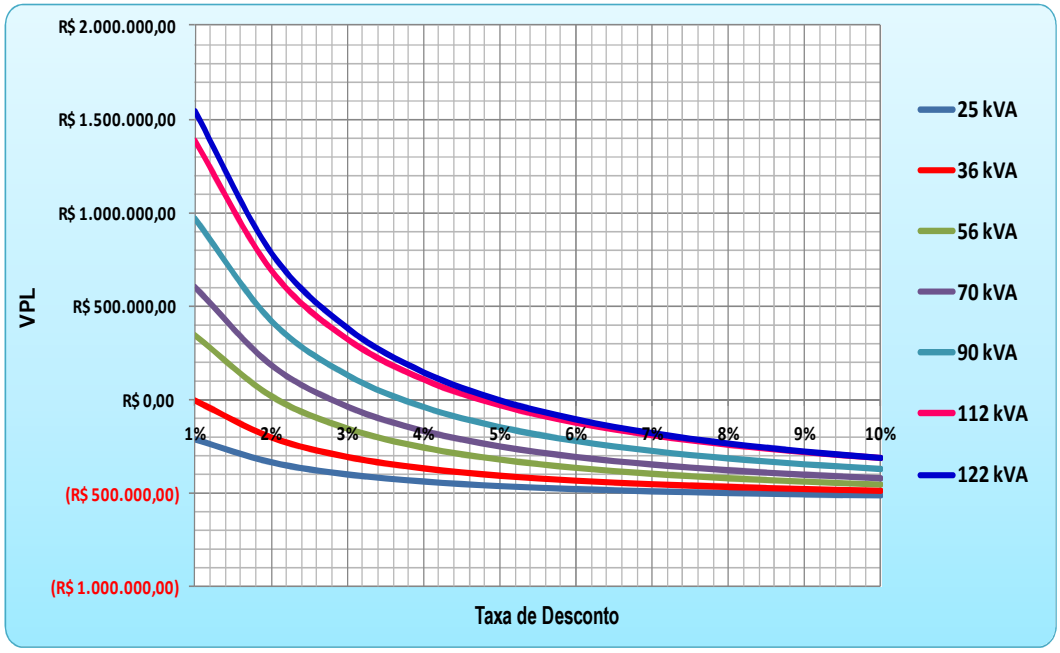

Figura 28: Geração de EE com utilização de dois grupo geradores de mesma potência.

Os resultados apresentados no gráfico da figura 28 podem ser visualizados na tabela 11, para um horizonte simulação de 10 anos.

Tabela 11: Resultados obtidos do modelo de simulação para a geração de EE utilizando dois grupos geradores de mesma potência.

GRUPO GERADOR	TIR (%)	PAYBACK (MESES)	HORIZONTE DE SIMULAÇÃO
2x25 kVA	-	-	10 anos
2x36 kVA			10 anos
2x56 kVA	2,10	44	10 anos
2x70 kVA	2,81	34	10 anos
2x90 kVA	3,72	27	10 anos
2x112 kVA	4,75	21	10 anos
2x122kVA	4,99	20	10 anos

Analisando o gráfico da figura 28 e a tabela 11, ao utilizar dois geradores de 56 kVA o investimento já se mostra atrativo ao produtor, tendo seu retorno de investimento em 44 meses e uma TIR de 2,10%.

Criado estes cenários, analisou-se ainda o comparativo no investimento de um grupo gerador de 112 kVA e dois grupos geradores de 56 kVA. A figura 29 demonstra os resultados obtidos.

