

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

RAFAEL GUIMARÃES AMARAL

**VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UM
SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR
DE BIOGÁS GERADO EM UM ABATEDOURO DE AVES
Trabalho De Diplomação**

MEDIANEIRA

2011

RAFAEL GUIMARÃES AMARAL

**VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UM
SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR
DE BIOGÁS GERADO EM UM ABATEDOURO DE AVES**

Trabalho De Diplomação

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel do Curso de Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Campus Medianeira.

Orientador: Laercio Mantovani Frare
Co-orientador: José Airton Azevedo dos Santos.

MEDIANEIRA

2011

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE ENSINO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
COORDENAÇÃO DE ENGENARIA DE PRODUÇÃO**

TERMO DE APROVAÇÃO

VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE BIOGÁS GERADO EM UM ABATEDOURO
DE AVES

Por

RAFAEL GUIMARÃES AMARAL

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentada às h do dia de de 2011 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Medianeira. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho

—
Prof. Dr. Laercio Mantovani Frare
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná
(Orientador)

—
Prof. Dr. Rafael Arioli
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná

—
Prof. Dr. José Airton dos Santos
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná
(Co-Orientador)

—
Prof. MSc Lotário Fank
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Laercio Mantovani Frare, braço amigo de todas as etapas deste trabalho.

A minha família, pela confiança e motivação.

Aos amigos e colegas, pela força e pela vibração em relação a esta jornada.

Aos professores e colegas de Curso, pois juntos trilhamos uma etapa importante de nossas vidas.

À Cooperativa Agroindustrial LAR, pela abertura da empresa para a realização do trabalho.

A todos que, com boa intenção, colaboraram para a realização e finalização deste trabalho.

*“Happiness is not true unless
shared”*

Christopher McCandless

RESUMO

AMARAL, Rafael Guimarães. **VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE BIOGÁS GERADO EM UM ABATEDOURO DE AVES. 2011.** 66 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) apresentado à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2011.

Recentemente, a biomassa residual vem ganhando um grande campo de estudo, pois ela pode ser utilizada como fonte alternativa de energia. Citando como exemplo, o aproveitamento do biogás gerado em lagoas anaeróbias de indústrias, pois é um processo que pode ser avaliado quanto à capacidade de aproveitamento energético e geração de receita. Sabendo disso, o trabalho teve como objetivo estudar o processo de geração de energia elétrica a partir do biogás gerado em biodigestores adaptados de lagoas anaeróbias de um frigorífico de aves, bem como avaliar a possibilidade desse empreendimento entrar no mercado de carbono. A partir do modelo de geração de metano em lagoas anaeróbias, foi avaliado o potencial de geração de biogás pelo efluente. Utilizando a metodologia da anualização dos custos de investimento, tanto do processo de captação do biogás, quando do processo de geração de energia, pode-se atribuir um valor ao biogás e a energia elétrica gerada pelo sistema. O processo estudado já está em funcionamento, contando com 2 biodigestores e 3 motogeradores. Para a quantificação da redução de toneladas de carbono, utilizou-se a metodologia ASM-III.H. A partir da metodologia utilizada, encontrou-se um potencial de geração de biogás de aproximadamente 84 m³ de biogás, e a partir dessa quantidade de gás, encontrou-se um custo de R\$ 0,161 por m³ de biogás gerado e R\$ 0,415 por KWh de energia elétrica gerada pelo sistema, considerando um tempo de amortização de 10 anos. Conhecendo-se as tarifas aplicadas pela concessionária de energia, obteve-se uma taxa de retorno (TIR) de 4,88%, para um tempo de amortização de investimento de 10 anos, que quando comparada a taxa de juros aplicada ao investimento de 7%, conclui-se que esse processo não é viável economicamente. Entretanto, essa empresa se encaixa no âmbito MDL, tendo possibilidade de entrada no mercado de carbono, resultando numa redução de 9.860 toneladas de carbono por ano, gerando uma receita de aproximadamente R\$ 242.572,00 ao ano, viabilizando completamente o investimento, apresentando um VPL de R\$ 1.611.815, 23 e uma TIR de 36,5%.

Palavras-chave: Biogás, Geração de Energia Elétrica, Análise de Investimento.

ABSTRACT

AMARAL, Rafael Guimarães. **ECONOMIC FEASIBILITY OF IMPLEMENTATION OF ELECTRICITY PRODUCTION FROM BIOGAS GENERATED IN POULTRY SLAUGHTER.** 2011. 66 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) apresentado à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2011.

Recently, the residual biomass is becoming a major field of study because it can be used as an alternative source of energy. Citing as an example, the use of the biogas generated in anaerobic lagoons of industries, it is a process that can be evaluated for their ability to use energy and revenue generation. Knowing this, the work was to study the process of generating electricity from biogas generated in anaerobic digesters ponds adapted for a fridge of birds as well as the possibility of this venture into the carbon market. From the model of methane generation in anaerobic lagoons, we evaluated the potential for generation of biogas effluent. Using the methodology of the annualized cost of investment, both the capture of the biogas process when the process of power generation, you can assign a value to biogas and electricity generated by the system. The process studied is already in operation, with two digesters and three motor generators. To quantify the reduction in tons of carbon, we used the methodology ASM-III.H. Based on the methodology used, we found a potential to generate biogas from approximately 84 cubic meters of biogas, and from that amount of gas, he met a cost of R \$ 0.161 per m³ of biogas and R \$ 0.415 per kW of electricity generated by the system, considering a payback time of 10 years. Knowing the rates applied by the power utility, we obtained a rate of return (IRR) of 4.88% for an investment payback time of 10 years, compared to the interest rate applied to the investment of 7 %, it is concluded that this process is not economically viable. However, the company falls under the CDM, with possibility of entering the carbon market, resulting in a reduction of 9,860 tons of carbon per year, generating revenues of approximately R \$ 242,572.00 a or years, enabling the full investment, suggesting a NPV of R \$ 1,611,815, 23 and an IRR of 36.5%

Keywords: Biogas, Electricity Generation, Investment Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do processo de abate de aves.	18
Figura 2 – Desenho esquemático de uma lagoa anaeróbia.	20
Figura 3 – Esquematização do metabolismo e os grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.	21
Figura 4 – Vista aérea da empresa em estudo.	36
Figura 5 – Fluxograma básico do processo de geração de biogás e energia elétrica.	38
Figura 6 – Limites do projeto para o cálculo da Linha de Base.	44
Figura 7 – Projeto de transformação das lagoas concluído (cálculo de emissões do projeto)	45
Figura 8 – Confronto entre a estimativa do modelo de biogás gerado com a quantidade real de biogás consumida pelos motogeradores.	49
Figura 9 – Simulação da geração de biogás em reator anaeróbio de bancada.	50
Figura 10 – Taxa de produção de biogás em função do volume do efluente e tempo do experimento.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição do biogás em volume por diferentes autores.....	26
Tabela 2 – Equivalência energética de 1 m ³ de biogás segundo dois autores.....	26
Tabela 3 – Valores de α e β para 3 componentes orgânicos.....	29
Tabela 4 – Valores do Fator de Correção de Metano (FCM) e produção de biomassa (λ) para efluentes industriais.....	30
Tabela 5 – Tarifas da energia elétrica nos horários de ponto e fora de ponta nos diferentes períodos do ano.....	40
Tabela 6 – Dados de alimentação do modelo da metodologia utilizada.....	46
Tabela 7 – Valores do consumo de biogás pelos motogeradores e resultados da estimativa teórica de geração de biogás.....	48
Tabela 8 – Resultado da potência real dos geradores.....	52
Tabela 9 – Consumo de biogás pelos motogeradores e tempo de funcionamento diário.....	53
Tabela 10 – Levantamento dos gastos das ações tomadas para implantação dos biodigestores.....	53
Tabela 11 – Levantamento dos gastos das ações tomadas para implantação do sistema de geração de energia elétrica.....	54
Tabela 12 – Resultados do custo do biogás e da geração de energia.....	55
Tabela 13 – Resultados apresentados por Souza e Coldebella quanto ao custo da produção do biogás.....	56
Tabela 14 – Comparação do resultado do custo da energia elétrica com o resultado obtido por outros autores.....	57
Tabela 15 – Resultado da Taxa de Retorno do Investimento (TIR).....	58
Tabela 16 – Fluxo de caixa para um período de amortização de 10 anos.....	58
Tabela 17 – Quantificação da redução de emissão por ano.....	59
Tabela 18 – Análise econômica da venda de energia elétrica e da comercialização dos RCE's.....	60

LISTA DE ABREVEATURAS

AGV	Ácidos Graxos Voláteis
C:N	Relação Carbono e Nitrogênio
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CH ₃ COOH	Ácido Acético ou Acetato
CH ₄	Gás Metano
CO ₂	Gás Carbônico ou Dióxido de Carbono
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
Fe/EDTA	Ferro Ácido Etnodiaminotetraacético
FCM	Fator de Correção de Metano
GEE	Gases do Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
H ₂	Gás Hidrogênio
H ₂ O	Água
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio
HFC	Hidrofluocarburetos
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas)
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
N ₂	Gás Nitrogênio
N ₂ O	Óxido Nitroso
NH ₃	Amoníaco
O ₂	Gás Oxigênio
PBD	Pay-Back Descontado
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PFC	Perfluocarburetos
PROSAB	Programa de Pesquisas de Saneamento Básico
PVC	Policloreto de Vinila
RCE	Reduções Certificadas de Emissão
RPM	Rotações por Minuto

SF ₆	Hexafluoreto de Enxofre
SV	Sólidos Voláteis
TDH	Tempo de Detenção Hídrica
TIR	Taxa Interna de Retorno
VPL	Valor Presente Líquido
SIF	Sistema de Inspeção Federal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
1.2 JUSTIFICATIVA	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 FRIGORÍFICO DE AVES	17
2.2 TRATAMENTO DE ELUENTES	19
2.3 TRATAMENTO DE EFLUENTES EM LAGOAS ANAERÓBIAS	20
2.3.1 Fundamentos da Digestão Anaeróbia	21
2.3.1.1 Hidrólise	22
2.3.1.2 Acidogênese	22
2.3.1.3 Acetogênese	22
2.3.1.4 Metanogênese	23
2.3.2 Fatores de Influência a Biodigestão	23
2.3.2.1 Nutrientes	24
2.3.2.2 Temperatura	24
2.3.2.3 Alcalinidade e pH	25
2.3.2.4 Agitação no sistema	25
2.4 BIOGÁS	25
2.4.1 Purificação do Biogás	27
2.5 ESTIMATIVAS DE GERAÇÃO DE METANO EM EFLUENTES INDUSTRIAIS	27
2.6 CO-GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE BIOGÁS	30
2.6.1 Motor de Combustão Interna	31
2.6.2 Geradores	32
2.6.2.1 Gerador Síncrono	32
2.7 MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO	32
2.8 FUNDAMENTOS DA ANÁLISE DE INVESTIMENTOS	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 TIPO DE PESQUISA	35
3.2 ÁREA DE ESTUDO	35

3.2.1 Sistema de Tratamento dos Efluentes da Indústria.....	37
3.3 CONSUMO DE BIOGÁS PELOS MOTOGERADORES.....	38
3.4 CÁLCULO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	39
3.5 CUSTO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS	41
3.6 CÁLCULO EXPERIMENTAL DA GERAÇÃO DE BIOGÁS	43
3.7 CÁLCULO DO DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE	43
3.8 ANÁLISE DA VIABILIDADE DO INVESTIMENTO	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1 QUANTIFICAÇÃO DE BIOGÁS GERADO	48
4.2 POTÊNCIA DOS GERADORES NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	52
4.3 CONSUMO DE BIOGÁS PELOS MOTORES	52
4.4 LEVANTAMENTO DOS CUSTOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	53
4.5 DETERMINAÇÃO DO CUSTO DO BIOGÁS E DA ENERGIA ELÉTRICA.....	55
4.6 ANÁLISE ECONÔMICA DO INVESTIMENTO	57
4.7 OBTENÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO	58
5 CONCLUSÃO	61
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62
REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

Durante o século XX, devido à grande oferta de energia, a partir de combustíveis fósseis, não houve muita preocupação quanto ao suporte ofertado por estes no crescimento econômico mundial (ANEEL, 2008). Porém, atualmente vem-se trabalhando com diversos outros tipos de energia (renováveis), devido à consciência tomada da escassez dos combustíveis fósseis e também no âmbito da sustentabilidade.

Outro fator importantíssimo que levou a essa preocupação e utilizar energias alternativas, foi devido ao Protocolo de Quioto, em que países industrializados entraram em consenso para reduzir em pelo menos 5% as emissões dos Gases do Efeito Estufa (GEE) de 1990 até os anos entre 2008 e 2012 (PROTOCOLO DE QUIOTO, 2011).

Devido a essa recente preocupação, um mecanismo que vem sendo utilizado pelos países participante do Protocolo é o de comprar Reduções Certificadas de Emissões (RCE), gerados nos países que não tem obrigatoriedade na redução das emissões, como por exemplo, o Brasil (FRONDIZI, 2009).

Esses RCE's são obtidos por meio da redução de poluentes, que são obtidos pela da captura dos GEE e também através da transformação de gases mais nocivos à atmosfera em gases menos danosos. Um bom exemplo é o metano (CH_4), um gás que é aproximadamente 20 vezes mais poluente que o gás carbônico (CO_2), de acordo com EPA (2011). Sabendo disso, empresas brasileiras vêm buscando entrar nesse mercado de carbono. Uma boa alternativa para isso é fazendo a queima do gás metano gerado em aterros sanitários, tratamento de dejetos suínos, tratamento de efluentes industriais, entre outros.

Um dos tratamentos mais utilizados para redução da carga orgânica de efluentes é a digestão anaeróbia, em que bactérias específicas atuam, resultando na redução da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) do efluente gerando um subproduto, o biogás, que é composto principalmente por CH_4 e CO_2 . Esses gases formados podem ser capturados através da adaptação dessas lagoas em biodigestores, com isso sendo fácil realizar a queima desse gás, tendo assim possibilidades de entrada no mercado do carbono, emitindo RCE's.

