



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Estudo da Viabilidade da Utilização de Biomassa para Geração de Energia Elétrica

Bianca Xavier Rezende

João Monlevade, MG
2017

Bianca Xavier Rezende

Estudo da Viabilidade da Utilização de Biomassa para Geração de Energia Elétrica

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Welbert Alves Rodrigues

Coorientador: Prof. Sávio Figueira Corrêa

Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2017

R467e

Rezende, Bianca Xavier.

Estudo da viabilidade da utilização de biomassa para geração de energia elétrica [manuscrito] / Bianca Xavier Rezende. - 2018.

49f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. MSc. Welbert Alves Rodrigues.

Coorientador: Prof. Dr. Savio Figueira Corrêa.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Ciências Exatas e Aplicadas.

1. Energia elétrica - Produção. 2. Biomassa. I. Rodrigues, Welbert Alves. II. Corrêa, Savio Figueira. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 620.95

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br



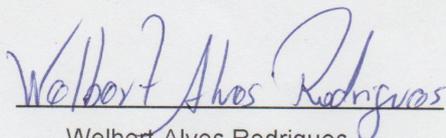
ANEXO III - ATA DE DEFESA

Aos dezesseis dias do mês de Fevereiro de 2018, às 14:00 horas, no bloco B deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo (a) formando (a) Bianca Xavier Rezende, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Welbert Alves Rodrigues, Sávio Figueira Corrêa, Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho e Cecilia Silva Monnerat. O (a) candidato (a) apresentou a monografia intitulada: **Estudo da Viabilidade de uma Usina Elétrica utilizando Biomassa**. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela aprovada do (a) candidato (a), com a nota média 9,0, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo (a) formando (a).

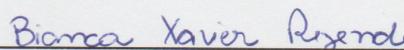
Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
Welbert Alves Rodrigues	9,0
Sávio Figueira Corrêa	9,0
Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho	9,0
Cecilia Silva Monnerat	9,0
Média	9,0

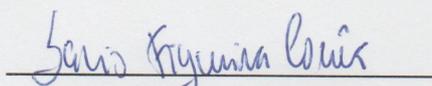
João Monlevade, 16 de Fevereiro de 2018.



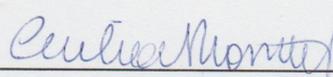
Welbert Alves Rodrigues
Professor (a) Orientador (a)



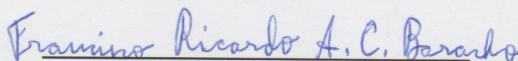
Bianca Xavier Rezende
Aluno (a)



Sávio Figueira Corrêa
Professor (a) Co-Orientador (a)



Cecilia Silva Monnerat
Professor (a) Convidado (a)



Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho
Professor (a) Convidado (a)



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Estudo da Viabilidade da utilização de Biomassa para geração de energia elétrica” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 22 de Fevereiro de 2018.

Bianca Xavier Rezende
Bianca Xavier Rezende

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por me dar forças pra cumprir mais essa etapa em minha vida.

Aos meus pais, que me tornaram a pessoa que sou hoje, sempre me apoiando e incentivando.

À minha irmã que mesmo com a distância sempre esteve muito presente, me dando forças e me aconselhando.

Aos amigos da Elétrica pelo incentivo e apoio constantes, as meninas da República Só Fadinhas pelo companheirismo.

À Universidade Federal de Ouro Preto por me proporcionar a oportunidade do aprendizado.

Aos professores por todos os ensinamentos e, principalmente aos Professores Welbert Alves Rodrigues e Sávio Corrêa pela orientação e ajuda para realização deste trabalho.

A todos que fizeram parte da minha formação, muito obrigada.

Resumo

Com o crescente aumento do consumo de energia, surgiu a necessidade de novas fontes energéticas. Uma das opções com grande possibilidade de crescimento é a utilização da biomassa para gerar energia elétrica. Este trabalho apresenta um estudo em geração de energia a partir de biomassa e suas possíveis fontes energéticas, dando destaque as fontes brasileiras. São apresentadas as principais fontes, com o intuito de comparar o potencial energético e sua abundância no Brasil.

Com o intuito da diversificação da matriz energética brasileira, foi realizado um estudo de caso que utiliza bagaço da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica em um biodigestor modelo canadense. Posteriormente, foi realizada uma análise de viabilidade técnica e econômica para a implantação de usinas biomassa. Os resultados mostram que o investimento nesta tecnologia para produção de energia elétrica, apesar de apresentar elevado custo é altamente atrativo, já que utiliza apenas o bagaço da cana-de-açúcar, o que pode aumentar o lucro com a venda ou utilização da cana. A utilização deste tipo de usina é indicada para pequenos produtores que já possuem a lavoura plantada.

Palavras-chave: Energia, Biomassa, Biodigestores, Geração de energia, Análise econômica, Análise ambiental.

Abstract

With the increasing increase of energy consumption, the need for new energy sources arises. One of the options with great possibility of growth is a use of biomass to generate electricity. This work presents a study on energy generation from biomass and its sources of energy sources, highlighting as Brazilian sources. The main sources are presented, in order to compare the energy potential and its abundance not Brazil.

In order to diversify the Brazilian energy matrix, a case study was carried out, which is used as a sugarcane bagasse to generate electricity in a Canadian model biodigester. Subsequently, an analysis of the technical and economical viability for the implantation of biomass plants was carried out. The results show that investing in this technology for electric power generation, while getting into high quality, is what it is that you can increase profit on a sale or use of cane. The use of this type of plant is indicated for small producers who already own a planted crop.

Keywords: Energy, Biomass, Biodigesters, Energy generation, Economic analysis, Environmental analysis.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Consumo final de energia elétrica por fonte.	3
Figura 2 – Aumento da potência instalada.	4
Figura 3 – Esquema da geração biomassa líquida.	5
Figura 4 – Esquema da geração biomassa sólida.	6
Figura 5 – Histórico do consumo de lenha no Brasil.	8
Figura 6 – Evolução da produtividade das principais culturas - cereais e leguminosas.	10
Figura 7 – Vista frontal do Biodigestor Indiano.	16
Figura 8 – Vista frontal do Biodigestor Chinês.	17
Figura 9 – Vista frontal do Biodigestor Canadense.	17
Figura 10 – Turbina a gás.	18
Figura 11 – Turbina ciclo brayton aberto.	19
Figura 12 – Turbina ciclo brayton fechado.	19
Figura 13 – Funcionamento de um motor de ciclo Otto.	20
Figura 14 – Funcionamento de um motor ciclo Diesel.	21
Figura 15 – Detalhamento do processo de transformação da biomassa em energia.	22
Figura 16 – Biodigestor canadense em construção.	23
Figura 17 – Dimensões do biodigestor.	25
Figura 18 – Dimensões do biodigestor.	28
Figura 19 – Evolução da produtividade da cana-de-açúcar entre 1975 e 2012.	29
Figura 20 – Payback para investimento total.	32
Figura 21 – Payback para investimento apenas na usina biomassa.	32
Figura 22 – Parâmetros para análise econômica.	34
Figura 23 – Principais fontes antropogênicas de metano.	36