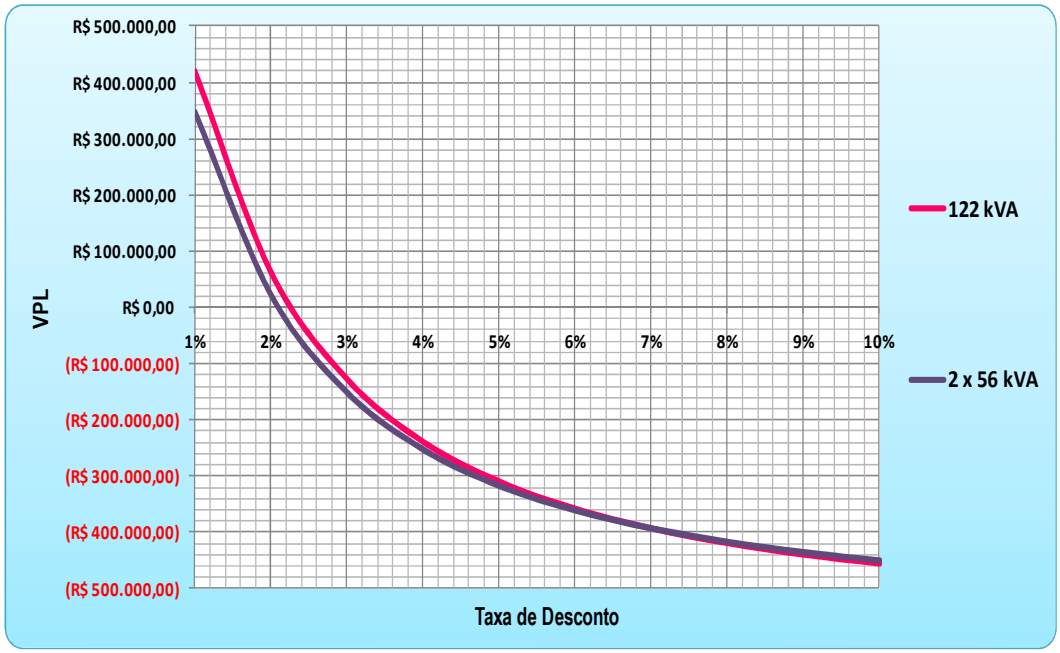

Figura 29: Comparativo do investimento em um Grupo Gerador de 112 kVA e dois Grupos Geradores de 56 kVA

O tempo de retorno do investimento e a taxa interna de retorno podem ser visualizados na tabela 12.

Tabela 12: Resultados do comparativo no investimento em um gerador de 112 kVA e dois geradores de 56 kVA.

GRUPO GERADOR	TIR (%)	PAYBACK (MESES)	HORIZONTE DE SIMULAÇÃO
122 kVA	2,27	41	10 anos
2x56 kVA	2,10	44	10 anos

Os dois investimentos analisados são atrativos ao produtor, no entanto com a utilização de apenas um grupo gerador de 122 kVA, o tempo do retorno do investimento é de três meses antes do investimento em dois grupos geradores de 56 kVA. A taxa interna de retorno é de 0,17% maior e o valor presente líquido cerca de 2,1% acima do segundo caso. Isso ocorre devido ao investimento inicial para aquisição e instalação de dois grupos geradores de 56 kVA serem consideravelmente maior que o investimento em um grupo de 112 kVA.

Para um investimento com a associação dos mesmos grupos geradores, no entanto considerando a comercialização de energia elétrica excedente, pode-se verificar o gráfico da figura 30 e TIR na tabela 13 apresentada.