Outro fator relevante é o poder de combustão do CH₄, gás esse que pode ser utilizado como fonte de energia de diversas formas simples, como em fogões, lampiões, entre outros. Também pode ter utilidade na indústria, como no aquecimento da água das caldeiras, turbinas e em motores de combustão interna (como um carro), que quando acoplado a um gerador, gera energia elétrica.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Verificar a viabilidade econômica de um sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás captado em biodigestores adaptados de lagoas anaeróbias de um frigorífico de aves.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Determinar o potencial de geração de biogás nos biodigestores;
- Avaliar o potencial de geração de Reduções Certificadas de Emissão (RCE), por meio da combustão do metano;
- Determinar o custo do m³ de biogás gerado nos biodigestores;
- Determinar o custo do kWh de energia gerado a partir do biogás;
- Avaliar a viabilidade do investimento a partir da redução da conta de energia elétrica do frigorífico e da receita de créditos de carbono.

1.2 JUSTIFICATIVA

Devido à competitividade entre empresas, atualmente estão sendo realizados muitos estudos no âmbito de redução de custos de produção e também na agregação de valor dos subprodutos gerados pela empresa.

Sabendo que o biogás gera resultados econômicos, buscou-se nesse trabalho avaliar economicamente a alternativa do aproveitamento de um resíduo do tratamento de efluente (o biogás), como fonte para geração de energia elétrica e possibilidades de sua entrada no mercado de carbono, e tendo que esse processo pode ser aplicado a diversos outros tipos de empreendimentos, tanto os que geram biogás, quando os que têm potencial de geração de créditos de carbono.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo será apresentada uma breve revisão sobre o processo de abate de aves, o tratamento de efluentes, biodigestão, estimativas de produção de metano, geração de energia elétrica a partir do biogás e engenharia econômica.

2.1 FRIGORÍFICO DE AVES

Segundo a Associação Brasileira de Exportadores de Frango (2010), o Brasil é o terceiro maior produtor de carne de frango do mundo, porém, relacionado à exportação, fica em primeiro da lista mundial no ano de 2009. Segundo a mesma associação, o Paraná fica em segundo lugar no *ranking* de exportações brasileiras.

O abate das aves é descrito por Carciofi (2005), onde fala sucintamente sobre o processo, conforme descrito nas etapas a seguir:

Na etapa inicial tem-se o galpão de espera, onde ficam os caminhões esperando a próxima fase, servindo também para reduzir o estresse dos animais, através de ventilação e aspersão de água.

Na segunda etapa, a recepção das aves, ocorre a descarga dos frangos, onde as caixas com esses animais são retiradas dos caminhões e dispostas próximas à pendura. Realiza-se então a pendura das aves pelos pés em nóreas, servindo para o transporte do frango para o processo industrial. As caixas onde as aves chegam são lavadas para posterior utilização.

Já dentro do abatedouro, as aves passam por um processo de insensibilização, por meio de descarga elétrica em meio aquoso, atordoando as mesmas para seguir no processo. Após essa insensibilização, ocorre a sangria, etapa onde se faz um corte no pescoço dos animais e deixa-se escorrer todo o sangue.

As duas etapas que seguem no processo servem para retirar as penas das aves, a escaldagem, por onde imergem os frangos em água quente (50 a 70 °C), facilitando assim a depenagem.

Depois de depenadas, as aves passam por uma lavagem, visando reduzir a carga microbiana superficial, para então os agentes do Sistema de Inspeção Federal (SIF) realizarem a inspeção da carcaça. Após a liberação, são cortados os pés dos frangos e destinados à exportação ou à fábrica de farinhas.

Através do transpasse é feita troca de nóreas, passando para a evisceração, processo onde é extraída a cloaca, feito o corte abdominal, o corte da pele do pescoço, a eventração (exposição das vísceras), outra inspeção sanitária realizada pela SIF, a separação das vísceras em comestíveis e não comestíveis, é retirada a cabeça, é feita outra lavagem da carcaça para então fazer a extração da traquéia.

Após um último processo de higienização, as carcaças seguem então para o pré resfriamento no sistema de *Chiller*.

Saindo do *Chiller* essas carcaças podem ser destinadas, tanto à câmara de congelamento e estoque, quanto para a linha de corte, passando pela divisão do frango em diversas partes, coxa, sobrecoxa, peito, etc.

Apesar desse procedimento descrito não ser um processamento universal, serve para exemplificar muito bem, além de ser um dos mais utilizados mundialmente. O processo supracitado pode ser facilmente observado na Figura 1.

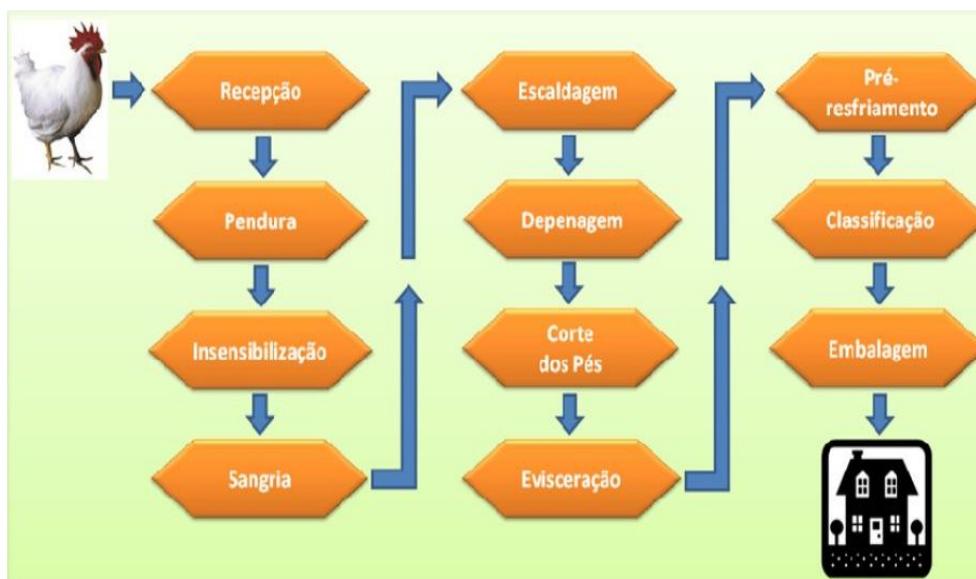


Figura 1 – Fluxograma do processo de abate de aves.

Fonte: PONTES, 2009.

Segundo Pontes (2009), os maiores fatores de geração de efluente líquido são o abate e a higienização dos equipamentos, resultando assim num efluente que apresenta altas concentrações de matéria orgânica, sólidos suspensos, óleos e graxas, macronutrientes (nitrogênio e o fósforo), necessitando assim de um tratamento eficaz, sabendo das dificuldades encontradas devido à grande variabilidade de suas características.

2.2 TRATAMENTO DE ELUENTES

Para o lançamento de efluente em corpos de água, existe uma legislação específica para esse tipo de atividade, a Resolução N° 430, de 13 de Maio de 2011, que estabelece padrões físico-químicos desta disposição (BRASIL, 2011). Segundo Von Sperling (1996), para atender a essa legislação, toda empresa que tem geração de efluente deve realizar o tratamento do mesmo, que pode ser dividido em até 4 níveis: tratamento preliminar, primário, secundário e terciário.

No tratamento preliminar, são retirados os sólidos em suspensão mais grosseiros, através do gradeamento e/ou desarenadores (caixa de areia). Já o tratamento primário é útil para sólidos em suspensão sedimentáveis e matéria orgânica em suspensão, onde nesse tratamento são utilizados decantadores e/ou fossas sépticas. O tratamento secundário tem como objetivo remover a matéria orgânica que não foi removida no tratamento primário e a que se encontra dissolvida no meio através da ação de microorganismos em lagoas de estabilização, lodos ativados, filtro biológico e no tratamento anaeróbio, onde se tem alta taxa de geração de gás metano (CH_4). Por último, e menos utilizado, tem-se o tratamento terciário, que visa remoção de nutrientes, patógenos, compostos não biodegradáveis, sólidos inorgânicos dissolvidos, entre outros (VON SPERLING, 1996).

2.3 TRATAMENTO DE EFLUENTES EM LAGOAS ANAERÓBIAS

Segundo CETESB (2006), a degradação biológica é um dos processos mais utilizados para o tratamento de águas residuárias, devido a razões econômicas. Essa degradação é decorrente da ação de agentes biológicos como bactérias, protozoários e algas. Esse processo biológico se resume na capacidade dos microorganismos degradarem compostos orgânicos, transformando-os em subprodutos que podem ser retirados do sistema, sendo estes o lodo, água, gás metano e gás carbônico (CHERNICHARO, 1997).

Segundo Uehara (1989), nas lagoas anaeróbias, ocorre naturalmente o seguinte processo: a matéria orgânica sedimentável acumula-se no fundo da lagoa, formando então o lodo, este sofrendo um processo pela ação de microorganismos anaeróbios, que passa por duas etapas, a liquefação e formação de ácidos orgânicos, bem como a fermentação metânica. A Figura 2 ilustra esquematicamente o processo que ocorre em uma lagoa anaeróbia.

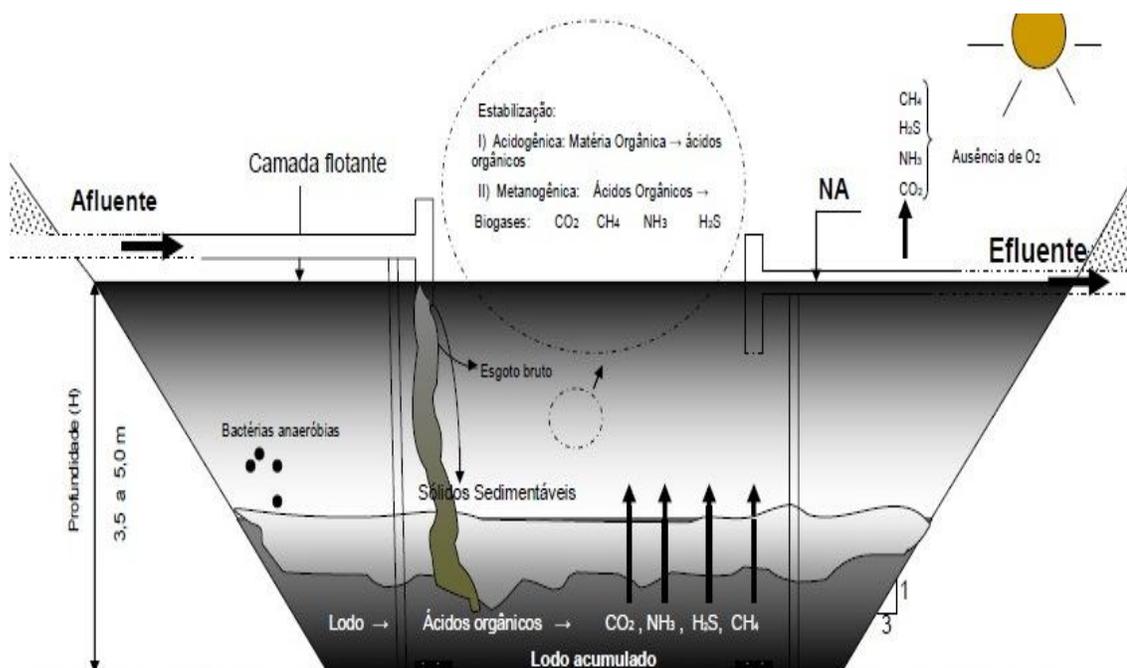


Figura 2 – Desenho esquemático de uma lagoa anaeróbia.

Fonte: SILVA FILHO, 2007.

2.3.1 Fundamentos da Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia representa um sistema biológico bem estruturado, cada bactéria, alga e protozoários tendo suas funções bem definidas. Esse processo de digestão se divide basicamente em dois estágios. No primeiro estágio, um grupo de bactérias converte material orgânico complexo em material orgânico simples, processo conhecido também como hidrólise. Já a segunda etapa ocorre a conversão desse material simples em metano e gás carbônico, passando pelas fases de acidogênese, acetogênese e metanogênese, como apresentado na Figura 3 (CHERNICHARO, 1997).

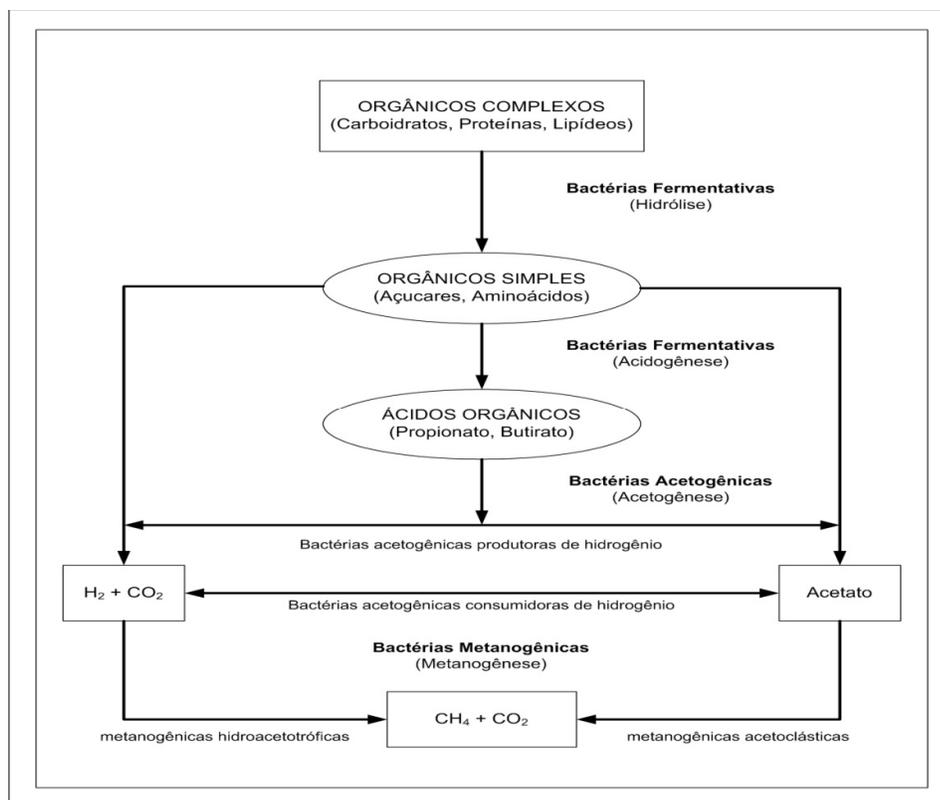


Figura 3 – Esquematização do metabolismo e os grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.