Lista de tabelas

Tabela 1 – Detalhamento do uso da biomassa para geração elétrica no mercado brasileiro.	7
Tabela 2 – Área total com florestas plantada por gênero e estado (mil ha)	9
Tabela 3 – Poderes caloríficos das fontes energéticas brasileiras.	14
Tabela 4 – Quantidade de material para produzir 1 m^3 de biogás	24
Tabela 5 – Dimensões do Biodigestor	24
Tabela 6 – Dimensionamento do Biodigestor	27
Tabela 7 – Custo para implantação do biodigestor e do grupo gerador	30
Tabela 8 – Custos totais	31
Tabela 9 – Análise financeira para investimento em poupança	34
Tabela 10 – Análise financeira para usina fotovoltaica	34

Lista de abreviaturas e siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
BIG	Banco de Informações de Geração
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ha	Hectare
kcal	Quilocaloria
kg	Quilograma
kW	Kilowatt
Mt	Megatonalada
MW	Megawatt
PNE	Plano Nacional de Energia
THR	Tempo de retenção hidráulica
TIR	Taxa interna de retorno
TMA	Taxa mínima de atratividade
TR	Taxa residencial
VB	Volume do biodigestor
VC	Volume de controle
VPL	Valor presente líquido

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização e Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo Geral	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Estrutura do Trabalho	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Contexto da Geração de Energia Elétrica	3
2.2	Geração Biomassa	4
2.3	Fontes Energéticas	6
2.3.1	Resíduos Florestais	6
2.3.1.1	Lenha e Carvão Vegetal	7
2.3.1.2	Resíduos de Madeira e Licor Negro	8
2.3.2	Resíduos Agrícolas	9
2.3.2.1	Cana-de-açúcar	10
2.3.2.2	Arroz	10
2.3.2.3	Capim-elefante	11
2.3.2.4	Milho	11
2.3.2.5	Soja	12
2.3.3	Resíduos Urbanos e Industriais	12
2.3.3.1	Rejeitos Urbanos Sólidos e Líquidos	13
2.3.3.2	Rejeitos Industriais Sólidos e Líquidos	13
2.3.4	Análise Energética	13
2.4	Biogás	14
2.4.1	Produção de Biogás	14
2.4.2	Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás	15
2.5	Biodigestor	15
2.5.1	Modelo Indiano	15
2.5.2	Modelo Chinês	16
2.5.3	Modelo Canadense	16
2.6	Tecnologias para Conversão de Energia	18
2.6.1	Turbinas a Gás	18
2.6.1.1	Turbinas a Gás de Ciclo Brayton	18
2.6.1.2	Microturbinas a Gás	19

2.6.2	Motores de Combustão interna	20
2.6.2.1	Ciclo a Ar Otto	20
2.6.2.2	Ciclo a Ar Diesel	20
3	METODOLOGIA	22
3.1	Detalhamento do Projeto para Estudo de Caso	22
3.1.1	Dimensionamento do Sistema de Biodigestão	23
3.1.2	Materiais Necessários	25
3.1.3	Instalação do Biodigestor	25
3.2	CrITÉrios EconÔmicos	26
3.3	CrITÉrios Ambientais	26
4	RESULTADOS	27
4.1	Estudo de Caso	27
4.1.1	Dimensionamento	27
4.1.2	Produção de Biogás	29
4.1.3	Seleção do Gerador	30
4.2	Análise Econômica	30
4.2.1	Custo de Instalação	30
4.2.2	Indicadores de Viabilidade de Projetos	31
4.2.2.1	Payback	31
4.2.2.2	VPL	33
4.2.2.3	TIR	33
4.2.3	Análise Comparativa	33
4.3	Análise Ambiental: Emissões de Gases Poluentes	35
5	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS	38

1 Introdução

1.1 Contextualização e Motivação

Qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica é classificada como biomassa. De acordo com a sua origem, pode ser: florestal (lenha, carvão vegetal, madeira e licor negro), agrícola (cana-de-açúcar, arroz, capim-elefante, milho e soja) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos e líquidos). Os derivados obtidos dependem tanto da tecnologia de processamento para obtenção dos energéticos quanto da matéria-prima utilizada, cujo potencial energético varia com o tipo utilizado (ANEEL, 2015).

A biomassa está entre as fontes renováveis para produção de energia elétrica com maior potencial de crescimento nacional e internacional. A crescente demanda por energia elétrica no mundo tem mudado o contexto referente à geração de eletricidade (PNE, 2016). Antigamente, as fontes energéticas eram utilizadas sem nenhuma preocupação, acreditava-se que eram inesgotáveis devido à sua grande abundância. Na segunda metade do século XX, com a revolução industrial, a demanda por energia cresceu e descobriu-se que as fontes energéticas mais utilizadas possuíam recursos limitados, incentivando investimentos em recursos renováveis (CARDOSO, 2012).

Outro fator que mudou a situação da geração de energia ocorreu no final do século XX, temas como aquecimento global, desmatamento florestal, emissões de dióxido carbono para a atmosfera, começaram a fazer parte do cotidiano da população e, então, passaram a ser parte de projetos de geração de energia elétrica (PRETO; MORTOZA, 2011).

Após a Segunda Guerra Mundial, em 1945, as grandes nações capitalistas estavam fragilizadas e não tiveram opção, a não ser reconhecer a nova política do Oriente Médio, reduzindo os lucros para manter o acesso aos barris de petróleo. Até os dias atuais, a oscilação do preço do barril gera crises econômicas de grande impacto no mundo, afetando investidores e consumidores de grande e pequeno porte (CARDOSO, 2012).

Finalmente, houve necessidade de buscar novas fontes energéticas sustentáveis que atendessem a progressiva demanda no mundo. Algumas alternativas foram consideradas boas soluções, porém todas apresentam vantagens e desvantagens e nenhuma pode ser considerada como melhor. Podem ser citadas a energia atômica, a solar, a eólica e a biomassa.

O foco deste trabalho é a utilização da biomassa e seu aproveitamento na matriz energética brasileira.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo um estudo qualitativo do processo de geração da energia utilizando biomassa, elaborando uma proposta de projeto com um estudo de caso de uma usina, e ao final analisar a viabilidade econômica e ambiental deste tipo de usina.

1.2.2 Objetivos Específicos

A fim de atingir o objetivo geral, são requeridos os objetivos específicos:

- Estudo aprofundado da biomassa;
- Definir as fontes energéticas brasileiras fazendo uma comparação entre elas.
- Estudar os processos de obtenção da biomassa.
- Realizar um estudo de caso e projeto de uma usina que utilize biomassa.
- Analisar a viabilidade econômica e ambiental da implantação de uma usina utilizando biomassa;

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos.

No capítulo introdutório foram descritos a contextualização e motivação do assunto, a justificativa e os objetivos geral e específicos.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica necessária para realização deste trabalho. São apresentados tópicos sobre a produção de energia elétrica no Brasil e no mundo, a produção de energia a partir da biomassa, é feito um detalhamento das fontes de biomassa, ainda são apresentados estudos sobre o biogás, biodigestores e tecnologias para conversão de energia.

No capítulo 3, se descreve a metodologia utilizada para realização de uma proposta de projeto, e para as análises econômica e ambiental.