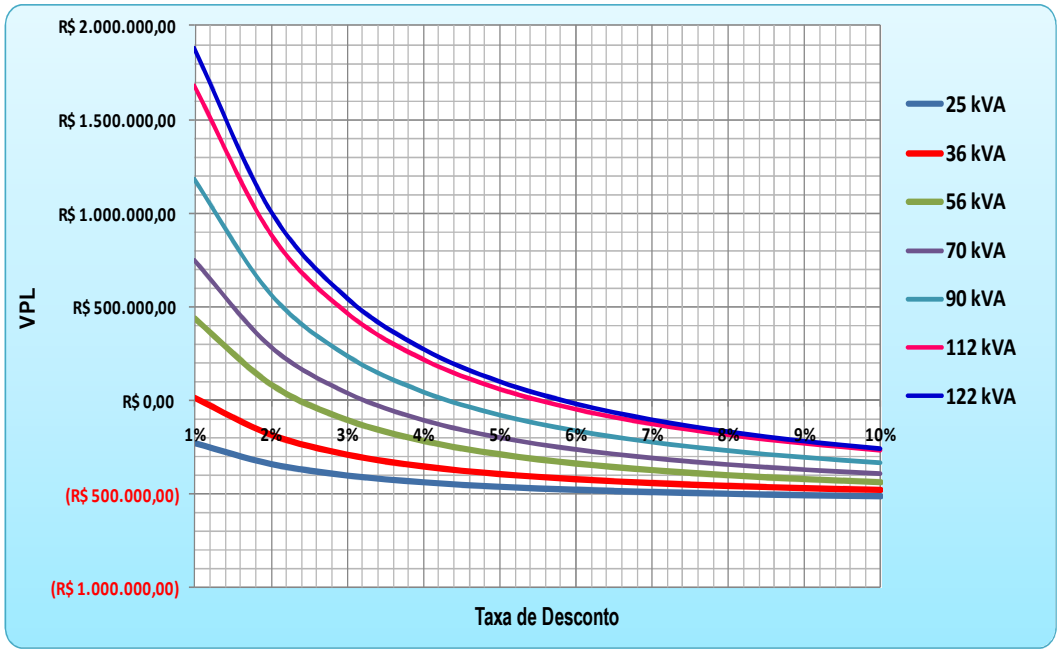

Figura 30: Geração com utilização de dois grupos geradores de mesma potência considerando a comercialização de Energia Elétrica Excedente.

Tabela 13: Resultados obtidos do modelo de simulação para a geração de EE utilizando dois grupos geradores de mesma potência e considerando a comercialização da produção excedente.

GRUPO GERADOR	TIR (%)	PAYBACK (MESES)	HORIZONTE DE SIMULAÇÃO
2x25 kVA	-	-	10 anos
2x36 kVA	1,06	75	10 anos
2x56 kVA	2,40	42	10 anos
2x70 kVA	3,24	32	10 anos
2x90 kVA	4,31	24	10 anos
2x112 kVA	5,53	19	10 anos
2x122kVA	5,84	17	10 anos

A figura 30 apresenta os resultados da modelagem para a utilização de dois grupos geradores de mesma potência para a produção de energia elétrica, considerando a comercialização do excedente, além da comercialização do crédito carbono no mercado MDL.

Verifica-se que o empreendimento já se torna atrativo a partir o investimento de dois grupos geradores de 36 kVA e tem um tempo de retorno de 75 meses. Vale ressaltar que diferente do caso em se utilizar dois grupos geradores sem a comercialização de energia, onde o investimento só se mostra atrativo a partir da utilização de dois grupos de 56 kVA.

Com relação ao comparativo entre o investimento de um grupo gerador de 112 kVA ou dois de 56 kVA, neste caso considerando a comercialização de energia, podendo ser verificado na figura 31, observa-se que apesar dos dois casos serem atrativos ao produtor rural, o investimento no primeiro apresenta maior VPL que no segundo caso, da mesma forma como ocorreu quando não se considerava a comercialização de energia.