Fonte: Chernicharo, 1997.

2.3.1.1 Hidrólise

Sabendo que as bactérias não são capazes de assimilar matéria orgânica particulada, a primeira fase do processo de degradação anaeróbia é a hidrólise de materiais particulados complexos (polímeros) em elementos dissolvidos simples (moléculas menores), esses elementos agora podendo atravessar as paredes das bactérias fermentativas (CHERNICHARO, 1997). O mesmo autor ainda relata que a hidrólise dos polímeros normalmente ocorre de forma lenta, e Campos (1999) afirma que este é o processo que limita todo o processo de digestão anaeróbia, ou seja, a velocidade de reação para geração do gás metano é estabelecida por essa fase.

2.3.1.2 Acidogênese

Na acidogênese, as moléculas simples geradas na hidrólise são metabolizadas pelas bactérias fermentativas e convertidas em compostos ainda mais simples, estes podendo ser excretados pelas células. Dos compostos produzidos incluem-se: ácidos orgânicos, alcoóis, hidrogênio, amônia, gás carbônico além de haver a multiplicação celular desses microorganismos. A maioria das bactérias acidogênicas são aeróbias estritas, porém existem alguns tipos que podem sobreviver na presença de ar, metabolizando o material orgânico hidrolisado por via oxidativa, utilizando o pouco oxigênio presente no meio, proporcionando assim a sobrevivência dos microorganismos anaeróbios estritos (BITTON, 1994; van HAANDEL e LETTINGA, 1994; CHERNICHARO, 1997; GARCIA et al., 2000, apud SILVA, 2007).

2.3.1.3 Acetogênese

Segundo Chernicharo (1997), somente o hidrogênio e o acetato podem ser utilizados processados diretamente nas bactérias metanogênicas, contudo,

aproximadamente 50% da DQO biodegradável é convertida em outros compostos, como o propionato e o butirato, esses assim sendo consumidos pelas bactérias acetogênicas e transformados em acetato e hidrogênio.

A acetogênese nada mais é que a conversão dos compostos formados na acidogênese em substrato para a produção de metano, sendo esse o hidrogênio, o acetato e o dióxido de carbono, sendo aproximadamente 70% de acetato formado nesta fase (CAMPOS, 1999).

2.3.1.4 Metanogênese

Esta é a etapa final do processo de digestão anaeróbia dos compostos orgânicos, sendo esta a fase onde há uma maior produção de metano, este sendo produzido por bactérias acetotróficas ou hidrogenotróficas, a partir da redução do ácido acético e do dióxido de carbono, respectivamente (CAMPOS, 1999). As reações químicas desses processos são apresentadas na Equação 1, que mostra a metanogênese acetotrófica, e Equação 2, mostrando a metanogênese hidronegotrófica (CHERNICHARO, 1997).



2.3.2 Fatores de Influência à Biodigestão

As condições hidráulicas e biológicas que fazem parte do tratamento biológico de efluente podem ser afetadas por diversos fatores, alguns desses podendo ser levado em conta no projeto (profundidade da lagoa, ventos na região), outros devem, na medida do possível, ser controlados, acarretando assim num

melhor desempenho das lagoas, bem como no aumento da geração de metano (UEHARA, 1989). Alguns desses fatores são a quantidade de nutriente do efluente, o pH e a alcalinidade, a temperatura e a agitação do sistema.

2.3.2.1 Nutrientes

Vários são os elementos necessários para as bactérias fermentativas crescerem e se multiplicarem, porém, o nitrogênio, o fósforo e o carbono são essenciais para esse processo (UEHARA, 1989).

Segundo Nogueira (1986), a quantidade de carbono da matéria é fundamental para a biodigestão. Esse carbono é normalmente encontrado em carboidratos, lipídeos e proteínas. Segundo o mesmo autor, além do carbono, a quantidade de nitrogênio é de mesma importância, tendo uma relação ótima entre Carbono e Nitrogênio (C:N) entre 20 e 30, ou seja, 20 a 30 partes de carbono para 1 parte de nitrogênio.

2.3.2.2 Temperatura

A temperatura é o principal fator que influencia na digestão anaeróbia, esta sendo ideal entre 28°C e 35°C. Esta é a faixa de temperatura que combina as melhores condições para o crescimento das bactérias mesofílicas e para a produção de metano, e quando acima ou abaixo dessa faixa de temperatura a ação das bactérias é diminuída, tendo como consequência menor produção do biogás (SGANZERLA, 1983; NOGUEIRA, 1986).

Estudos realizados por Prado et al. (2010) mostram que outro fator que a temperatura influencia é na concentração de metano no biogás, que em altas temperaturas, na faixa de 40°C, a porcentagem de metano no biogás é significativamente maior.

2.3.2.3 Alcalinidade e pH

Segundo Borz (2010), se a quantidade de bactérias produtoras de metano for suficiente em um sistema de tratamento, com as condições ambientes do sistema sendo favoráveis ao desenvolvimento das mesmas, essas bactérias metanogênicas consomem os AGV na mesma velocidade que esses são produzidos, formando assim um sistema equilibrado e favorável à formação de gás metano. Porém, se acontecer um desequilíbrio, onde existe maior produção de AGV, não conseguindo ser processadas rapidamente, tem-se um abaixamento no pH, diminuindo assim a quantidade de metano gerado, pois, segundo Chernicharo (1997) as bactérias metanogênicas têm um ótimo crescimento na faixa de pH entre 6,6 e 7,4, embora possam se desenvolver na faixa de pH entre 6,0 e 8,3.

2.3.2.4 Agitação no sistema

Os processos de agitação do sistema, seja por das bolhas de gás produzido, recirculação do lodo ou agitação mecânica, facilitam o contato entre a matéria orgânica e os microorganismos, evitando assim a formação de zonas mortas, estas que são formadas pela sedimentação do lodo, afetando assim a capacidade útil da lagoa (BOHRZ, 2010).

2.4 BIOGÁS

O biogás é o resultado da degradação anaeróbia de compostos orgânicos conhecidos como biomassa, uma mistura gasosa composta principalmente de gás metano e gás carbônico, possuindo um alto poder calorífico. Seu principal componente, o metano, um gás incolor, sem cheiro, altamente combustível, que em sua queimam apresenta chamas azul-lilás com leves pontos vermelhos, não

deixando também fuligem e com mínima poluição (FERRAZ, 1980; SGANZERLA, 1983).

A composição do biogás depende muito dos materiais que foram geradores deste, valores apresentados por diferentes autores, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Composição do biogás em volume por diferentes autores.

Componente	Nogueira	Sganzerla	CETESB
Metano (CH ₄)	55% a 75%	60 a 70%	50 a 70%
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25% a 45%	30 a 40%	25 a 50%
Nitrogênio (N ₂)	0% a 3%	-	0 a 7%
Hidrogênio (H ₂)	0% a 2%	-	0 a 2%
Gás Sulfídrico (H ₂ S)	0% a 1%	-	0 a 3%
Oxigênio	0 a 0,1%	-	-
Amoníaco (NH ₃)	-	-	0 a 1%

Fonte: SGANZERLA (1983), NOGUEIRA (1986), CETESB (2011).

Sendo o biogás uma mistura de gases, sendo um desses o metano, possui então alto poder de combustão, tendo um calor específico de 5000 a 7000 kcal/m³, conforme apresentado por Ferraz (1980). Também se pode comparar a equivalência energética desse gás com outras formas de energia, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Equivalência energética de 1 m³ de biogás segundo dois autores.

Combustível Equivalente	Nogueira	Sganzerla
Carvão Vegetal	0,8 kg	0,735 kg
Lenha	3,5 kg	1,538 kg
Óleo Diesel	0,55 l	0,553 l
Gasolina	0,61 l	0,613 l
Álcool Carburante	0,8 l	0,79 l
Querosene	0,62 l	0,579 l
GLP (butano-propano)	1,43 kg	0,454 kg

kWh de energia elétrica	0,74 kWh	1,482 kWh
-------------------------	----------	-----------

Fonte: SGANZERLA (1983), NOGUEIRA (1986).

2.4.1 Purificação do Biogás

Conforme apresentado acima, o biogás é composto em pequena parcela por gás sulfídrico, este causando vários danos aos materiais, como a corrosão, devido à sua acidez. Portanto, para o aproveitamento desse gás, recomenda-se purificá-lo, ou seja, retirar o máximo ácido sulfídrico possível. Diversas são as técnicas de purificação, algumas delas sendo citadas abaixo:

- Frare (2006), verificou a remoção de H_2S a partir de uma solução de Fe/EDTA (Ferro Ácido Etilendiaminotetraacético) a 0,4 molar, tem-se uma eficiência de 100% na redução do ácido, quando bem operacionalizado.
- Fisher (2010), avaliou a eficiência da remoção do ácido através da Biofiltração, ou seja, filtração por meio de microorganismos, onde obteve uma taxa de purificação de até $98,9\% \pm 21$.

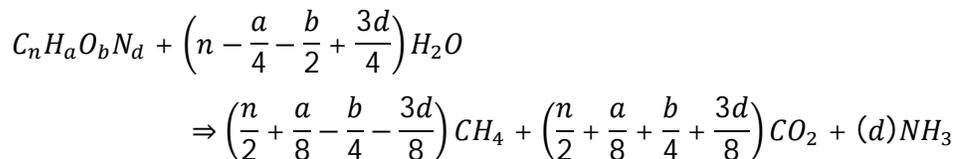
Além dos citados acima, o processo de oxidação por meio de aço é o mais utilizado, devido a seu custo baixo de implantação e operação. O processo basicamente é fazer o biogás passar por uma coluna contendo limalha de ferro, onde ocorre a oxidação desse ferro a partir do ácido sulfídrico, removendo assim essa impureza do gás (NOGUEIRA, 1986).

2.5 ESTIMATIVAS DE GERAÇÃO DE METANO EM EFLUENTES INDUSTRIAIS

Segundo Campos (1999), dados teóricos consideram que, a cada quilograma de DQO removida no sistema de tratamento do efluente, tem-se uma geração de 350 litros de metano, sob condições normais de temperatura e pressão. Porém, segundo o mesmo autor, dados obtidos na realidade apontam para geração abaixo desse valor.

Chernicharo (1997), apresenta a equação estequiométrica de Buswell (Equação 3), que pode ser utilizada para estimar a geração do biogás no tratamento

de efluente, cálculo esse realizado a partir do composto que está sendo degradado, para isso, necessita-se saber qual a composição química dessa matéria orgânica.



Equação 3

Onde $C_nH_aO_bN_d$ representa a fórmula química do composto que está sofrendo o processo de degradação. Nessa equação é apresentada a geração de metano máxima possível.

A partir dessa equação de Busweel, pode-se chegar à produção máxima de metano para uma dada demanda de oxigênio, conforme apresentado na Equação 4 (Nogueira, 1986).

$$V_{CH_4} = 72,1(\eta \times DBO - 1,42SV)$$

Equação 4

Onde V_{CH_4} é o volume de metano produzido por dia, η é a eficiência de utilização do resíduo orgânico, DBO é a demanda bioquímica de oxigênio acionada ao digester (kg DBO/dia) e SV são os sólidos voláteis biológicos produzidos (kg SV/dia). Nogueira (1986) ainda diz que a eficiência de utilização do resíduo orgânico é relacionado à conversão do resíduo orgânico em gases, e SV pode ser estimado através da Equação 5.

$$SV = \frac{\alpha \times DBO}{1 + \beta \times TDH}$$

Equação 5

Onde TDH é o tempo de detenção hídrica dos sólidos (dias), α e β são a constante de crescimento e a taxa de respiração endógena, respectivamente, valores esses apresentados na Tabela 3, para alguns compostos orgânicos.

Tabela 3 – Valores de α e β para 3 componentes orgânicos.

Composto Orgânico	α	β
AGV	0,054	0,038
Carboidratos	0,24	0,033
Proteínas	0,076	0,014

Fonte: NOGUEIRA (1986).