No capítulo 4, se apresenta o estudo de caso realizado. São apresentados os cálculos e as especificações para um possível projeto. Apresenta também análises econômica e ambiental para implantação de uma usina biomassa fazendo comparações.

No capítulo 5, se apresenta a conclusão deste estudo.

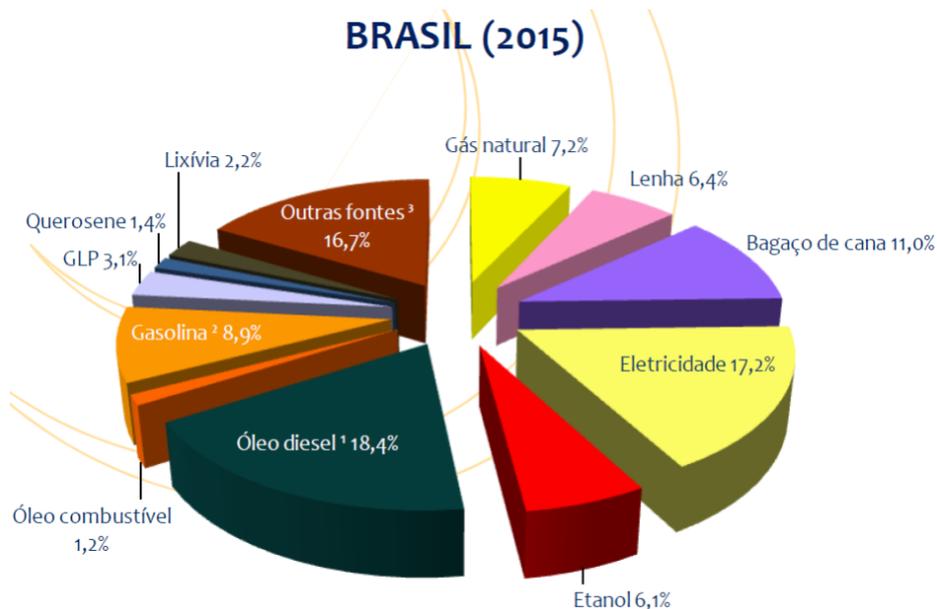
2 Revisão Bibliográfica

2.1 Contexto da Geração de Energia Elétrica

A geração de energia no Brasil tem crescido consideravelmente desde os anos 80. A energia proveniente da água sempre foi dominante, devido à grande quantidade de recursos hídricos (CARDOSO, 2012). A capacidade instalada de hidroeletricidade é de cerca de 70.000 MW, contando com cerca de 433 usinas hidrelétricas em operação. Dessas, 23 têm capacidade maior do que 1.000 MW e representam mais de 70% da capacidade total instalada. Existe, ainda, um potencial considerável não utilizado, cerca de 190.000 MW, principalmente na região da Amazônia e, portanto, distante dos grandes centros consumidores do Sudeste. O custo para produção de 1 kW em uma usina hidrelétrica é de aproximadamente U\$ 1.000. O potencial para reforma e melhoria das grandes usinas construídas há mais de vinte anos, com capacidades instaladas especialmente entre 1.000 e 8.000 MW, é de 32.000 MW (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). Outras tecnologias contribuem para geração de eletricidade no Brasil, porém ainda em pequena escala.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo final de energia por fonte no Brasil em 2015, tem características muito dependentes dos combustíveis fósseis, sobrando então pouco espaço para as fontes renováveis. Esse cenário é mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Consumo final de energia elétrica por fonte.

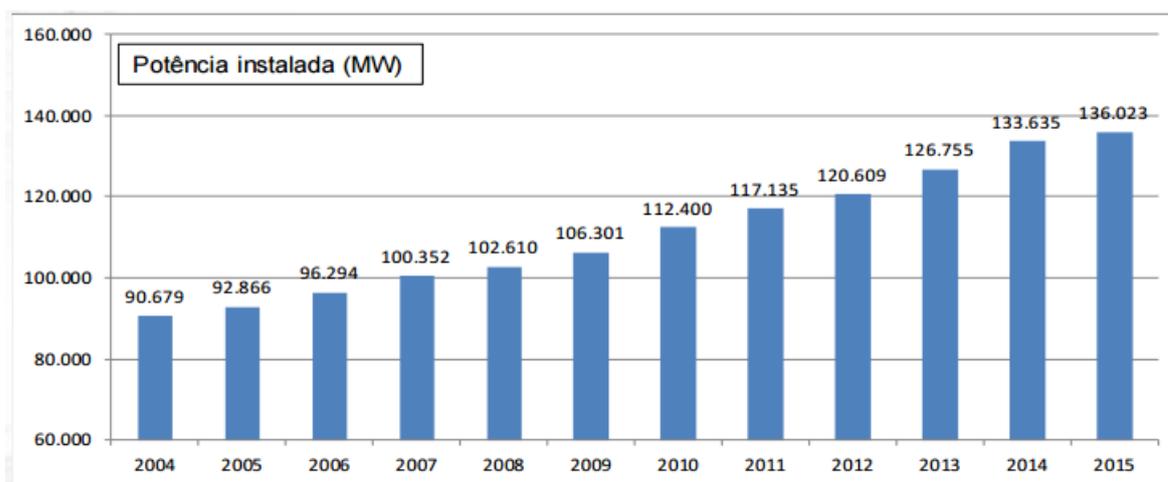


Fonte: EPE, 2015 - Acesso em 05/03/2017.

2.2 Geração Biomassa

A utilização de fontes renováveis está se tornando cada vez mais necessária, devido às preocupações ambientais e à crescente demanda por energia (BIG, 2011). No Brasil em 2004, de acordo com o Banco de informações de geração (BIG), a potência instalada utilizando fontes renováveis era de 90.679 MW, o decorrer de 11 anos, esse número cresceu 50%, correspondendo a 45.344 MW no aumento da potência instalada, resultando então em 136.023 MW em 2015. Este cenário pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Aumento da potência instalada.



Fonte: BIG, 2015 - Acesso em 04/03/2017.

A biomassa é classificada como fonte energética limpa e renovável, por isso tem sido uma boa alternativa para diversificação da matriz energética. Sua utilização é vantajosa pelo aproveitamento direto da combustão e pelos pequenos impactos socioambientais. É desvantajosa por possuir baixa eficiência (CARDOSO, 2012).

A cana-de-açúcar é a matéria-prima de maior produção em todo o mundo, sendo o Brasil o maior produtor com quase 400 milhões de megatoneladas (Mt) ao ano, seguido por Índia, China, Tailândia, Paquistão e México. A China é o maior produtor de arroz (187 milhões de Mt), os Estados Unidos são o maior produtor de milho (300 milhões de Mt) e de soja (86 milhões de Mt), a União Européia é a maior produtora de beterraba com quase 127 milhões de Mt. A Europa e os Estados Unidos são os principais concorrentes do maior produto energético obtido da biomassa, o álcool da cana-de-açúcar, já que a beterraba e o milho são utilizados por esses países para a obtenção do produto emergente (BARBOSA et al., 2008).