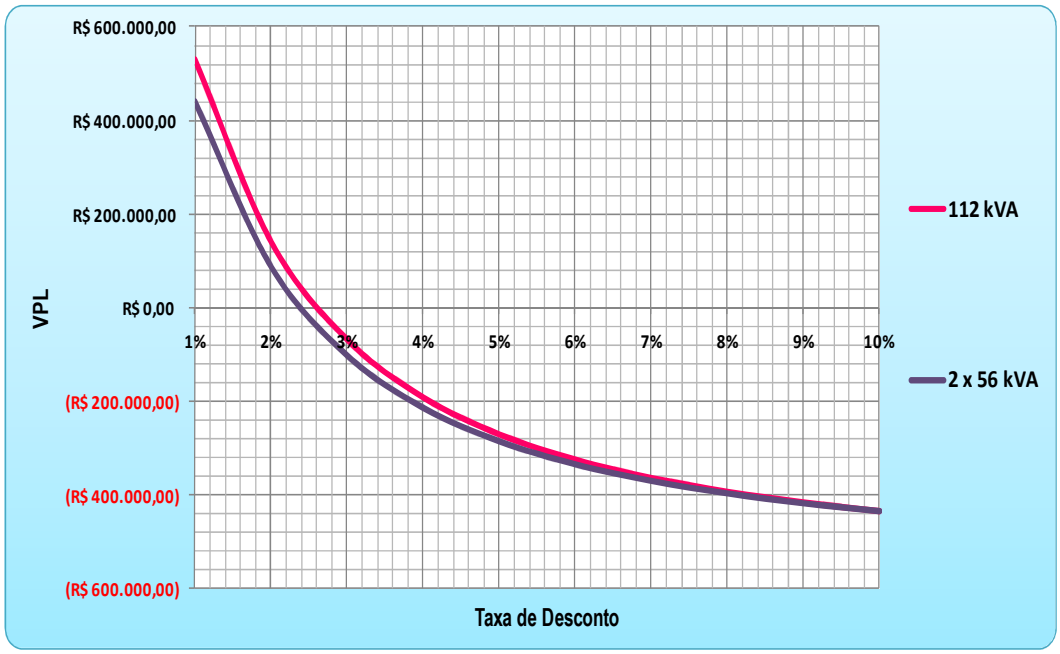

Figura 31: Comparativo do investimento em um Grupo Gerador de 112 kVA e dois Grupos Geradores de 56 kVA considerando a comercialização de EE.

A tabela 14 demonstra o tempo de retorno do investimento para o cenário apresentado.

Tabela 14: Resultados do comparativo no investimento em um gerador de 112 kVA e dois geradores de 56 kVA considerando a comercialização de EE.

GRUPO GERADOR	TIR (%)	PAYBACK (MESES)	HORIZONTE DE SIMULAÇÃO
122 kVA	2,61	39	10 anos
2x56 kVA	2,40	42	10 anos

Comparando os dois casos verifica-se que ao investir no primeiro caso o retorno é de 3 meses antes do segundo e a taxa interna de retorno é de 0,21% maior. E comparando com o investimento em 112 kVA comercializando a energia excedente o retorno do investimento é de dois meses antes e apresenta VPL 21% maior.

Analisou-se ainda a viabilidade de se investir inicialmente em apenas um grupo gerador de 56 kVA e após três anos, agregar um segundo gerador de 56 kVA ao empreendimento, uma vez que o produtor já estaria gerando receitas com a utilização deste primeiro. Dessa forma foi possível a comparação a um investimento inicial de um grupo gerador de 112 kVA e pode ser verificada na figura 32.