Outra forma de calcular a emissão de metano é através da metodologia do inventário de emissões atmosféricas apresentado por IPCC (2006). A Equação 6 apresenta a equação geral para estimativa de geração em massa de metano.

$$CH_{4\text{emitido}} = Q \times DQO \times B_0 \times FCM \quad \text{Equação 6}$$

Onde $CH_{4\text{emitido}}$ é a quantidade de metano emitido (kg CH₄/h), Q é a vazão do efluente (m³/h), DQO é demanda química de oxigênio do efluente (kg DQO/m³), B₀ é capacidade máxima de produção de metano, onde é recomendado como boa prática utilizar esse valor como 0,25 kg CH₄/kg DQO, FCM é o fator de correção de metano que pode ser obtido dependendo do tratamento biológico sofrido pelo efluente, esses valores adimensionais podem ser observados na Tabela 4

Outra metodologia, esta agora apresentada por U.S.EPA (2010), é um pouco mais específica que a retratada por IPCC (2006), pois relaciona a eficiência da lagoa e também trata da produção de gás carbônico. A Equação 7 e a Equação 8 apresentam as estimativas de geração de CO₂ e CH₄, respectivamente.

$$CO_{2_{emitido}} = 10^{-3} \times Q \times DQO \times EF \times FC_{CO_2} \times [(1 - FCM \times FB_{CH_4}) \times (1 - \lambda)]$$

Equação 7

$$CH_{4_{emitido}} = 10^{-3} \times Q \times DQO \times EF \times FC_{CH_4} \times [(FCM \times FB_{CH_4}) \times (1 - \lambda)]$$
 Equação 8

Onde, $CO_{2_{emitido}}$ é a quantidade em massa de CO_2 emitido (kg CO_2 /h), $CH_{4_{emitido}}$ é a quantidade em massa de CH_4 emitido (kg CH_4 /h), DQO é a demanda química de oxigênio do efluente (mg DQO/L), EF é a eficiência de remoção da demanda de oxigênio do processo de tratamento biológico (adimensional), FC_{CO_2} é o fator máximo de conversão na geração de CO_2 por unidade de demanda de oxigênio (1,375 g CO_2 /g DQO), FC_{CH_4} é o fator máximo de conversão na geração de CH_4 por unidade de demanda de oxigênio (0,5 g CH_4 /g DQO), FCM é o fator de correção do metano (Tabela 4), FB_{CH_4} é a fração de CH_4 no biogás (geralmente usado como 65%), λ é a quantidade de carbono que vira biomassa no sistema de tratamento (Tabela 4).

Tabela 4 – Valores do Fator de Correção de Metano (FCM) e produção de biomassa (λ) para efluentes industriais.

Tipo de descarga e tratamento	FCM	λ
Descarga direta em rio, lago ou mar	0,1	
Planta de tratamento aeróbio bem gerenciada	0	0,65
Planta de tratamento aeróbio mal gerenciada	0,3	0,45
Digestor anaeróbio de lodo	0,8	0,1
Reatores Anaeróbios (UASB, Reator de leito fixo)	0,8	
Lagoa Anaeróbia Rasa (Profundidade menor que 2 metros)	0,2	0
Lagoa Anaeróbia Funda (Profundidade maior que 2 metros)	0,8	0

Fonte: IPCC (2006), CHOUBERT, 2009; AMARRY, 2004; LOW AND CHASE, 1999, apud U.S.EPA (2010)

2.6 CO-GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE BIOGÁS

Entende-se por co-geração de energia a associação da geração simultânea de dois ou mais tipos de energia a partir de apenas um tipo de fonte energética, por exemplo, na transformação da energia de um gás em energia elétrica e calor (AVELLAR et al., 2000).

Segundo ICELI (2009), o biogás, um gás altamente combustível, possui diversas aplicações tratando de aproveitamento energético. Dentre essas aplicações estão a secagem de grãos, queima em caldeira, aquecimento de aviários e geração de energia elétrica, sendo essa última sua principal aplicação.

Atualmente, vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos nessa área de geração de energia elétrica a partir do biogás, principalmente no aproveitamento desse gás gerado em aterros sanitários, estações de tratamento de esgoto, propriedades rurais de produção de suínos e tratamento de efluentes industriais.

2.6.1 Motor de Combustão Interna

Na transformação do biogás em energia elétrica, são utilizados grupos moto-geradores, onde a taxa de conversão para energia elétrica é relativamente baixa, onde, de acordo com Salomon (2007), a eficiência da conversão de energia do biogás em motor de alta potência possui um rendimento de aproximadamente 37%, em condições normais de temperatura e pressão. Costa (2003), complementa que o restante dessa energia é convertida em energia térmica, presente nos gases de escape, na água de arrefecimento do motor, no óleo do motor e em radiação térmica. Porém, estudos recentes que tratam da geração de eletricidade a partir do biogás apontam para rendimentos muito abaixo desses 37%, por exemplo, Coldebella (2006) e Souza (2006) encontraram taxas de conversão de apenas 4,14% e 6,71%, respectivamente.

Os motores normalmente utilizados para a queima do biogás são do tipo ciclo Otto, pois possui maior rendimento elétrico e menor custo para aquisição. Porém, para a sua utilização, é necessário realizar pequenas modificações nos sistemas de admissão, ignição e compressão (ICLEI, 2009).

Os motores de ciclo Otto são motores de combustão interna, que trabalham em quatro tempos, iniciando-se na fase de admissão, onde se tem a entrada de combustível e ar, logo após, ocorre a compressão desse combustível através de um pistão em uma câmara fechada, provocando a queima do ar e do combustível a partir da ignição gerada por uma centelha, com a força de explosão da queima, o pistão é empurrado em sua posição inicial, tendo assim o último estágio, a saída dos gases combustíveis (ANDRADE, 2007).

2.6.2 Geradores

A partir da energia mecânica gerada no motor ou turbina, é possível convertê-la em energia elétrica, através de um gerador, podendo esse ser do tipo síncrono ou assíncrono, entre outros.

2.6.2.1 Gerador Síncrono

O gerador síncrono tem como princípio ter a rotação constante, pois a frequência e tensão geradas no mesmo são diretamente ligadas ao número de rotações por segundo. Possui o seguinte princípio de funcionamento: uma espira girante enlaça um campo magnético variante com o tempo, gerando nos terminais uma força eletromotriz, ou seja, tensão. O campo magnético girante é obtido através de um rotor bobinado, que quando alimentado, gera um campo magnético constante. Então, girando-se o rotor, obtém-se um campo magnético variante (KOHLBACK, 19--).

2.7 MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) é um mecanismo proposto no artigo 12 do Protocolo de Quioto, que possibilita a cooperação dos países em desenvolvimento (Brasil, Argentina, Cuba, China, entre outros) com os países industrializados (Alemanha, Dinamarca, França, entre outros), possibilitando a redução da geração dos GEE's. De acordo como Protocolo, alguns países industrializados assumiram a responsabilidade de ter reduzido, entre 2008 e 2012, pelo menos 5% de suas emissões dos GEE's, com base em suas emissões de 1990. Com isso, o MDL tem objetivo de auxiliar os países desenvolvidos a atingirem essas metas de redução, através da compra de Redução de Emissões Certificadas (RCE's), podendo ser obtida nos países em desenvolvimento que não fazem parte do acordo (PROTOCOLO DE QUIOTO, 2011; FRONDIZI, 2009).

Segundo Ribeiro (2006), uma unidade de RCE é igual a uma tonelada de CO₂ equivalente, calculada a partir do Potencial de Aquecimento Global (GWP), ou seja, toda e qualquer emissão dos GEE são convertidas em CO₂ equivalente. Os GEEs considerados no Protocolo de Quioto são: dióxido de carbono (CO₂), gás metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hexafluoreto de Enxofre (SF₆), família dos hidrofluorcarburetos (HFCs) e a família dos perfluorcarburetos (PFCs).

2.8 FUNDAMENTOS DA ANÁLISE DE INVESTIMENTOS

Existem diversas formas de se avaliar se um investimento é viável, são utilizadas algumas ferramentas de cálculo para verificar se existe essa viabilidade, algumas dessas ferramentas são apresentadas por Samanez (2007) e Hirschfeld (2010).

Um desses métodos, o Valor Presente Líquido (VPL), tem como finalidade determinar um valor no instante considerado inicial, a partir do fluxo de caixa obtido através das entradas e saídas de capital estimadas no processo (HIRCHFELD, 2010). A Equação 9 apresenta o cálculo desse método.

$$VPL = -I + \sum_{t=0}^n FC_t \times (1 + i)^{-t}$$

Equação 9

Onde, VPL é o valor presente líquido de certo fluxo de caixa (R\$), I é o investimento total no empreendimento (R\$), n é o número de períodos envolvidos em cada elemento da série de receitas e dispêndios do fluxo de caixa (anos/meses/dias), t o tempo no t-ésimo período (anos/meses/dias), FC_t é o valor do fluxo de caixa t-ésimo período (R\$), i é a taxa de juros comparativa ou taxa mínima de atratividade.

Samanez (2010) também apresenta a Taxa Interna de Retorno (TIR) como um método avaliativo de um projeto. Segundo o autor, essa ferramenta tem como finalidade a rentabilidade absoluta a determinado custo do capital, ou seja, tem como objetivo encontrar a taxa intrínseca de rendimento. A Equação 10 apresenta essa ferramenta.

$$VPL = -I + \sum_{t=0}^n FC_t \times (1 + i^*)^{-t} = 0 \quad \text{Equação 10}$$

Onde i^* é a taxa de rentabilidade, se essa taxa de rentabilidade for maior que o custo do capital, $i^* > i$, o projeto é economicamente viável.

Samanez (2010) traz outra forma de avaliar o investimento, o método do *Pay-Back* Descontado (PBD), que encontra o tempo de recuperação do investimento, ou seja, quanto tempo o valor presente dos fluxos de caixa se iguale ao investimento inicial. Esse método é calculado a partir da Equação 11.

$$I_{total} = \sum_{t=1}^T \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad \text{Equação 11}$$

Onde I_{total} é a soma total dos recursos desembolsados no empreendimento. Essa ferramenta demonstra em quanto tempo esse investimento se paga, ou seja, quanto menor esse tempo de retorno, mais viável o empreendimento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 TIPO DE PESQUISA

Segundo Gil (1991), as pesquisas podem ser classificadas de três diferentes formas, sendo elas a pesquisa exploratória, descritiva e explicativa, diferenciando-se de acordo com seus objetivos.

A pesquisa relatada neste trabalho é de caráter exploratório, pois teve como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema de geração de energia elétrica bem como a viabilidade de sua implantação. Assume também uma forma de estudo de caso, que, segundo Gil (1991), normalmente vem acompanhado à pesquisa exploratória.

3.2 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na Cooperativa Agroindustrial Lar – Unidade Industrial de Aves, localizada na BR 277, km 653, na cidade de Matelândia – Paraná (Figura 4). A empresa atua como Frigorífico no processamento de frangos de corte.

Inaugurado em 23 de julho de 1999, a empresa atualmente conta com aproximadamente 2.400 colaboradores, operando 24 horas por dia, tendo com isso uma capacidade de abate de 130.000 aves por dia.

A estrutura física da empresa conta com um terreno de 314.600 m², com uma área construída de 26.376 m², porém está passando por uma ampliação, onde após concluída terá uma área construída de 45.824 m².

Estima-se que o consumo de água do frigorífico seja em média 5.340 m³ de água ao dia, sendo gradativamente aumentada até aproximadamente 8400 m³ ao dia, esta sendo coletada do rio Xaxim, de nascentes e de poço tubular profundo. A finalidade dessa água é para consumo humano e industrial, para limpeza, processos de abate, entre outras operações. Toda água consumida na indústria segue para o sistema de tratamento de efluentes que conta com processos físicos e biológicos.

No momento, a empresa passa por um processo de ampliação, em que ao final, a indústria fará recirculação de 70% da água consumida, ou seja, fará a coleta de apenas 30% de toda a água utilizada de rio e poços artesianos.

Na indústria, já está implantado o sistema de biodigestão e o sistema de geração de energia, possuindo 2 biodigestores e 3 motogeradores, 2 de 50 kVA e 1 de 100 kVA.



Figura 4 – Vista aérea da empresa em estudo.

Fonte: Google Maps (2011)

3.2.1 Sistema de Tratamento dos Efluentes da Indústria

No processo de tratamento físico, a empresa utiliza uma peneira, para remoção dos sólidos mais grosseiros e um flutador físico, que tem como função reduzir a DBO, a DQO, sólidos suspensos e óleos e graxas.

Já o processo de tratamento biológico consiste em duas lagoas anaeróbias em paralelo, ligadas a duas lagoas aeradas em série, que após a aeração passa por quatro lagoas facultativas, e, por fim, uma lagoa de polimento.

As lagoas anaeróbias comportam dois biodigestores, visando a acondicionamento do gás gerado para aproveitá-lo na co-geração de energia elétrica.

Os biodigestores são da marca AVESUY, sendo o biodigestor 1 composto por geomembrana de PEAD, com espessura de 0,8 mm para a parte do revestimento inferior e 1,25 mm para a parte superior, ambos de cor preta. Já o biodigestor 2 é constituído de geomembrana de PVC, obtida por processo de calandragem, com espessura de 1,00 mm, sendo de cor branca na parte interior e preta na parte exterior.

Quanto à capacidade dos biodigestores, o Biodigestor 1 possui um volume de 21.822 m³, recebendo 60% do fluxo de efluentes. Já o Biodigestor 2 tem volume de 13.134 m³, passando por ele os 40% restantes do efluente.

O biogás gerado pelos 2 biodigestores são canalizados e utilizados para a geração de energia elétrica nos motogeradores. A Figura 5 apresenta um fluxograma resumido do processo de geração do biogás e da energia elétrica.