No Brasil, a implementação da bioenergia está ocorrendo em três níveis, sendo o primeiro em baixas potências que variam de 1 a 3 kW, típico de pequenas comunidades. O segundo é caracterizado por potências que atingem alguns MW, típico de comunidades com centenas de habitantes, serrarias, fábricas de móveis e plantas de tratamento de arroz.

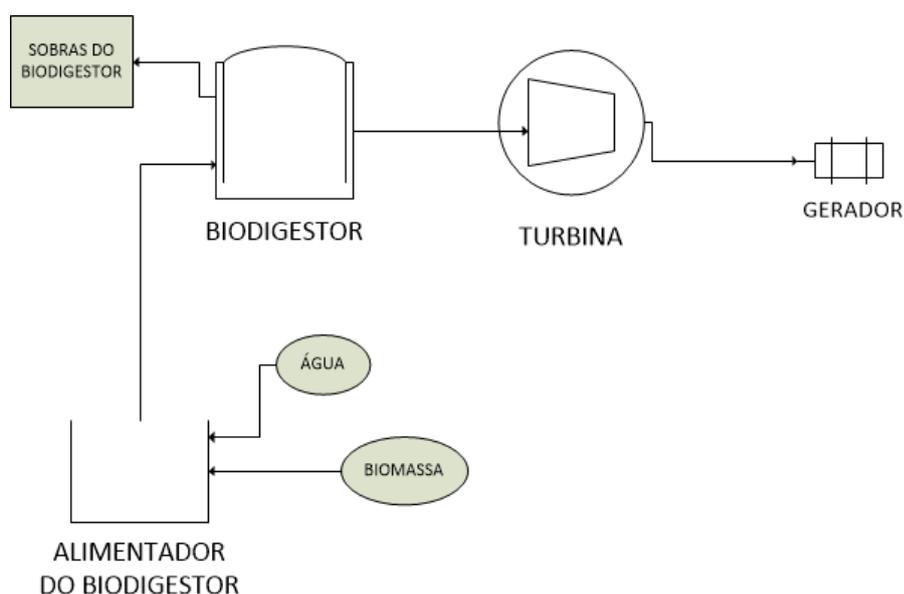
Por fim, o terceiro nível apresentando potências de 5 a 10 MW, típicos de fábricas de açúcar e álcool, fábricas de celulose e papel e também de centrais térmicas de biomassa (LORA; ANDRADE, 2009).

Em novembro de 2008, existiam 302 termelétricas movidas a biomassa no país, que corresponde a um total de 5,7 mil MW instalados. Do total de usinas relacionadas, 13 são abastecidas por licor negro (resíduo da celulose) com potência total de 944 MW, 27 por madeira com potência de 232 MW, três por biogás com 45 MW, quatro por casca de arroz com 21 MW e 252 por bagaço de cana contribuindo com 4 mil MW (ANEEL, 2015).

A utilização da biomassa para gerar energia pode ocorrer envolvendo transformação bioquímica, termoquímica e físico-química, para obtenção de um produto intermediário que será utilizado em uma máquina motriz que produzirá a energia mecânica responsável por girar o gerador de uma usina e produzir energia elétrica que possa ser utilizada ou distribuída (PRETO; MORTOZA, 2011).

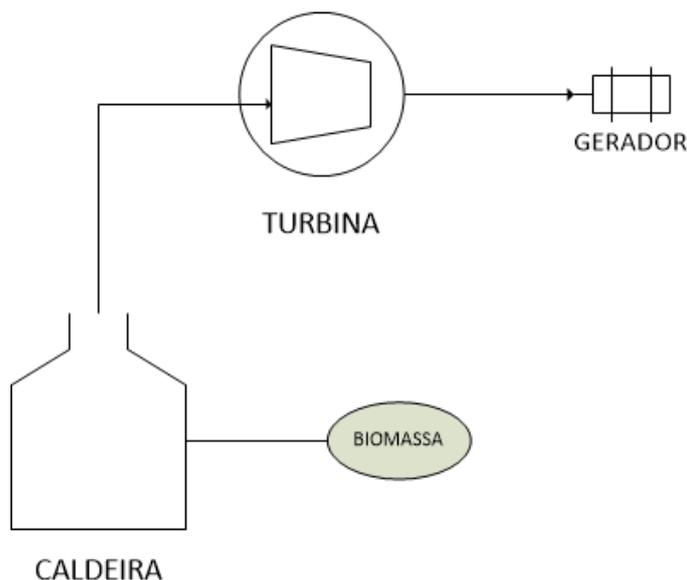
O processo de geração de energia utilizando biomassa pode ocorrer por meio da biomassa líquida ou sólida. A geração através da biomassa líquida ocorre misturando o material orgânico com água no alimentador, a mistura é levada ao biodigestor e, devido à ação de bactérias é transformado em biogás. O gás é utilizado para alimentar uma turbina acoplada a um gerador elétrico onde ocorre a conversão da energia mecânica em elétrica. As sobras que saem do biodigestor servem como fertilizante. O processo descrito pode ser observado de forma esquemática na Figura 3. O processo de geração utilizando biomassa sólida ocorre através da queima da matéria orgânica na caldeira, o vapor d'água produzido na caldeira gira uma turbina acoplada a um gerador fazendo a conversão de energia. O processo pode ser observado na Figura 4.

Figura 3 – Esquema da geração biomassa líquida.



Fonte: Própria.

Figura 4 – Esquema da geração biomassa sólida.



Fonte: Própria.

2.3 Fontes Energéticas

Apesar da existência de várias fontes de biomassa, somente algumas são economicamente viáveis para produção comercial, sendo estas divididas em três categorias: origem florestal, agrícola e rejeitos urbanos e industriais. Os tipos mais utilizados no Brasil para a geração de energia elétrica são a lenha e o carvão vegetal, resíduos de madeira e lixívia negra de origem florestal; palha e bagaço da cana-de-açúcar, palha e casca do arroz, capim-elefante, palha do milho, palha da soja de origem agrícola; e lixos sólidos e líquidos da categoria de rejeitos urbanos e industriais. O potencial energético de cada fonte está relacionado com o processo de obtenção e o tipo da matéria-prima (PRETO; MORTOZA, 2011).

De acordo com o BIG, a utilização da biomassa para geração de energia no mercado brasileiro representa 13% na produção total de energia gerada. A parcela mais significativa é proveniente do bagaço da cana-de-açúcar representando 80% desse total. Outra fonte bastante significativa é o licor negro com 13,85%. Em terceiro lugar vem os resíduos da madeira com 3,53%, e as demais fontes contribuem com apenas 1,83% da potência total, conforme mostrado na Tabela 1.

2.3.1 Resíduos Florestais

A biomassa energética proveniente de resíduos florestais é definida como produtos e subprodutos que incluem biomassa lenhosa produzida de forma sustentável, a partir de

Tabela 1 – Detalhamento do uso da biomassa para geração elétrica no mercado brasileiro.