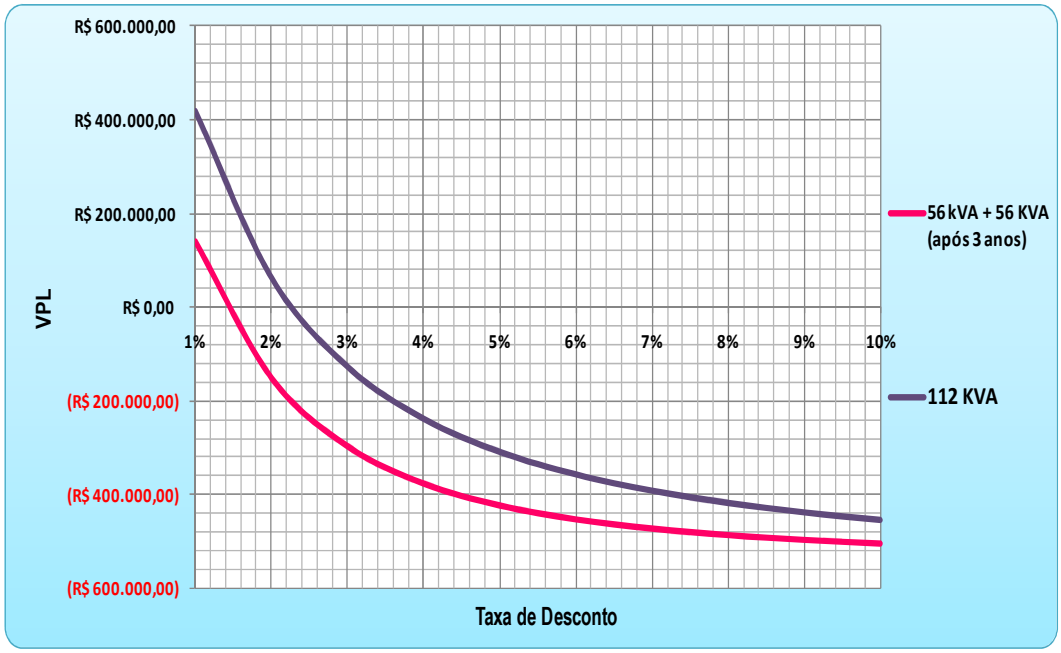

Figura 32: Comparativo do investimento em um Grupo Gerador de 112 kVA e um Grupo Gerador de 56 kVA mais um Grupo Gerador de 56 kVA após três anos do investimento inicial.

Observa-se que o investimento em um grupo gerador de 56 kVA e após três anos realizar um novo investimento em um grupo de mesma potência apresenta-se como um cenário atrativo ao produtor rural. No entanto, ao se investir em apenas um grupo gerador de 112 kVA é ainda mais atrativo por apresentar uma taxa interna de retorno cerca 0,8 % maior.

4.6 Considerações Finais

Conforme proposto inicialmente, as avaliações das diversas simulações demonstram que a análise econômica para o investimento na produção de energia elétrica a partir de biogás é de suma importância ao produtor rural, constituindo de um instrumento essencial para a avaliação de desempenho e observância dos indicadores das perspectivas econômicas das alternativas, indispensáveis à tomada de decisão.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com a realização deste trabalho, além de sugerir algumas recomendações para os trabalhos futuros.

5.2 Conclusões

O desenvolvimento de uma ferramenta computacional de simulação é fundamental para a tomada de decisão do produtor rural. Logo este trabalho cumpriu os objetivos ao desenvolver o modelo de simulação, identificando e estabelecendo as relações de causa e efeito entre os principais elementos integrantes do sistema tendo como foco a Geração de Energia Elétrica.

A partir da Técnica de Dinâmica de Sistemas foi possível analisar a sensibilidade do processo de tomada de decisão tendo em vista os cenários associados às diferentes estratégias operacionais. No problema da tomada de decisão, representado pelo DLC foram considerados os principais aspectos básicos na decisão do investidor: o investimento em tecnologia (grupo motor gerador) e o investimento em capacidade do biodigestor.

Os cenários simulados consideraram o financiamento ou não do empreendimento por projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo, a geração de energia elétrica para consumo da propriedade, a comercialização de energia elétrica excedente e a comercialização dos créditos carbonos nos mercados de MDL´s.

Verificou-se que a maior atratividade ao produtor rural se dá quando o empreendimento é implantado em sua propriedade a partir de projeto MDL´s, uma vez que não haverá investimento inicial por parte do produtor.

No entanto ao se optar pelo financiamento, para que se tenha êxito na geração de energia a partir do biogás, inclusive com venda de seus excedentes e créditos carbonos, os produtores precisam simular os diversos cenários, de modo que possam maximizar os lucros e, consequentemente, diminuir o tempo de retorno dos investimentos necessários para a implantação de biodigestores e grupo geradores.