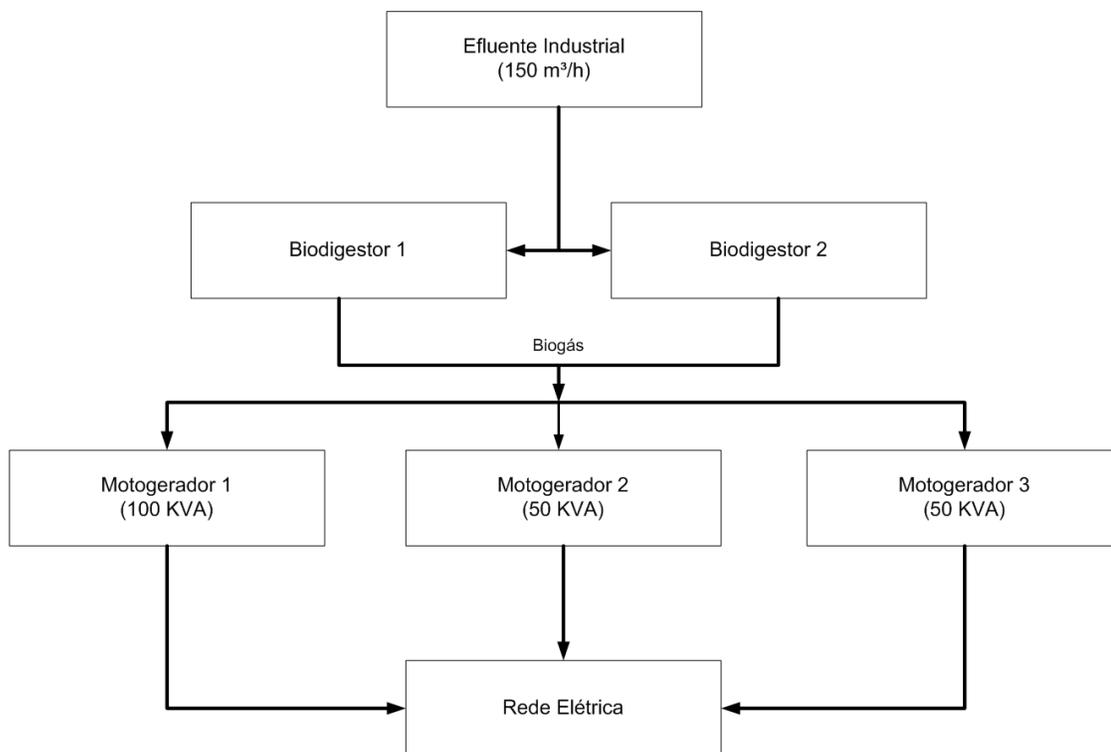
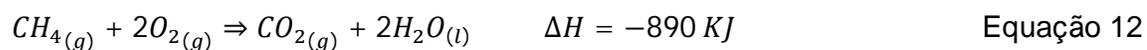


Figura 5 – Fluxograma básico do processo de geração de biogás e energia elétrica.

3.3 CONSUMO DE BIOGÁS PELOS MOTOGERADORES

Para determinação do consumo de combustível pode ser utilizada a equação estequiométrica da combustão do metano, como mostra a Equação 12, apresentada por Atkins (2008).



Entende-se então, que para 1 mol de CH_4 são consumidos 2 mols de O_2 . Sabendo disso, pode-se calcular esses termos em massa, a partir da massa molecular desses compostos, como expresso na Equação 13.

$$m = n \times MM$$

Equação 13

Onde n é o número de mols, MM é a massa molecular e m é a massa do componente. Sabendo-se que o O_2 é cerca de 21% do ar, pode-se calcular a massa de ar que entra na câmara de combustão a cada ciclo, o mesmo podendo ser feito para o biogás, sabendo que ele este é composto por aproximadamente 80% de CH_4 .

Sabendo que o motor Otto 5 litros, estacionário com uma rotação de 1800 rpm, possuindo 6 cilindros, pode-se calcular o volume de biogás consumido no motor por intervalo de tempo.

3.4 CÁLCULO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Não existe nenhuma metodologia definida como correta para o cálculo da geração de energia elétrica, portanto, a maneira de determinar essa geração é através de ensaio de geração de energia no motor.

A partir de uma vazão de biogás conhecida nos motores, e da coleta dos dados direta da geração no painel de controle do motogerador.

Através desses dados, pode ser estimada a potência real dos motogeradores, como apresenta a Equação 14.

$$P_{real} = \frac{E_g}{t}$$

Equação 14

Onde P_{real} é a potência real do motogerador (kW), E_g é a energia produzida no período analisado (kWh) e t é o tempo de funcionamento do motogerador no período analisado (h).

Sabendo a potência real de cada motogerador, pode-se então determinar a quantidade de energia total do sistema de geração de energia elétrica. São apresentadas nas Equação 15 e Equação 16 os métodos do cálculo.

$$E_{gp} = P_{real} \times t_{fp} \quad \text{Equação 15}$$

$$E_{gfp} = P_{real} \times t_{ffp} \quad \text{Equação 16}$$

Onde E_{gp} é a quantidade de energia gerada na ponta (kWh), t_{fp} é o tempo de funcionamento do motogerador nos horários de ponta (h), E_{gfp} é a energia gerada nos horários fora de ponta (kWh) e t_{ffp} é o tempo de funcionamento do motogerador nos horários fora de ponta.

Sabe-se que nos horários de ponta (das 18:00 às 21:00 horas) o custo da energia elétrica fornecida pela agencia de distribuição de energia é maior que nos horários fora de ponta, que compreende o restante do dia. Sabendo disso, pode-se saber quando está sendo economizado, ao fato que a empresa utiliza toda a energia produzida pelo sistema. A Equação 17 apresenta essa economia em números.

$$E_e = E_{gp} \times C_{ep} + E_{gfp} \times C_{efp} \quad \text{Equação 17}$$

Onde C_{ep} é o custo da energia elétrica no horário de ponta (R\$) e C_{efp} é o custo da energia no horário fora de ponta. A Tabela 5 apresenta as tarifas de energia pagas pela empresa.

Tabela 5 – Tarifas da energia elétrica nos horários de ponto e fora de ponta nos diferentes períodos do ano

Período	Tarifa (R\$/kWh)	
	Ponta	Fora da Ponta
Seco (maio a novembro)	0,86003	0,14329
Úmido (dezembro a abril)	0,83999	0,13166

3.5 CUSTO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS

A metodologia para a obtenção do custo da produção de energia elétrica a partir de biogás é descrita por Souza et al. (2004), onde trata que esse custo é composto do capital investido de construção e manutenção do biodigestor e do sistema do motor/gerador.

Para estimar o custo de produção de energia elétrica é utilizada a Equação 18.

$$C_e = \frac{CAG + CAB_{\text{motogerador}}}{PE} \quad \text{Equação 18}$$

Em que, C_e é o custo da energia elétrica gerada a partir de biogás (R\$/kWh), CAG é o custo anualizado equivalente do investimento no conjunto do motogerador (R\$/ano) que é calculado através da Equação 19, $CAB_{\text{motogerador}}$ é o gasto anual com biogás (R\$/ano) que pode ser calculado a partir da Equação 20 e PE é a produção de eletricidade (kWh/ano), sendo calculado através da Equação 21.

$$CAG = CIM \times FRC + \frac{CIM \times OM}{100} \quad \text{Equação 19}$$

Onde, CIM é o custo de investimento no motogerador (R\$), FRC é o fator de recuperação de capital (adimensional) que é obtido pela Equação 22 e OM é o custo de operação e manutenção do sistema (%/ano).

$$CAB_{\text{motogerador}} = CB \times CNB \quad \text{Equação 20}$$

Onde, CB é o custo do biogás (R\$/m³) que é obtido pela Equação 23 e CNB é o consumo de biogás pelo motogerador (m³/ano).

$$PE = P_{nominal} \times T_{operação} \quad \text{Equação 21}$$

Onde, P_{nominal} é a potência nominal do motogerador (kW) e T é a disponibilidade de operação anual da planta (horas/ano). Nesta equação em específico da metodologia foi realizada uma alteração, propondo a utilização da Potência real do motogerador (P_{real}), que foi apresentada na Equação 14, ao invés de utilizar a P_{nominal}.

$$FRC = \frac{j \times (1+j)^n}{(1+j)^{n-1} - 1} \quad \text{Equação 22}$$

Onde j é a taxa de desconto, valor de 7% aplicado atualmente para financiamentos do FINEP.

$$CB = \frac{CAB_{bio}}{PAB} \quad \text{Equação 23}$$

Onde CAB_{bio} é o custo anualizado do investimento do biodigestor (R\$/ano) podendo ser calculado pela Equação 24, PAB é a produção anual de biogás (m³/ano), calculada através da metodologia ASM-H.III (UNFCCC, 2011).

$$CAB_{bio} = CIB \times FRC + \frac{CIB \times OM}{100} \quad \text{Equação 24}$$

Onde CIB é o custo do investimento no biodigestor (R\$).

Para Perlingeiro (2005), os custos de operação e manutenção (OM) podem ser estimados através do Investimento fixo (I_{fixo}) do projeto, calculados através da Equação 25 e da Equação 26, respectivamente.

$$OM = 0,04 \times I_{Fixo} \quad \text{Equação 25}$$

$$I_{fixo} = CIB + CIM \quad \text{Equação 26}$$

3.6 CÁLCULO EXPERIMENTAL DA GERAÇÃO DE BIOGÁS

Para estimar a produção de biogás, foi utilizado um reator de bancada da marca Biostat® B, onde foi simulado o processo da lagoa. O efluente foi coletado na estrada do biodigestor, e o lodo, como não foi possível coletar do próprio biodigestor, foi utilizado o lodo de uma lagoa de estabilização, que estava sendo transferido para o biodigestor para aumentar a eficiência. A captação do gás gerado no bioreator foi realizada através da ligação do reator com uma coluna d'água em proveta invertida. Foi utilizada também uma temperatura controlada a 35 °C e rotação de 30 rotações por minuto.

Nesta etapa foram realizados 3 corridas de experimento, denominados Experimento 1, Experimento 2 e Experimento 3.

3.7 CÁLCULO DO DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE

A partir da estimativa de geração de metano, pode-se fazer a equivalência deste em termos de CO₂, procedimento necessário obter a RCE (FRONDIZI, 2009).

Apesar dos métodos de estimativa de geração de metano apresentados no capítulo 2, a metodologia utilizada para estimar a quantidade de dióxido de carbono

equivalente e a aprovada pela UNFCCC (2011a), que apresenta o cálculo de linha de base para emissão de metano em lagoa anaeróbia, a AMS-III.H. (*Methane Recovery in Wastewater Treatment*).

Para o cálculo das emissões de linha de base para eletricidade ($BE_{y,Power}$) da metodologia AMS-III.H, é necessário recorrer a outra metodologia, a AMS-I.D (*Grid Connected Renewable Electricity Generation*), ao fato que a empresa gera eletricidade a partir de uma fonte renovável de energia e não a consome da rede elétrica. Essa metodologia é encontrada em UNFCCC (2011b).

Na metodologia proposta, é necessário colocar fronteiras no projeto, ou seja, estabelecer limites de onde esse projeto vai atuar. Sendo assim, a Figura 6 apresenta o limite do projeto para o cálculo da emissão de linha de base.

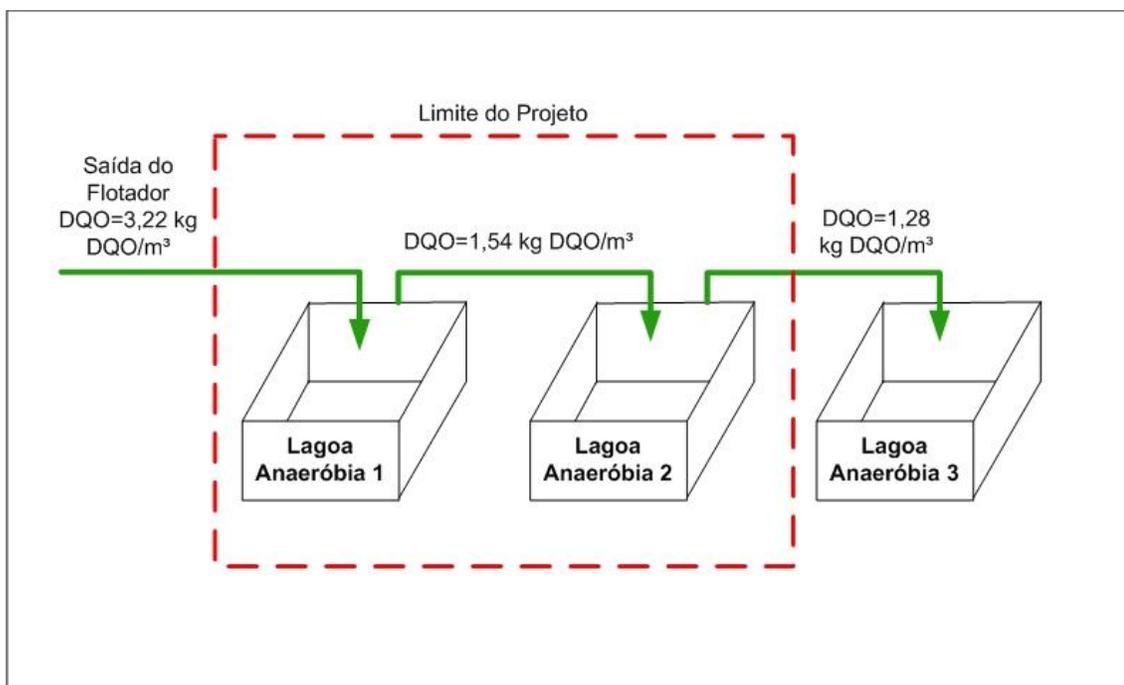


Figura 6 – Limites do projeto para o cálculo da Linha de Base.

Como pode ser observado na Figura 6, o projeto é limitado apenas às 2 primeiras lagoas anaeróbias do sistema de tratamento, pois são eles que serão transformadas em biodigestores com captação de gás.

Após a modificação do projeto, o sistema terá outra característica, como a segmentação do efluente do flotador físico-químico em duas linhas, uma partindo para o biodigestor 1, outra partindo para o biodigestor 2, sendo possível observar na Figura 7.