Combustível	Quantidade de empreendimentos	Potência (kW)	%
Licor negro	14	1 245 198	13,85
Resíduos de madeira	37	316 927	3,53
Capim-elefante	2	31 700	0,35
Biogás	16	70 902	0,79
Bagaço da cana-de-açúcar	347	7 263 608	80,79
Óleo de palmiste	2	4 350	0,05
Carvão vegetal	3	25 200	0,28
Casca de arroz	8	32 608	0,36

Fonte: BIG, 2015 - Acesso em 10/03/2017.

florestas cultivadas ou nativas (CARDOSO, 2012). O conteúdo desta classe de biomassa está associado à celulose e lignina contidas na matéria e ao baixo teor de umidade. Seu aproveitamento no uso final energético se realiza, principalmente, através das rotas tecnológicas de transformação termoquímica mais simples, como combustão direta e carbonização. Porém, rotas mais complexas também são empregadas para a produção de combustíveis líquidos e gasosos, como metanol, etanol, gases de síntese, licor negro (um subproduto da indústria de celulose), entre outros (ANEEL, 2015).

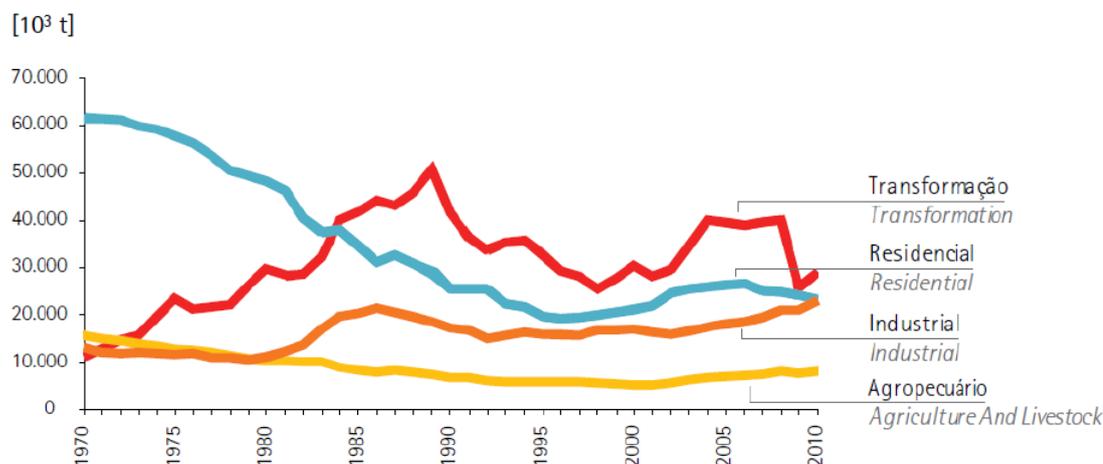
2.3.1.1 Lenha e Carvão Vegetal

A lenha é definida como ramos, troncos, achas (tora de lenha, cavaca) de madeira tosca ou quaisquer pedaços de madeira que podem ser utilizados como combustível. No Brasil, ela participa com cerca de 10% da produção de energia primária e continua tendo grande importância na matriz energética do país. Em relação à sua composição, a lenha possui entre 41% e 49% de celulose, entre 15% e 27% de hemicelulose e entre 18% e 24% de lignina. Seu poder calorífico inferior médio é de 3100 Kcal/Kg (CARDOSO, 2012).

Dados do Balanço Energético Nacional (BEN) mostram que em 2010 a produção total de lenha foi de 84,101 milhões de toneladas. Cada parte da produção é destinada a cada setor consumidor, sendo 27,86 milhões de toneladas representando 33,1%, utilizadas na produção de carvão vegetal e, 1,235 milhões de toneladas representando 1,5%, diretamente na geração elétrica, gerando um total de 29,095 milhões de toneladas ou 34,6%, aplicadas em transformação (produção de carvão vegetal e geração elétrica). O setor residencial é responsável pelo consumo de 27,9% da lenha produzida, o setor industrial por 27,5% e, o setor agropecuário e o comercial são consumidores com menores números (BEN, 2016). A Figura 5 ilustra este cenário.

A transformação da lenha em carvão vegetal pode ocorrer por meio dos processos de carbonização ou pirolise. O processo de carbonização, consiste na queima da lenha com presença controlada de ar. A pirolise, consiste na exposição da lenha a altas temperaturas em um ambiente com pouquíssima ou nenhuma quantidade de hidrogênio. O poder calorífico

Figura 5 – Histórico do consumo de lenha no Brasil.



Fonte: BEN 2011 - Acesso em 19/03/2017.

do carvão vegetal é de 6460Kcal/Kg e sua densidade média é de 250Kg/m^3 (CARDOSO, 2012).

2.3.1.2 Resíduos de Madeira e Licor Negro

A cadeia produtiva da madeira gera uma alta quantidade de resíduos quando consideramos os processos de transformação primário, secundário e terciário. Esses resíduos são constituídos por material florestal orgânico que sobra na floresta após a colheita (PRETO; MORTOZA, 2011).

As árvores mais utilizadas em florestas de reflorestamento são o pinus e eucalipto. O pinus é do gênero de plantas da família *pinaceae* e são árvores perenes presentes principalmente em climas temperados. Seus resíduos possuem poder calorífico inferior de 4174Kcal/Kg e densidade média de 350Kg/m^3 . Já o eucalipto é a designação vulgar das várias espécies vegetais do gênero *Eucalyptus*, pertencente a família das *mirtáceas*, que compreende outros 130 gêneros. Seus resíduos possuem poder calorífico inferior de 4024Kcal/Kg e densidade média de 374Kg/m^3 . Tanto os valores citados para o eucalipto quanto para o pinus consideram um teor de umidade em torno de 25%. Como se pode verificar através dos dados da Tabela 2, o eucalipto é responsável por 81,6% da área total de florestas plantadas, correspondendo a 1837 mil ha. Os estados que mais possuem plantações de eucalipto são Bahia, São Paulo e Minas Gerais. O pinus é responsável por 17,2%, correspondendo a 388 mil ha de áreas plantadas, Paraná e Santa Catarina são os estados com mais áreas plantadas. Por fim, 26 mil ha são de florestas de outros gêneros, correspondendo a 1,2% do total (CARDOSO, 2012).

Outro derivado da madeira largamente utilizado como fonte energética é o licor negro, também conhecido como lixívia negra. É um resíduo líquido proveniente do di-

Tabela 2 – Área total com florestas plantada por gênero e estado (mil ha)

Estados	Eucalipto	Pinus	Outras	Total
Amapá	12	0	0	12
Bahia	499	28	0	527
Espírito Santo	171	0	0	171
Maranhão	47	0	0	47
Mato Grosso do Sul	155	0	0	155
Minas Gerais	220	0	2	222
Pará	49	0	0	49
Paraná	108	153	8	269
Piauí	1	0	0	1
Rio de Janeiro	3	0	0	3
Rio Grande do Sul	186	19	1	206
Santa Catarina	16	153	0	169
São Paulo	370	35	15	420
TOTAL	1837	388	26	2251

Fonte: Relatório Anual 2009/2010 BRACELPA - Acesso em 10/03/2017.