No caso dos cenários propostos, verificou-se que para uma mesma potência aparente, a utilização de um grupo gerador apresenta melhor atratividade do que quando utilizado dois grupos, considerando ainda a comercialização de energia elétrica excedente e dos créditos carbonos no mercado MDL. E até mesmo quando o investimento em dois grupos é realizado em duas etapas, conforme apresentado nos cenários simulados.

Dessa forma, é possível verificar que o aplicativo é uma ferramenta muito importante na tomada de decisão aos criadores de suínos que desejam implantar o tratamento dos dejetos utilizando biodigestores e consequentemente, a geração de energia elétrica.

5.3 Recomendações para Trabalhos Futuros

Este trabalho se propôs a criar modelo de simulação para analisar a viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás gerado da biomassa dos suínos em uma propriedade rural.

Em complementação ao trabalho exposto, sugere-se aqui analisar as influências dos aspectos regulatórios na viabilidade do sistema de geração distribuída e a comercialização da energia elétrica produzida por geradores à biogás nos diversos ambientes de contratação.

Por fim, recomenda-se a implementação de aplicativos utilizando a técnica de dinâmica de sistemas, porém considerando a geração de biogás a partir de tratamento da biomassa de outros sistemas, como bovinocultura, caprinocultura e esgoto doméstico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] IBGE - INSTUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA *Banco de Dados da Produção Pecuária de 2008*. Acesso em 10 de maio de 2010. Disponível em www.ibge.gov.br.

[2] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Agropecuário 1995-1996*, n.23, Mato Grosso do Sul. Rio de Janeiro: IBGE, 1998.

[3] IPCC. Intergovernamental Panel on Climate Change. In: *Módulo 6 - Lixo - Guia para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa* (Vol. 2). 1996.

[4] GASPAR, R. M. *Utilização de Biodigestores em Pequenas e Médias Propriedades Rurais, com Ênfase na Agregação de Valor: Um Estudo de Caso na Região de Toledo-PR*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis - SC. 2003.

[5] ARAUJO, A. C. P. *Como Comercializar Créditos de Carbono*. São Paulo – SP. BDO Trevisan Editora Universitária. 2006.

[6] LIMA, P. C.R. *Biogás da Suinocultura: Uma Importante Fonte de Geração de Energia*. Consultoria Legislativa , pp. 26. Brasília –DF. 2007.

[7] HENN, A. *Avaliação de Dois sistemas de Manejo de Dejetos em uma Pequena Propriedade Produtora de Suínos – Condição de Partida*. Dissertação (mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2005.

[8] OLIVEIRA, P. A. V. & HIGARASHI, M. M. Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos. Projeto Embrapa de controle da degradação ambiental decorrente da suinocultura em Santa Catarina. Concórdia –SC. 2006.

[9] NISHIMURA, R. *Análise De Balanço Energético De Sistema De Produção De Biogás Em Granja De Suínos: Implementação De Aplicativo Computacional.* Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2009.

[10] ANGONESE, A. R. & CAMPOS, A. T. *Uso de Energia em unidade suinícola em sistema de terminação com tratamento de resíduos*. In: 6° Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural . 2006.

[11] CARVALHO, T., & NOLASCO, M. A. *Créditos de Carbono e Geração de Energia com Uso de Biodigestores no Tratamento de Dejetos de Suínos*. Curitiba-PR. 2006.

[12] SILVA, P. P.; ORTEGA, J. M. & PATRÍCIO, C. M. M. M. A*dvantages, Incentives and Obstacles to Cogeneration of Eletric Power Derived from Sugar Cane Bagasse in the State of Mato Grosso do Sul*. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. 2006.

[13] LINDEMEYER, R. M. *Análise da viabilidade econômico-financeira do uso do biogás como fonte de energia elétrica*. Trabalho de Conclusão de Estágio apresentada à disciplina de Estágio Supervisionado, como requisito parcial para obtenção de grau de Bacharel em Adminstração da Universidade Federal de Santa Cararina, Florianópolis, 2008.