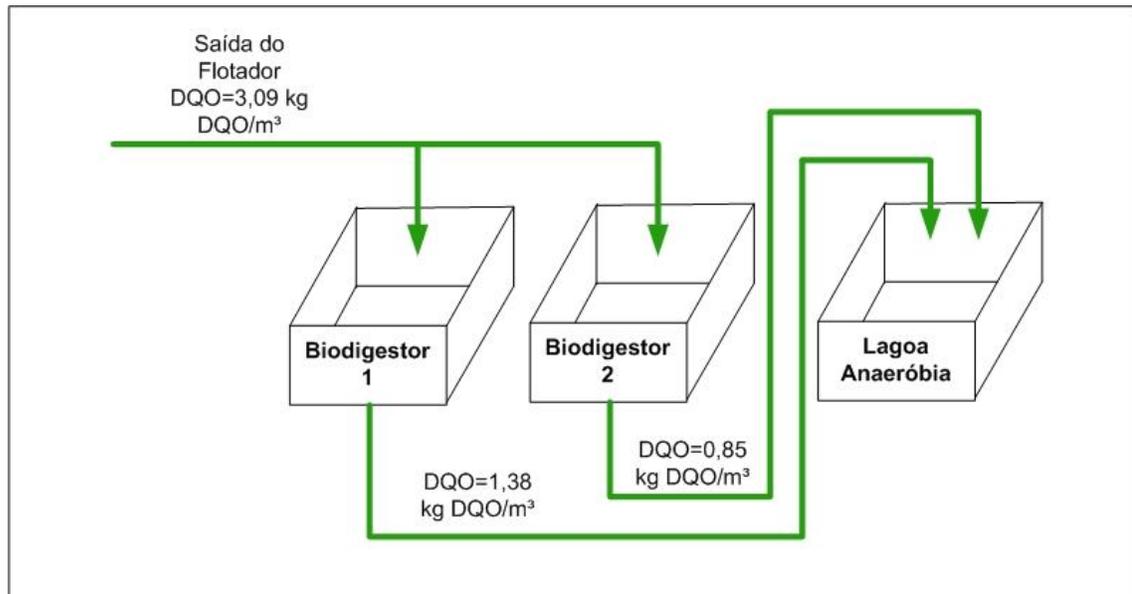


Figura 7 – Projeto de transformação das lagoas concluído (cálculo de emissões do projeto)

Para a utilização da metodologia supracitada, alguns pontos devem ser mencionados, os quais são citados abaixo:

- A empresa não faz tratamento de lodo, ou seja, o lodo não é separado da água que sai das lagoas, portanto, a geração de gás no tratamento e disposição desse é tido como zero;
- Como a queima do gás é realizada próximo ao local de geração, não existem perdas por vazamentos, sendo esses também considerados com valor zero;
- É desconsiderada a queima incompleta do metano nos motogeradores e no *flare*;
- É desconsiderada a emissão de metano no tratamento anaeróbio, devido ao sistema de recuperação proposto no projeto.

Sabendo desses fatores desconsiderados, para a utilização da metodologia, a Tabela 6 apresenta os dados de monitoramento necessários e os fatores constantes considerados para o modelo.

Tabela 6 – Dados de alimentação do modelo da metodologia utilizada

Variável	Definição	Valor
$EG_{BL,y}$	Energia Gerada pela queima do gás no ano y (MWh/ano)	471,934
$EF_{grid,y}$	Fator de emissão da rede no ano (tCO ₂ /MWh)	0,3112
$Q_{ww,y,i}$	Volume de efluente tratado no sistema de tratamento de linha de base i, no ano y (m ³ /ano)	1314000
$COD_{inflow,i,y}$	Demanda Química de Oxigênio que entra no sistema de tratamento de linha de base i no ano y (tDQO/m ³)	0,0032 e 0,0016
$\eta_{COD,BL,y}$	Eficiência da remoção da DQO do sistema de tratamento de linha de base i no ano y	0,51 e 0,18
$MCF_{ww,treatment,BL,i}$	Fator de correção de metano para o sistema de tratamento de efluente de linha de base i (Lagoa anaeróbia com profundidade > 2m)	0,8
$B_{0,ww}$	Capacidade de produção de metano no efluente (kg CH ₄ /kg DQO)	0,25
UF_{BL}	Fator de correção para contabilizar incertezas do modelo	0,89
GPW_{CH_4}	Potencial de aquecimento Global para o metano	21
$E_{consumed,y}$	Quantidade Líquida de eletricidade consumida da rede, como resultado da execução da atividade de projeto MDL no ano (MWh)	128,772
$h_{COD,PJ,y}$	Eficiência da remoção da DQO do sistema de tratamento de projeto i no ano y	0,55 e 0,73
UF_{PJ}	Fator de correção para contabilizar incertezas do modelo	1,12
CEF_{ww}	Eficiência de Captura do equipamento de recuperação de biogás	0,9

Fonte: IPCC (2006), UNFCCC (2011), PIRES (2010)

3.8 ANÁLISE DA VIABILIDADE DO INVESTIMENTO

Para as análises de viabilidade, serão avaliados 2 cenários, o consumo da energia elétrica produzida a partir do biogás e o consumo da energia elétrica produzida a partir do biogás juntamente com a receita de comercialização de RCE's.

Após a construção da projeção do fluxo de caixa para cada cenário, serão aplicados os métodos de análise da viabilidade econômica apresentados na seção 8 do capítulo 2, ou seja, o VPL (Equação 9), a TIR (Equação 10) e o PBD (Equação 11).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 QUANTIFICAÇÃO DE BIOGÁS GERADO

Para a produção de biogás nos biodigestores, pensou-se inicialmente em utilizar a quantidade real de biogás consumida pelos motogeradores da indústria, porém, ocorreram eventuais vazamentos que não puderam ser corrigidos instantaneamente, comprometendo assim a utilização desse dado para uma estimativa, levando em conta que esse dado será utilizado para vários anos. Por isso, o método utilizado foi o da estimativa de geração de metano proposta pela UNFCCC (2011). A Tabela 7 apresenta os valores reais de consumo de biogás pelos motogeradores e o resultado da estimativa teórica de geração de biogás, já a Figura 8 apresenta o gráfico que confronta esses dados.

Tabela 7 – Valores do consumo de biogás pelos motogeradores e resultados da estimativa teórica de geração de biogás

Mês (mês/ano)	Consumo de Biogás Pelos Motogeradores (m³ Biogás/mês)	Estimativa Teórica de Geração de Biogás (m³ Biogás/mês)
06/2010	28371,50	52755,70
07/2010	41821,84	52755,70
08/2010	51781,85	52755,70
09/2010	48821,89	52755,70
10/2010	32995,37	52755,70
11/2010	21757,01	52755,70
12/2010	11062,72	52755,70
02/2011	5718,52	52755,70
03/2011	24584,44	52755,70
04/2011	26535,09	52755,70
05/2011	67800,01	52755,70

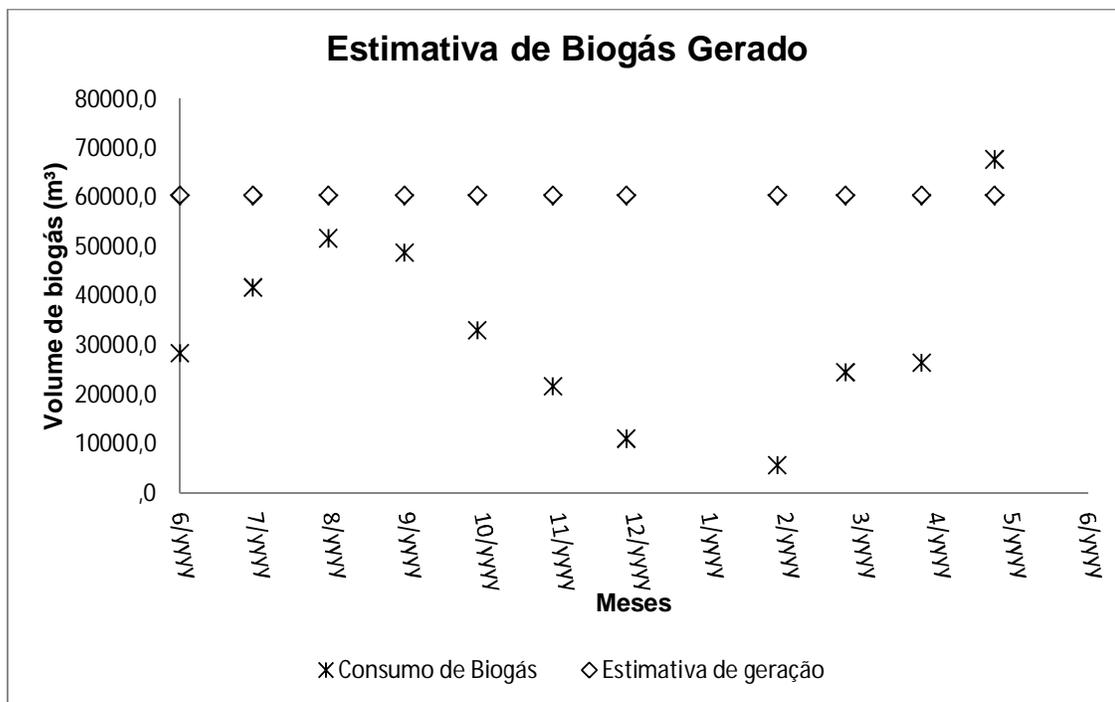


Figura 8 – Confronto entre a estimativa do modelo de biogás gerado com a quantidade real de biogás consumida pelos motogeradores.

Analisando os dados da Figura 8, observa-se uma redução no consumo de biogás pelos motores entre os meses de Outubro de 2010 até Abril de 2011. Essa redução de consumo ocorreu devido a vazamento nos biodigestores, onde houve uma grande demora para localizar e reparar essa falha.

O modelo de estimativa traz a variável de DQO do efluente e eficiência da lagoa. Para efeito de cálculo, foi realizada uma média de 1 ano dos resultados obtidos de cada um desses fatores (20 análises da DQO de entrada dos biodigestores e 12 análises de DQO de saída de cada biodigestor), tendo como resultado $3088,3 \pm 961,5$ mg DQO/L para a DQO de entrada dos biodigestores, $1381,3 \pm 342,6$ mg DQO/L para a DQO de saída do biodigestor 1 e $852,5 \pm 357,8$ mg DQO/L para a DQO de saída do biodigestor 2, ou seja, uma eficiência de remoção de DQO de 55% e 72% para os biodigestores 1 e 2, respectivamente.

Para confrontar com esses dados, em laboratório também foi simulado em reator o funcionamento da lagoa, como pode ser observado na Figura 9, que apresenta a geração de biogás do efluente.

Como pode ser observado na Figura 9, o processo teve um tempo de detenção de aproximadamente 11 dias, interrompendo-o quando houve uma linearização do acúmulo de gás produzido. Com o resultado obtido, pode-se compará-lo ao resultado da estimativa de geração de biogás do modelo já apresentado. Como no reator o processo foi em batelada, com um volume de apenas 4 litros de efluente, gerando 1,340 litros de biogás (Experimento 1) e 0,640 litros de biogás (Experimento 2), pode-se estimar a produção se fosse um sistema contínuo com vazão igual ao da entrada dos biodigestores, apenas por regra de três, obtendo assim um valor estimado da geração de biogás de aproximadamente 51 m³/h para o experimento 1 e 24 m³/h para o experimento 2, que quando comparado a 84,01 m³/h obtidos no modelo, tornam os valores do modelo insatisfatórios para utilização. Porém, como em uma lagoa anaeróbia vários são os fatores afetam essa geração de biogás, optou-se por descartar o resultado analisado em bancada, pois não obteve-se uma padronização do lodo, fator esse importantíssimo para a geração de biogás, pois nele estão contidos a maioria das bactérias envolvidas no processo.

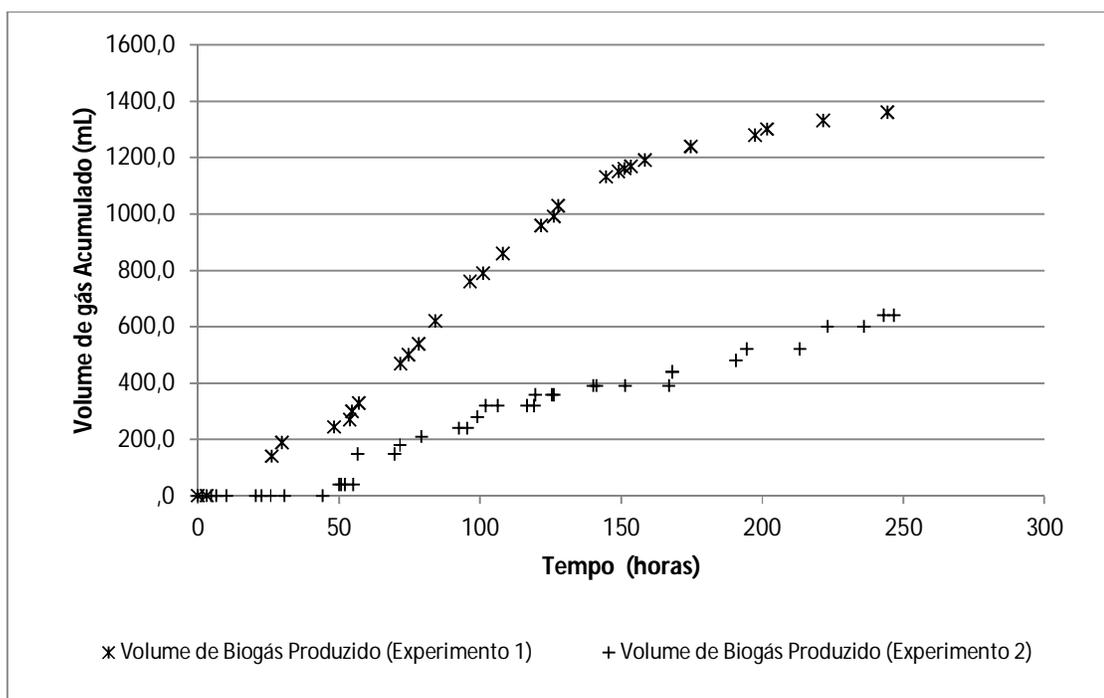


Figura 9 – Simulação da geração de biogás em reator anaeróbio de bancada.

Em outro experimento (Experimento 3), foi verificado a taxa de geração de biogás durante um período de aproximadamente 1000 horas, até haver a linearização do volume acumulado de produção, como pode ser observado na Figura 10.