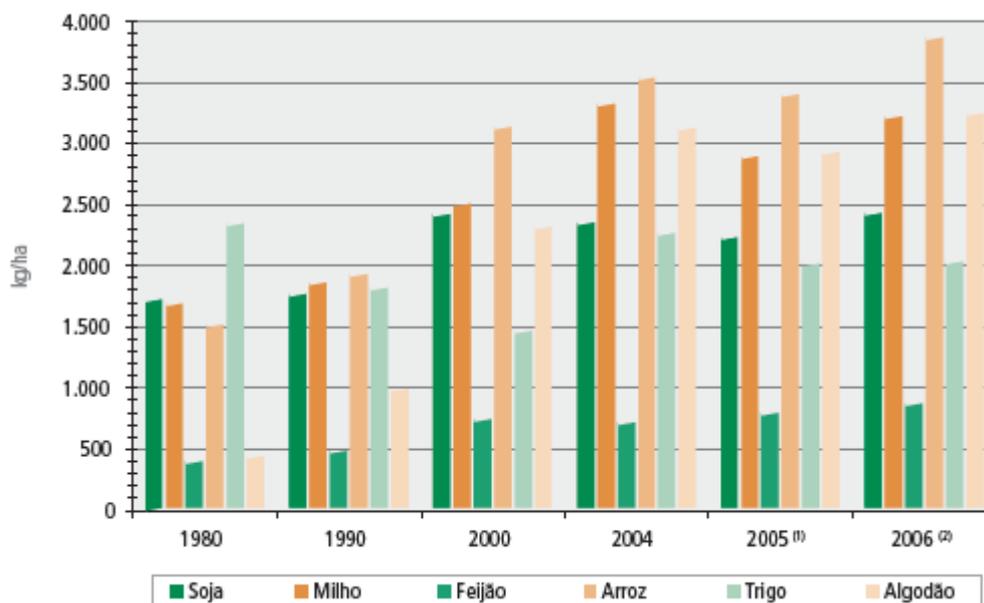
gestor após o processo de transformação da madeira, chamado de cozimento da madeira (CARDOSO, 2012). Indústrias de papel e celulose utilizam a polpa da madeira. Para o processo de transformação da matéria bruta em polpa é necessário separar lignina, celulose e hemicelulose através de processos mecânicos e químicos. Nesses processos, uma parte da madeira se solubiliza saindo junto com os produtos químicos na forma de lixívia escura (PRETO; MORTOZA, 2011). De acordo com as características da matéria prima e as particularidades do processo, são produzidas de 1 a 1,4Kg de licor concentrado por Kg de celulose fabricada, com um poder calorífico de 2860Kcal/Kg (EPE, 2012).

2.3.2 Resíduos Agrícolas

As principais culturas agrícolas do Brasil apresentam como destaque entre os cereais e leguminosas, soja, milho e arroz, respondendo por quase 90% da produção física e, aproximadamente, 80% da área utilizada para cultivo dos chamados “grãos”. Entre as culturas temporárias e permanentes, destacam-se a cana-de-açúcar, a mandioca e a laranja, respondendo por, aproximadamente, 95% da produção física, sendo que a cana-de-açúcar sozinha é responsável por mais de 86% do total produzido. Em termos de área utilizada para cultivo de lavouras temporárias e permanentes, esses três produtos ocupam mais de 60% da área total ocupada por este tipo de cultura, e a cana-de-açúcar ocupa mais de 40% da área total (PNE, 2016).

A Figura 6 mostra a evolução da produtividade das principais culturas de cereais e leguminosas no Brasil.

Figura 6 – Evolução da produtividade das principais culturas - cereais e leguminosas.



Fonte: PNE 2030 - Plano Nacional de Energia, 2007 - Acesso em 04/03/2017.

2.3.2.1 Cana-de-açúcar

Cana-de-açúcar é uma gramínea que possui uma haste fibrosa espessa, crescendo até 6 metros de altura. As variedades comerciais de cana-de-açúcar são híbridos complexos de várias espécies dentro do gênero *Saccharum*. A espécie mais conhecida é *Saccharum officinarum*. A planta de cana é constituída por quatro partes principais, raízes, talho (fruto agrícola), folhas e flores. O talho é constituído no seu interior por um tecido esponjoso muito rico em sumo açucarado que pode ser extraído de diversas maneiras (CARDOSO, 2012).

A cana plantada é destinada à produção de açúcar e álcool em proporção aproximada de 50% para cada produto final, sendo que a Região Centro-Sul concentra a maior parte das áreas de cultivo. O Estado de São Paulo é o maior produtor, seguindo o Paraná e Minas Gerais (FILHO, 2009).

O poder calorífico da cana-de-açúcar, considerando todos seus componentes (sacarose, fibras, água e outros) é de, aproximadamente, 1060Kcal/Kg . Para o bagaço de cana, o poder calorífico é de 2130Kcal/Kg , considerando o bagaço com 50% de umidade. O poder calorífico inferior das pontas e folhas (palha) da cana-de-açúcar é de 3105Kcal/Kg , também considerando 50% de umidade (CARDOSO, 2012).

2.3.2.2 Arroz

O arroz também é muito cultivado no Brasil e, cada vez mais vem crescendo o interesse pelos seus resíduos. Trata-se de uma gramínea que possui de um a dois metros

de altura, se desenvolve sob diversas condições climáticas, contudo necessita de umidade no solo (CARDOSO, 2012). O sucesso na sua cultura depende de abundância de água para manter a temperatura ambiente dentro dos intervalos adequados. O arroz pode ser utilizado como biomassa por meio de combustão ou pirólise (PRETO; MORTOZA, 2011).

A cadeia de produção do arroz consiste no plantio do grão, armazenamento dos grãos após a colheita, transporte até a usina e, beneficiamento do arroz com casca, resultando no arroz pronto para ser embalado. As etapas desse processo geram grandes quantidades de resíduos, principalmente na colheita e no beneficiamento (PRETO; MORTOZA, 2011).

A palha de arroz, é definida como o resíduo que permanece no campo após a etapa de colheita, a cada tonelada de arroz colhido 0,38 tonelada são de palha. Já a casca de arroz é o resíduo gerado após o processamento industrial do arroz bruto, corresponde a 22% do peso total do arroz com casca. O poder calorífico inferior da palha e da casca são, respectivamente de 3821Kcal/Kg e 3200Kcal/Kg (CARDOSO, 2012).

2.3.2.3 Capim-elefante

O capim-elefante se trata de uma gramínea perene que possui de três a cinco metros de altura, sua principal utilização é na criação de gado de corte e leiteiro. O capim-elefante tem como grandes vantagens crescer muito rápido, gerar maior quantidade de biomassa por área e tolerar solos mais pobres em nutrientes quando comparado à cana-de-açúcar (PRETO; MORTOZA, 2011).

A transformação do capim-elefante em energia é simples. O processo consiste em uma colheita mecanizada seguida de secagem. Posteriormente, o mesmo segue por uma esteira para uma máquina onde as folhas são fragmentadas em pequenos pedaços e o restante da umidade é retirado. Por fim, os pedaços são queimados em uma caldeira e transformados em energia térmica que irá aquecer a água, gerando vapor sob pressão que movimentará a turbina e, conseqüentemente, o gerador que estará acoplado a ela (CARDOSO, 2012). O poder calorífico inferior do capim é de 4200Kcal/Kg , devido ao seu alto teor de fibras (PRETO; MORTOZA, 2011).