[14] SOUZA, S. N. M.; PEREIRA, W. C.; NOGUEIRA, C. E. C.; PAVAN, A. A. & SORDI, A. *Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura*. Universidade do Oeste do Paraná, CCET, Cascavel - PR. 2005

[15] LASLOWSKI, M. A. *Avaliação Ambiental e Econômica do Biogás, obtido através da Biodigestão Anaeróbia dos Dejetos da Suinocultura*. Pontifícia Universidade Católica do Paraná, CCET, Curitiba – PR, 2004.

[16] VANZIN, E; PANDOLFO, A.; LUBLO, R.; STEFFENON, B.; PANDOLFO, L.M. *Uso do Biogás em Aterro Sanitário como Fonte de Energia Alternativa: Aplicação de Procedimento para Análise da Viabilidade Econômica no Aterro Sanitário Metropolitano Santa Tecla*. Universidade de Passo Fundo, PPGENG, Passo Fundo - RS,2007.

[17] FERNADES, C. A.; SILVA, L. C.; PEREIRA, J. O. & YAMAGUCHI, M. M. *Simulação da Dinâmica Operacional de uma Linha Industrial de Abate de Suínos*. Campinas - SP. 2006.

[18] PLÀ-ARAGONÉS, L. M.. *A Stochastic Model for Planning Swine Facilities*. University of Lleida - Spain. 2005.

[19] ORTEGA, J. M. *Gestão de Centrais Termelétricas a GN em Ambiente Competitivo: Uma Abordagem via Dinâmica de Sistemas*. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis - SC. 2001.

[20] SILVA*, Influência Dos Aspectos Regulatórios No Processo De Tomada De Decisão Em Sistemas De Cogeração De Energia Elétrica: Um Estudo De Caso Do Setor Sucroalcooleiro De Mato Grosso Do Sul.*Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2009.

[21] LOURENZANI, W.L.; SILVA, C. A. B.; *Sustentabilidade de Empreendimentos Agroindustriais de Pequeno Porte: uma Aplicação de Sistemas Dinâmicos*. In: Congresso e Mostra de Agroinformática. P. 9.. 1999.

[22] COSTA, D. F. *Biomassa como fonte de energia, conversão e utilização.* (Monografia).Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2002.

[23] 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.* Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2006.

[24] OLIVEIRA, P. A. V.; HIGARASHI, M. M.; MATEI, R. M. et al. *Uso dos Resíduos de Sistema de Crescimento e Terminação de Suínos para a Produção de Biogás*. In: Congresso Brasileiro de Veterinários Especialistas em Suínos, Fortaleza, 2005. Anais... Fortaleza: Associação Brasileira dos Veterinários Especialistas em Suínos, 2005.

[25] KUNZ, A., PERDOMO, C., & OLIVEIRA, P. Biodigestores: *Avanços e Retrocessos*. In: Suinocultura Industrial. pp. 14-16. Porto Feliz. 2004.

[26] DEGANUTTI,R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. *Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada*. Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. Bauru – SP, 2000.

[27] CARVALHO, T., & NOLASCO, M. A. *Créditos de Carbono e Geração de Energia com Uso de Biodigestores no Tratamento de Dejetos de Suínos*. Curitiba-PR. 2006.

[28] SANTOS, G. *Sistema Brasileiro de Respostas Técnicas*. Acesso em 14 de novembro de 2007, disponível em Ministério da Ciência e Tecnologia: http://sbrtv1.ibict.br/upload/sbrt436.pdf?PHPSESSID=88b1b4d2cd3443f5ba7c6b29362aed16

[29] CHERNICHARO, C. A. *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Reatores Anaeróbios* . DESA: Belo Horizonte. 2ª ed. 1997.

[30] LUCAS JR., J. *Algumas Considerações sobre o Uso do Estrume de Suínos como Substrato para Três Sistemas de Biodigestores Anaeróbios*. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Universidade Estadual Paulista – UNESP. Jaboticabal. 1994.