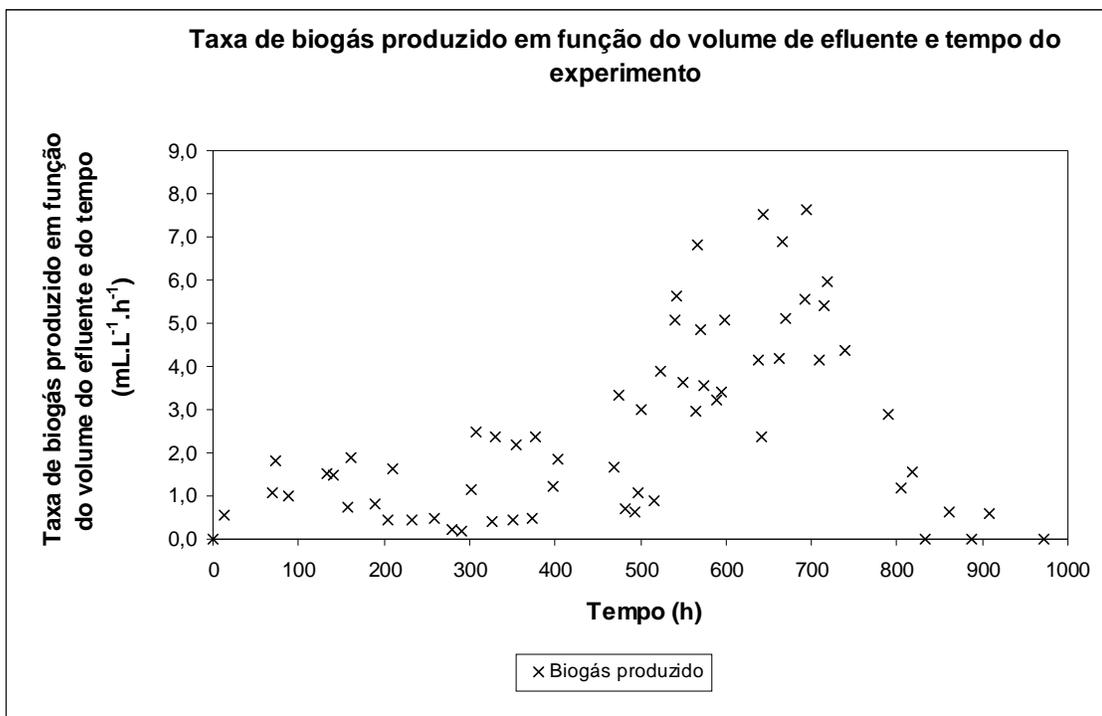


Figura 10 – Taxa de produção de biogás em função do volume do efluente e tempo do experimento.

Como pode ser observado na Figura 10, a produção de biogás teve um aumento significativo somente após 500 horas de experimento, ou seja, esse foi o tempo para o aumento dos microorganismos fermentativos, aumentando significativamente a produção de biogás. Esse experimento reforça a idéia da falta da padronização do lodo no bioreator.

Como resultado final do Experimento 3, às 972,25 horas após o início do experimento (término da corrida experimental), houve uma produção acumulada de 1,751 L biogás/L Efluente. Levando em consideração uma vazão de 150 m³ Efluente/h, o potencial de geração de biogás do efluente é de aproximadamente 260 m³ biogás/h.

Comparando o resultado do experimento com o valor encontrado a partir do modelo, tem-se uma diferença significativa, porém podem ser citados alguns fatores para correção:

- A eficiência de remoção da carga orgânica pelos biodigestores é de, em média, 60%;
- As condições do bioreator são ideais para a formação do biogás (rotação de 30 RPM e temperatura constante de 35 °C);
- Não foi avaliada a carga orgânica inicial do efluente, o que pode ter gerado o desvio na geração de biogás.

A partir de todos os dados levantados, a melhor alternativa para o estudo da geração de energia elétrica é através da metodologia ASM-III.H proposta por UNFCCC (2011a).

4.2 POTÊNCIA DOS GERADORES NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Como resultado da geração de energia elétrica, a potência real dos motogeradores é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultado da potência real dos geradores.

Gerador	Potência nominal (KW)	Potência Real (KW)
Gerador 1	80	63,44607834
Gerador 2	40	29,61342768
Gerador 3	40	30,88931876

4.3 CONSUMO DE BIOGÁS PELOS MOTORES

Outra questão avaliada foi o consumo de biogás pelos motores, dados estes apresentados na Tabela 9, levando em conta que o biogás gerado nos biodigestores

tem em média 80% de CH₄. Para obter esse resultado, são necessários os tempos de funcionamento de cada motogerador, estes sendo calculados através da ferramenta Solver, do Excel®, onde teve-se uma função objetivo de maximizar a quantidade de energia elétrica gerada, utilizando as restrições da disponibilidade de biogás, e, como consideração do tempo manutenção e o desgaste do equipamento, cada motogerador não pode ficar ligado mais que 12 horas por dia e necessariamente ligados nos horários de pico (das 18:00 às 21:00 horas).

Tabela 9 – Consumo de biogás pelos motogeradores e tempo de funcionamento diário

Motogerador	Consumo de Biogás (m³/h)	Tempo de operação por dia (h)
Motogerador 1	102,86	8,94
Motogerador 2	45,71	12,0
Motogerador 3	45,71	12,0

4.4 LEVANTAMENTO DOS CUSTOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Finalmente, para a análise do custo tanto do biogás quanto da energia elétrica gerada, foram levantados os preços dos equipamentos necessários para esse sistema funcionar. Na Tabela 10 é apresentado o levantamento de preço para todas as ações tomadas na implantação dos biodigestores pela empresa e na Tabela 11 são apresentados os preços para a implantação do sistema de geração de energia elétrica.

Tabela 10 – Levantamento dos gastos das ações tomadas para implantação dos biodigestores

Ação	Valor (R\$)
Projeto para transformação das lagoas em biodigestores	13.139,00

Tabela 10 – Levantamento dos gastos das ações tomadas para implantação dos biodigestores

Ação	Valor (R\$)
Adequação da lagoa 1 para Biodigestor	115.891,91
Adequação da lagoa 2 para Biodigestor	77.766,66
Construção do Biodigestor 1 e 2	361.824,60
Sistema de agitação dos Biodigestores	11.836,85
Total (CIB)	580.459,02

A apresentação das ações na Tabela 10 não está totalmente discriminada, por exemplo, na ação adequação da lagoa 1 para biodigestor está vinculada a construção de taludes limpeza e terraplanagem da lagoa. Já a ação construção do biodigestor, tem-se o custo das lonas de revestimento das lagoas e a instalação das mesmas.

Tabela 11 – Levantamento dos gastos das ações tomadas para implantação do sistema de geração de energia elétrica

Ação	Valor (R\$)
Projeto casa de força	3.500,00
Tubulações	4.996,53
Mão de obra instalação das tubulações	2.815,50
Construção da Casa dos Motogeradores	16.048,35
Motogerador 50 KVA + painel de controle	73.500,00
Motogerador 50 KVA + painel de controle	73.500,00
Motogerador 100 KVA + painel de controle	91.500,00
Quadro Geral da casa de Força	9.900,00
Gasto com materiais elétricos	2.423,90
Medidor de Vazão	5.350,00
Termômetro digital	147,70
Instrumentação	94.038,00
Total (CIM)	377.719,98

4.5 DETERMINAÇÃO DO CUSTO DO BIOGÁS E DA ENERGIA ELÉTRICA

A partir de todos os dados levantados na Tabela 10 e na Tabela 11, é possível realizar a anualização dos custos e investimento, a partir de uma taxa de juros de 7% a.a., taxa essa aplicada pelo FINEP, entidade que financiou esse projeto de geração de energia, e uma disponibilidade de 365 dias ao ano. Na Tabela 12 são apresentados todos os dados calculados.

Tabela 12 – Resultados do custo do biogás e da geração de energia

Tempo de Amortização (anos)	Custo do Biogás (R\$/m³)	Custo do KWh de energia (R\$/KWh)
5	0,281	0,723
10	0,161	0,415
15	0,128	0,330
20	0,113	0,291

Como pode ser observado nos resultados apresentados na Tabela 12, os custos de energia gerada são relativamente altos, comparados às taxas aplicadas pela concessionária de energia do Paraná, que tem um custo de em torno de R\$ 0,84 o KWh nos períodos de ponta (18:00 às 21:00 horas) e R\$ 0,13 nos períodos fora de ponta.

Já os custos da geração e captação do biogás, podem ser comparados a estudos realizados por Souza (2004) e Coldebella (2006), um trabalhando com aproveitamento do biogás de dejetos da bovinocultura de leite e ambos trabalhando com aproveitamento do biogás de dejetos de suínos, com seus resultados apresentados na Tabela 13.

Ao compararem-se os dados da Tabela 13, nota-se clara diferença, entre os custos do biogás de aproveitamento da suinocultura, nem tanto quando comparado aos resultados de Souza (2004), mas em relação aos resultados de Coldebella (2006), tem-se uma grande disparidade entre esses valores, tendo um comparativo de custo de acima de 200% a diferença. Essa divergência de valores se dá pela

diferença na composição dos efluentes gerados, sendo o resíduo gerado em granjas de suínos um material com alta carga orgânica, tendo assim um maior potencial de geração de biogás, como visto no modelo proposto, a DQO desse efluente é diretamente proporcional à quantidade de metano gerado no efluente. Entretanto, comparando-se ao custo do biogás gerado na bovinocultura, o custo biogás gerado pela empresa em estudo se torna mais atrativo.

Tabela 13 – Resultados apresentados por Souza e Coldebella quanto ao custo da produção do biogás

Tempo de Amortização (anos)	Souza (R\$/m³)	Coldebella - Suinocultura (R\$/m³)	Coldebella – Bovinocultura (R\$/m³)	Custo do Biogás (R\$/m³)
5	0,21	0,107	0,394	0,281
10	0,13	0,063	0,229	0,161
15	0,11	0,050	0,184	0,128
20	0,10	0,045	0,164	0,113

Fonte: SOUZA (2004); COLDEBELLA (2006)

Já Salomon (2009), encontrou um custo de R\$ 0,0086 o metro cúbico de biogás, gerado pelo resíduo de usina de álcool (vinhaça), num período de amortização de 10 anos, a uma taxa de 9,25% a.a.

Em relação ao custo da energia elétrica gerada, também pode-se fazer um comparativo aos valores encontrados por Coldebella (2006) e Souza (2004) referentes a uma operação de 10 horas por dia dos motogeradores, porém, os dois autores utilizam para este cálculo a potência nominal dos geradores, sendo possivelmente um valor não muito confiável. Por isso, a Tabela 14 apresenta uma análise, tanto do custo da energia elétrica com a potência real dos motogeradores quanto da potência nominal, para efeitos comparativos.

Como pode ser observado na Tabela 14, o resultado obtido a partir das potências nominais dos motogeradores, tem-se um custo menor quando comparado a energia elétrica gerada a partir do biogás produzido de dejetos bovinos, porém quando comparado ao biogás gerado da suinocultura, tem-se um custo muitíssimo

elevado, isso se deve ao custo do biogás. Porém, os resultados reais de custo da energia elétrica gerada são muito superiores quando comparado à suinocultura, porém quando comparado à bovinocultura, não possui diferença muito significativa.

Tabela 14 – Comparação do resultado do custo da energia elétrica com o resultado obtido por outros autores.

Tempo de Amortização (anos)	Coldebella – Suinocultura (R\$/KWh)	Coldebella – Bovinocultura (R\$/KWh)	Souza (R\$/KWh)	Custo a partir da potência Nominal (R\$/KWh)	Custo a partir da Potência Real (R\$/KWh)
5	0,156	0,788	0,138	0,558	0,723
10	0,09	0,458	0,09	0,320	0,415
15	0,073	0,368	0,074	0,254	0,330
20	0,065	0,328	0,067	0,225	0,291

Fonte: COLDEBELLA (2006); SOUZA (2004)

4.6 ANÁLISE ECONÔMICA DO INVESTIMENTO

Para a análise de investimento, foi utilizada a taxa de juros de 7% a.a. aplicada pelo FINEP, e tempos de amortização entre 5 e 20 anos, sendo os resultados apresentados na Tabela 14, a partir das tarifas apresentadas na Tabela 15. Já a Tabela 16 traz um demonstrativo do fluxo de caixa para um tempo de amortização de 10 anos.

Como se observa na Tabela 15, o empreendimento somente é viável para longos tempos de amortização, acima de 10 anos, quando a taxa de retorno passa a ser acima de 7%, que é a taxa de empréstimo.

Outra ferramenta proposta para análise de investimento é o PayBack Descontado, que aplicado ao fluxo de caixa obtido com a geração própria de energia elétrica, verifica-se que o empreendimento possui um tempo de retorno

relativamente alto, 11 anos e 7 meses, o que extrapola a utilização máxima dos equipamentos, pois estes possuem vida útil de aproximadamente 10 anos.

Tabela 15 – Resultado da Taxa de Retorno do Investimento (TIR).

Tempo de Amortização (anos)	TIR (%)	VPL (R\$)
5	-13,09	-452.471,47
10	4,88	-91.908,99
15	9,63	165.167,07
20	11,43	355.397,64

Tabela 16 – Fluxo de caixa para um período de amortização de 10 anos.