2.3.2.4 Milho

O milho é uma gramínea originária da América Central que pode ser cultivada em qualquer clima ou solo. Sua produtividade varia conforme a fertilidade do solo e à gerência das colheitas. Possui, em média, de dois a três metros de altura. O milho possui flores masculinas e femininas separadas. Após a polinização, as folhas femininas formam as espigas (PRETO; MORTOZA, 2011).

No processo de colheita do milho, a utilização de máquinas é fundamental e aplicado praticamente à totalidade da produção. O milho é colhido e a própria máquina faz o beneficiamento do grão, retirando o caule, folhas, palha e sabugo, tendo como resultado

o grão de milho limpo. Os grãos são depositados na própria máquina e os resíduos são despejados na lavoura, pela parte de trás da máquina. Essa é uma grande desvantagem, pois todos os resíduos do milho, chamados de palhada, ficam distribuídos por toda a área plantada, dispersos no ambiente. Esse fato ocorre em toda produção a granel de milho no Brasil, o que praticamente inviabiliza a utilização da palhada na geração de energia elétrica devido aos altos custos para juntar e transportar tais resíduos. O poder calorífico da palhada de milho é de 4227Kcal/Kg (CARDOSO, 2012).

2.3.2.5 Soja

A soja merece destaque devido à sua alta produção no país. É um grão rico em proteínas que pertence a família *fabaceae* (leguminosa), assim como feijão, lentilha e ervilha. Durante sua produção, as exigências térmicas e hídricas são altas, principalmente, nas fases de floração e do enchimento dos grãos. Porém, a soja suporta escassez ou excesso de água na fase vegetativa, maturação e colheita, facilitando o cultivo (CARDOSO, 2012).

Como o processamento dos grãos de soja não gera resíduo, todos os resíduos do cultivo da soja provêm da colheita. Esses resíduos são pouco aproveitados na geração de energia elétrica no Brasil, entretanto a soja já é bastante aproveitada como fonte de energia na forma de biocombustível. O poder calorífico da soja é de 3487Kcal/Kg (CARDOSO, 2012).

2.3.3 Resíduos Urbanos e Industriais

A biomassa contida em resíduos sólidos e líquidos urbanos têm origens diversas e se encontra no lixo e esgoto. O lixo urbano é uma mistura heterogênea de metais, plásticos, vidros, resíduos celulósicos e vegetais, e matéria orgânica. As rotas tecnológicas de seu aproveitamento energético são combustão direta, gaseificação, via termoquímica, após a separação dos materiais recicláveis, e a digestão anaeróbica, na produção de biogás, pela via biológica (CARDOSO, 2012).

O esgoto urbano possui matéria orgânica residual diluída, cujo tratamento é uma imposição sanitária, que através da rota tecnológica de digestão anaeróbica encontra aplicação energética. Também se enquadram nesta categoria os subprodutos das atividades agroindustriais e da produção animal. Uma expressiva quantidade de subprodutos resultantes das atividades agroindustriais e da produção animal são tratadas como resíduos, porém possui potencial energético importante, que varia segundo a rota tecnológica empregada. Esta pode variar desde a transformação termoquímica, com combustão direta, pirólise ou gaseificação, passando pelas transformações biológicas e físico-químicas, incluindo a digestão anaeróbica (CARDOSO, 2012).

2.3.3.1 Rejeitos Urbanos Sólidos e Líquidos

Rejeitos urbanos sólidos são definidos como uma mistura heterogênea de materiais que foram descartados, como plásticos, madeiras, vidros, metais, papéis e matéria orgânica. Os rejeitos urbanos líquidos são de origem doméstica e residencial, constituindo nos efluentes líquidos.

O poder calorífico do biogás está diretamente relacionado com a quantidade de metano existente na mistura gasosa, e varia de 5000 a 7000 $kcal/m^3$. Se submetido a processos de purificação, pode gerar um índice de até 12000 $kcal/m^3$. O metano é um gás incolor e altamente combustível. Não produz fuligem e seu índice de poluição atmosférico é inferior ao do butano presente no gás de cozinha (EPE, 2012).

2.3.3.2 Rejeitos Industriais Sólidos e Líquidos

Rejeitos industriais são provenientes de criadouros, abatedouros, destilarias, fábrica de laticínios, indústrias processadoras de carnes, entre outros. Estes rejeitos podem ser utilizados na geração de biogás.

A indústria madeireira produz resíduos a partir do beneficiamento de toras, os tipos de resíduos produzidos são cascas, cavaco, costaneira, pó de serra, maravalha e aparas. As indústrias de alimentos e bebidas produzem resíduos na fabricação de sucos e aguardente, no beneficiamento de arroz, café, trigo, milho, coco da Bahia, amendoim e castanha-de-caju (BARBOSA et al., 2008).

O poder calorífico é semelhante ao de rejeitos urbanos, portanto aproximadamente 5000 $kcal/m^3$ (CARDOSO, 2012).

2.3.4 Análise Energética

Analisando a Tabela 3 observa-se que a fonte energética que possui o maior poder calorífico é a lenha, e ainda é de fácil produção no Brasil, por isso é a mais utilizada atualmente. Porém, algumas outras fontes que não apresentam poderes caloríficos tão elevados, são utilizadas em larga escala devido à sua abundância.

Tabela 3 – Poderes caloríficos das fontes energéticas brasileiras.

Fonte energética	Poder calorífico (<i>kcal/m³</i>)
Lenha	31000
Carvão vegetal	6460
Resíduos de madeira	4174
Licor negro	2860
Bagago da cana-de-açúcar	2130
Casca do arroz	3200
Palha do arroz	3821
Capim-elefante	4200
Milho	4227
Soja	487
Rejeitos urbanos sólidos e líquidos	5000 a 7000
Rejeitos industriais sólidos e líquidos	5000

2.4 Biogás

O biogás é uma mistura de gases cujos principais compostos são o metano e o dióxido de carbono. A percentagem de cada gás se difere de acordo com o processo de digestão e com as características dos resíduos, sendo em média 65% de gás metano e o restante, quase totalmente, de dióxido de carbono. Outros gases, como sulfeto de hidrogênio, nitrogênio, hidrogênio e monóxido de carbono aparecem em pequenas quantidades na sua composição (PRATI, 2010).

A conversão do biogás é considerada uma grande solução para o volume de resíduos produzidos por atividades agrícolas e pecuárias, destilarias, esgotos domésticos e aterros sanitários (SOUZA, 2010).

2.4.1 Produção de Biogás

A produção do biogás ocorre por meio da digestão anaeróbia que tem como objetivo a remoção da matéria orgânica, formação de biogás e produção de biofertilizantes ricos em nutrientes. O gás produzido, em biodigestores planejados, pode ser utilizado como combustível. Além de possuir alto poder calorífico, não produz gases tóxicos durante a queima. Deixa como resíduo um lodo que pode ser utilizado como biofertilizante (PRATI, 2010).

O resíduo do qual o biogás é retirado é devidamente preparado com diluição em água para instalação e desenvolvimento de microrganismos envolvidos no processo de fermentação. Outros fatores, além do teor de água, que influenciam a formação do biogás são impermeabilidade do ar, natureza do substrato, composição dos resíduos, temperatura e PH (PRATI, 2010).