[31] PEREIRA, R. H.. *Geração Distribuída de Energia Elétrica – Aplicação de Motores Bicombustível Diesel/Gás Natural*. 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás .Salvador - BA. 2005.

[32] OBERT, E. F. *Motores de Combustão Interna*. Porto Alegre - RS: Globo. 1971.

[33] PROINFA.. *Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia*. 2006.

[34] RODRÍGUEZ, C.. *Mecanismos Regulatórios, Tarifários e Econômicos na Geração Distribuída: O Caso dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede*.

Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica - SP . 2002.

[35] HOFF, T., WENGER, H., & PEPPER, J. *Distributed Generation: An Alternative to Eletric Utility Investments in System Capacity*. Great Britain. 1996.

[36] JOTZO, M. e MICHAELOWA, K. *Cadernos NAE - Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República* – nº 4, In:II Simpósio Latino Americano sobre Fixação de Carbono, Curitiba, 24 de abril de 2004. .

[37] ULGIATI, S.; BROWN, M.T.. *Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions – The case of electricity production.* J. Cleaner Production, v.10, 2002..

[38] PIDD, M. *Modelagem Empresarial - Ferramentas para Tomada de Decisão*. Porto Alegre - RS: Bookman. 1998.

[39] FLOOD, R., & JACKSON, M. *Creative Problem Solving: Total Systems Intervention*. In: John Wiley & Sons. 1997.

[40] FORRESTER, J. W. *Industrial Dynamics*. Portland: Productivity Press. 1961.

[41] SAITO, J. R. *Análise de cadeias agroindustriais utilizando simulação computacional baseada na tecnologia System Dynamics: Um estudo de caso*. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos – SP. 2000.

[42] SENGE, P. M. Quinta Disciplina; Arte, *Teoria e Prática da Organização de Aprendizagem*. São Paulo: Best Seller. 1990.

[43]SENGE, P. M. Quinta Disciplina – Caderno de Campo. São Paulo - SP: Qualitymark. 1997.

[44] CASSEL, R. A. *Desenvolvimento de uma abordagem para a divulgação da simulação no setor calcadista gaúcho*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS. 1996.

[45] PIDD, M. *Modelagem Empresarial - Ferramentas para Tomada de Decisão*. Porto Alegre - RS: Bookman. 1998.

[46] LAW, A. M., & KELTON. Simulation, modeling and analysis. McGraw-Hill, 2º Ed. 1991.

[47] ANDRADE, A. L.. *Pensamento Sistêmico: um roteiro básico para perceber as estruturas da realidade organizacional*. Acesso em 23 de jul de 2007, disponível em Revista Eletrônica de Administração (READ). PPGEP/UFRGS. Porto Alegre - RS: http://read.adm.ufrgs.br/read05/artigo/andrade.htm.

[48] GOODMAN, M. R. *Study Notes in System Dynamics*. Portland: Productivity Press. 1989.

[49] ORTEGOSA, C. Z. *Metodologia para estudos da viabilidade econômico-financeira no uso do gás natural em instalações prediais residenciais: uma abordagem via dinâmica de sistemas.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Elétrica. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande - MS. 2006

[50] CARDOZO, C. M. *Operação de sistemas hidroelétricos em ambiente competitivo: uma abordagem da gestão empresarial via simulação estocástica e dinâmica de sistemas*. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis - SC. 2000.

[51] FOCKINK – Fabricantes de Grupos Geradores a Biogás. Acesso em 30 de abril de 2010. Disponível em www.fockink.ind.br.

[52] CCE - CENTRO PARA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA. *Guia Técnico do Biogás*. Algés: JE92 Projectos de Marketing Ltda, 2000.

[53] OWEN, W.F. Bioassay for monitoring biochemical Methane potential and anaerobic toxicity. *Water Res.*, Oxford, v. 13, n. 6, p. 485-492, 1979.

[54] SPEECE, R. E. *Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters*. Tennessee/Nashville: Archae Press, 1996.