Ano	Investimento Inicial (R\$)	OM (R\$)	Receita Horário Pico seco (R\$)	Receita Horário Pico úmido (R\$)	Receita fora de pico seco (R\$)	Receita fora de pico úmido (R\$)	Fluxo de Caixa (R\$)
0	-958.179,00	0	0	0	0	0	-958.179
1	0	-38.327,16	67.849,12	47.334,38	28.062,97	18.418,05	123.337,36
2	0	-38.327,16	67.849,12	47.334,38	28.062,97	18.418,05	123.337,36
3	0	-38.327,16	67.849,12	47.334,38	28.062,97	18.418,05	123.337,36
4	0	-38.327,16	67.849,12	47.334,38	28.062,97	18.418,05	123.337,36
5	0	-38.327,16	67.849,12	47.334,38	28.062,97	18.418,05	123.337,36
6	0	-38.327,16	67.849,12	47.334,38	28.062,97	18.418,05	123.337,36
7	0	-38.327,16	67.849,12	47.334,38	28.062,97	18.418,05	123.337,36
8	0	-38.327,16	67.849,12	47.334,38	28.062,97	18.418,05	123.337,36
9	0	-38.327,16	67.849,12	47.334,38	28.062,97	18.418,05	123.337,36
10	0	-38.327,16	67.849,12	47.334,38	28.062,97	18.418,05	123.337,36

4.7 OBTENÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO

Para a obtenção de crédito de carbono, se o projeto possui outras receitas, como a geração e consumo de energia elétrica, o projeto deve demonstrar adicionalidade.

O conceito de adicionalidade é explicado sucintamente por FRONDIZI (2009), dizendo que um projeto proposto adicional, como a geração de energia elétrica, não seria implantado sem o incentivo do MDL, ou seja, o sistema de geração elétrica não pode ser uma alternativa economicamente viável, portanto, primeiramente, deve-se fazer uma avaliação econômica somente na implantação do sistema de geração de eletricidade, para verificação se realmente é um projeto não-viável.

Como demonstrado no item 6 deste capítulo, em um investimento normal, com um tempo de amortização de pagamento de 10 anos, o projeto de geração de energia elétrica apenas torna-se inviável economicamente. Portanto, esse projeto tem potencial para entrada no mercado do carbono.

Com isso, a partir da metodologia ASM-III.H (UNFCCC, 2011), foi possível avaliar qual a redução de impacto que o projeto gera para o ambiente (em redução de emissões atmosféricas) gerando assim créditos de carbono. Toda a descrição da metodologia encontra-se em uma planilha de cálculos desenvolvida no Microsoft Excel®.

Como resultado da metodologia, encontrou-se os valores apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Quantificação da redução de emissão por ano.

ANO	BE_y (tCO₂)	PE_y (tCO₂)	LE_y (tCO₂)	ER_y (tCO₂)
1	16.748,07	6.887,41	0	9.860,65
2	16.748,07	6.887,41	0	9.860,65
3	16.748,07	6.887,41	0	9.860,65
4	16.748,07	6.887,41	0	9.860,65
5	16.748,07	6.887,41	0	9.860,65
6	16.748,07	6.887,41	0	9.860,65
7	16.748,07	6.887,41	0	9.860,65
8	16.748,07	6.887,41	0	9.860,65
9	16.748,07	6.887,41	0	9.860,65
10	16.748,07	6.887,41	0	9.860,65

Como pode ser observado na Tabela 17, ao longo dos 10 anos de obtenção dos créditos de carbono, teve-se uma redução de emissão de aproximadamente 10 toneladas de gás carbônico por ano.

Considerando a venda desses créditos de carbono a um preço comumente adotado no mercado, cerca de 10,00 € a tonelada de CO₂, a um câmbio com o real de R\$ 2,46, tem-se um preço estimado de aproximadamente R\$ 24,60. Com isso, a na venda de créditos de carbono, a empresa geraria uma receita anual adicional de aproximadamente R\$ 242.572,00.

Através dessa nova receita, é possível verificar novamente a viabilidade do investimento, com um contrato de 10 anos de venda de créditos. Na Tabela 18 são apresentados todos os dados de análise econômica tanto do projeto com venda de créditos de carbono quanto somente na geração de energia elétrica em um período de 10 anos.

Tabela 18 – Análise econômica da venda de energia elétrica e da comercialização dos RCE's

Receita	VPL (R\$)	TIR (%)	PBD (anos)
Geração de Energia Elétrica	-91.908,99	4,88	11,60019786
Geração de Energia Elétrica + Comercialização das RCE's	1.611.815,23	36,49	2,99278734

Como demonstrado na Tabela 18, a receita adicional na comercialização das RCE's contribuem muitíssimo para o sucesso do empreendimento, aumentando inúmeras vezes a taxa de retorno do mesmo. Conforme apresentado, o processo de geração de energia elétrica com a comercialização das RCE's faz com que o investimento se pague em pouco tempo, menos de 3 anos, ao contrário do investimento que tem somente a geração de energia elétrica, que tem um tempo de retorno do investimento de quase 12 anos.

5 CONCLUSÃO

O aproveitamento do biogás gerado a partir da digestão anaeróbia de efluentes industriais se apresenta como uma alternativa muito viável para a geração de energia elétrica e comercialização no mercado do carbono.

Pode-se estimar a produção de biogás nos biodigestores em 84,01 m³ de biogás por hora. Este dado é resultado de um modelo de geração já existente, porém quando confrontado com o consumo diário de biogás pelos motogeradores, torna-se um dado significativo para utilizá-lo em uma simulação.

O método da anualização do investimento se mostrou como um ótimo método para se estimar o custo da produção do biogás, resultando em um custo de R\$ 0,161/m³ de biogás, considerando um tempo de amortização de investimento de 10 anos a um custo de 7% ao ano, sendo um valor pouco atrativo quando comparado ao custo para produção do biogás a partir de dejetos suínos.

Já na avaliação do custo da geração de energia elétrica, utilizando o mesmo método da anualização e mesmas condições de financiamento, resultou em um custo de R\$ 0,415/kWh de energia elétrica, tornando-se também pouco atrativa quando comparada às tarifas aplicadas pela fornecedora de energia.

Através da análise de viabilidade de investimento, provou-se o investimento feito somente para a geração de energia elétrica não é economicamente viável, resultando em um tempo de retorno de investimento de 11 anos e 7 meses, período superior ao da vida útil dos equipamentos. Porém, essa inviabilidade abre espaço para a comercialização de RCE's, além promover o *Marketing Verde*, podendo propulsionar o nome da indústria como ecologicamente correta

A partir de metodologias reconhecidas para o cálculo de redução de emissões, encontrou-se uma redução total de 9.860,65 toneladas de CO₂ equivalente, que em sua comercialização poderia gerar uma média R\$ 242.572,00, tornando assim o investimento muito viável, resultando de uma TIR de 36,5% e um VLP de R\$ 1.611.815,23.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar o potencial de redução de emissão de carbono, considerando toda a mudança realizada na empresa;

Verificar a viabilidade de investimento para a total adequação do processo para reutilização da água no frigorífico.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, G. S. da. **Avaliação Experimental da Duração de Combustão para Diferentes Combustíveis, em um Motor Padrão Ciclo Otto ASTM-CFR.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. 132p.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** 3 ed. Brasília: ANEEL, 2008. 236 p.

ATKINS, P. **Atkins: Físico-Química.** v. 1. 8 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2008. 589 p.

AVELLAR, L. H. N.; CARROCCI, L. R.; SILVEIRA, J. L. Biogás na Co-Geração: a utilização de subprodutos agroindustriais na geração de energia em unidades cogeneradoras. **Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento.** Pagina 46-49, nº13, ano II, Março/abril 2000.

BOHRZ, G. I. **Geração de Metano em Lagoa Anaeróbia: um estudo de caso em abatedouro de bovinos.** Dissertação (Mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processo) apresentada à Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010. 153p.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução N° 430, de 13 de Maio de 2011. Ministério do Meio Ambiente, 2011.

BRASIL. PROTOCOLO DE QUIOTO – Editado e Traduzido pelo Ministério da Ciência e Tecnologia com apoio do Ministério de Relações Exteriores da República Federativa do Brasil. Disponível em <http://homologa.ambiente.sp.gov.br/biogas/docs/protocolo_quioto.pdf>, acesso em 13 Jun. 2011.

CARCIOFI, B. A. M. **Estudo do Resfriamento de Carcaças de Frango em Chiller de Imersão em Água.** Dissertação (Mestrado) apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005. 92p.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Definição de Biogás.** Disponível em <http://homologa.ambiente.sp.gov.br/biogas/biogas.asp>, acesso em 18/Mai/2011.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Emissões de Metano no Tratamento e na Disposição de Resíduos**. Ministério de Ciência e Tecnologia, São Paulo, 2006.

CHERNICHARO, C. A. de L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: UFMG, 1997. 245p

COLDEBELLA, A. **Viabilidade do uso do Biogás da Bovinocultura e Suinocultura para Geração de Energia Elétrica e Irrigação de Propriedades Rurais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) apresentada à Universidade do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006. 59p.

COSTA, A. A. dos S. **Análise Técnico-Econômica da Utilização de um Gerador a Gás Natural em um Sistema de Cogeração: Estudo de Caso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) apresentada à Universidade Estadual de São Paulo, Guaratinguetá, 2003. 112 p.

EPA – Environmental Protection Agency. **METHANE**. Disponível em <<http://www.epa.gov/methane>>, acesso em 13 Jun. 2011.

FERRAZ, J. M. G.; MARRIEL, I. E. **Biogás: uma fonte alternativa de energia**. Sete Lagoas, EMBRAPA/CNPMS, 1980.

FISHER, M. E.. **Biogas Purification: H₂S Removal using Biofiltration**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) apresentada à Universidade de Waterloo, Waterloo, Ontario, Canadá, 2010. 124 p.

FRARE, L. M. **Estudos para Implementação de uma Planta de Remoção de Ácido Sulfídrico de Processos de Produção de Biogás**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) apresentado à Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006. 182 p.

FRONDIZI, I. M. de R. L. (coord.). **O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: guia de orientação 2009**. Rio de Janeiro: Imperial Novo Milênio: FIDES, 2009. 131 p.
GIL, A. C. Como **Elaborar Projetos de Pesquisa**. 3. Ed. São Paulo: Atlas, 1991.

GOOGLE MAPS. Disponível em <<http://maps.google.com.br/maps?hl=pt-BR&tab=wl>>, acesso em 5 jun. 2011.

HIRCHFELD, H. **Engenharia Econômica e Análise de Custos**: aplicações práticas para economistas, engenheiros, analistas de investimentos e administradores. 7 ed. São Paulo: Atlas, 2010. 519 p.

ICLEI – Brasil – Governos Locais pela Sustentabilidade. Manual para o Aproveitamento do Biogás. v 1 – Aterros Sanitários. Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de Projetos do Brasil, São Paulo, 2009. 80 p.

IPCC – Intergovernmental Plane of Climate Changes. Guidelines for National Greenhouses Gas Inventories. v.5 – Waste. IGES: Hayama, Japan, 2006.

KOHLBACH S.A.. **Manual de geradores**. Jaraguá do Sul: Kohlbach, 19--. 19 p.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão: uma alternativa energética**. São Paulo, SP: Nobel, 1986. 93 p.

PERLINGEIRO, C. A. G. **Engenharia de Processos**: análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos. São Paulo, Blucher, 2005. 198 p.

PIRES, T.C (coord.). **Manual de Capacitação: Mudança Climática e Projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo**. Centro de Gestão de Estudos Estratégicos (CGEE), Brasília, DF. 2010.

PONTES, A. F. V. **Avaliação do Desempenho de Reator Anaeróbio-Aeróbio com Recirculação da Fase Líquida no Tratamento de Água Residuária Proveniente de Abatedouro de Aves**. Dissertação (Mestrado) apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009. 127p.

PRADO, M. A. C.; CAMPOS, C. M. M.; SILVA, J. F. Estudo da Variação da Concentração de Metano no Biogás Produzido a partir de Águas Residuárias do Café. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, v. 34, n.2, p. 475-484, mar-abr., 2010.

PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e disposição Controlada no Solo. José Roberto Campos (Coordenador). Rio de Janeiro: ABES, 1999. 464p.

RIBEIRO, A. de Á. (Tradutora). **Manual do MDL para Desenvolvedores de Projetos e Formuladores de Políticas**. Ministério do Meio Ambiente, Japão, 2006. 109 p.

SALOMON, K. R. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade.** Tese (Doutorado) apresentada à Universidade Federal de Itajubá (MG), 2007. 219 p.

SAMANEZ, C. P. **Matemática financeira: aplicações à análise de investimentos.** 4. ed. São Paulo: Prentice-Hall, 2010. xii, 274 p.

SGANZERLA, E. **Biodigestor: uma solução.** Porto Alegre: Agropecuária, 1983. 81 p.

SILVA FILHO, P. A. da. **Diagnóstico Operacional de Lagoas de Estabilização.** Dissertação (Mestrado) apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007. 169 p.

SILVA, V. R. O. **Efeito de Antibióticos Utilizados em Suinocultura sobre a Digestão Anaeróbia de Efluentes.** Tese (Doutorado) apresentada à Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007. 99p.

SOUZA, R. G. de. **Desempenho do Conjunto Motogerador Adaptado a Biogás.** Dissertação (Mestrado) apresentado à Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006. 40 p.

SOUZA, S. N. M.; PEREIRA, W. C.; NOGUEIRA, C. E. C.; PAVAN, A. A.; SORDI, A. Custo da Eletricidade Gerada em Conjunto de Motor Gerador Utilizando Biogás da Suinocultura. **Acta Scientiarum. Technology.** Maringá, v. 26. no. 2. p. 127-133, 2004.

U.S.EPA (Environmental Protection Agency). Greenhouse Gas Emissions Estimation Methodologies for Biogenic Emissions from Selected Sources Categories: Solid Waste Disposal, Wastewater Treatment and Ethanol Fermentation. RTI International, 2010.

UEHARA, M. Y. **Operação e manutenção de lagoas anaeróbias e facultativas.** São Paulo: CETESB, 1989. 91p.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. CDM – Executive Board. III.H./Version 16. Sectorial Scope 13, 2010. Disponível em <<https://cdm.unfccc.int/methodologies/SSCmethodologies/approved>>, acesso em 15 Jun. 2011a.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. CMD – Executive Board. I.D/Version 17. Sectorial Scope, 01, 2011. Disponível em <<https://cdm.unfccc.int/methodologies/SSCmethodologies/approved>>, acesso em 15 Jun. 2011b.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgoto**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. 243 p.