2.4.2 Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás

As opções para o aproveitamento do biogás são: a queima, em sua totalidade, na caldeira para geração de vapor; a utilização de parte do biogás em substituição dos combustíveis utilizados no período de safra e a utilização da sua totalidade para acionar uma turbina a gás, conjugada a um gerador elétrico (SZYMANSKI; BALBINOT; SCHIRMER, 2010).

2.5 Biodigestor

Biodigestores são utilizados para processar matéria orgânica. Um biodigestor é constituído por um ou mais recipientes onde a biomassa é depositada e passa por um processo de fermentação anaeróbia tendo resultantes biogás e biofertilizante (SHUBEITA et al.,).

Diferentes tipos de biomassa podem ser utilizados para produção de biogás nos biodigestores, podendo ser de um único tipo ou misturada. Outra classificação é em relação ao abastecimento de biomassa, podendo ser de forma temporal ou por demanda (SHUBEITA et al.,).

O tanque de entrada, ou lagoa de sedimentação, é feito de alvenaria e é o local onde a matéria orgânica é exposta para uma pré-fermentação aeróbia. Neste processo, grande parte do oxigênio é liberado pela ação das bactérias aeróbias. O resíduo é introduzido no biodigestor pelo tubo de carga, pela força da gravidade. A câmara de biodigestão deve ser construída em alvenaria e é onde ocorre a fermentação do material e então a produção do biogás. O gasômetro é responsável pelo armazenamento do biogás, mantendo sua pressão constante. O tubo de descarga é utilizado para retirada do material fermentado de biodigestor (PRATI, 2010)(SOUZA, 2010).

Os tipos de biodigestores mais conhecidos são o modelo indiano, o modelo chinês e o modelo canadense (SOUZA, 2010).

2.5.1 Modelo Indiano

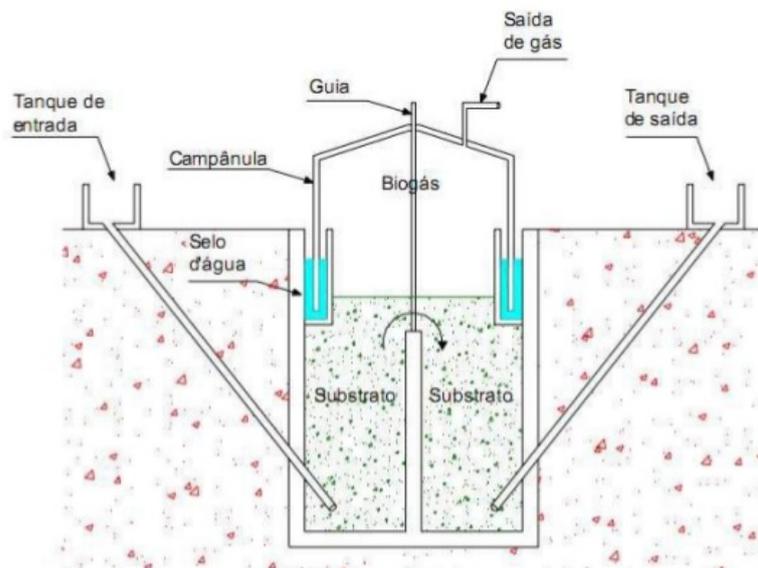
O modelo de biodigestor indiano possui dois reservatórios, um de biomassa e outro de biofertilizante, um tanque de fermentação e uma cúpula de gás. Possui uma cúpula armazenadora de gás com a parte inferior móvel e enterrada no solo, que se movimenta a medida que a quantidade de gás muda. O modelo indiano opera com pressão contante. O processo de fermentação ocorre de maneira rápida devido à temperatura do solo. No tanque de fermentação, uma divisória separa o novo dejetado daquele que já foi fermentado. A passagem de uma divisória à outra ocorre por pressão (SHUBEITA et al.,).

Os resíduos a serem colocados no biodigestor indiano devem apresentar baixas concentrações, não superiores a 8%, a fim de facilitar a circulação dos resíduos pelo interior

da câmara. O abastecimento deve ser feito de modo contínuo, geralmente alimentado por dejetos bovinos e/ou suínos (SOUZA, 2010).

A Figura 7 mostra a vista frontal em corte de um biodigestor modelo indiano.

Figura 7 – Vista frontal do Biodigestor Indiano.



2.5.2 Modelo Chinês

O modelo de biodigestor chinês se caracteriza por ser mais rústico em comparação ao modelo indiano. É formado por uma câmara de fermentação, feita de alvenaria, uma cúpula de gás e um fermentador. O dejetos de entrada é fermentado em uma câmara enterrada no solo, e ao final do processo é levado ao reservatório de biofertilizantes. Trabalha sob altas pressões que podem variar conforme a quantidade de gás produzida (SOUZA, 2010).

Esse biodigestor trabalha com base nos princípios de prensa hidráulica, quando a pressão resultante do acúmulo de biogás em seu interior aumenta, resultará no deslocamento dos efluentes da câmara de fermentação para a caixa de saída (SHUBEITA et al.,).

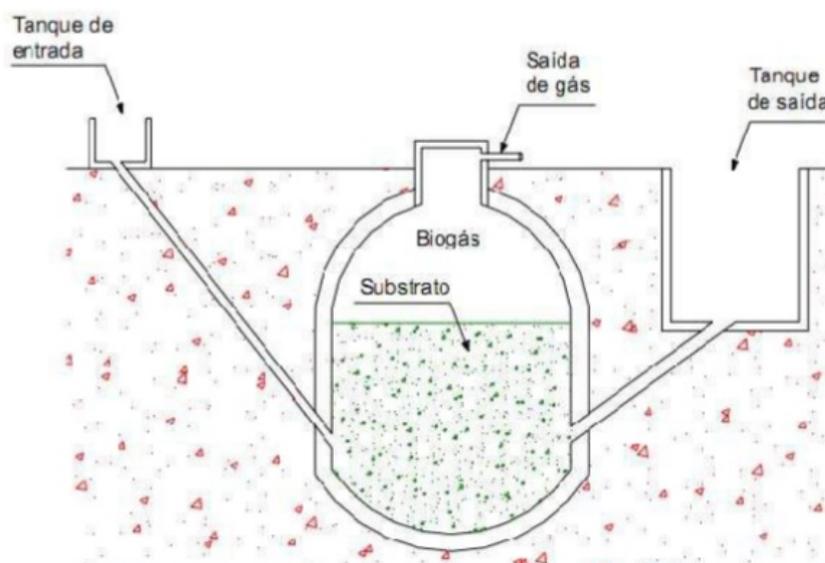
Como no modelo indiano, a biomassa que será colocada no biodigestor deve possuir concentrações sólidas em torno de 8%. Não são utilizados em instalações de grande porte já que liberam uma parcela dos gases formado na caixa de saída para a atmosfera (SHUBEITA et al.,).

A Figura 8 mostra a vista frontal em corte de um biodigestor modelo chinês.

2.5.3 Modelo Canadense

O modelo de biodigestor canadense é simples, possui uma lagoa de biomassa, uma cúpula de lona que cobre a lagoa e infla de acordo com a quantidade de biogás produzida,

Figura 8 – Vista frontal do Biodigestor Chinês.

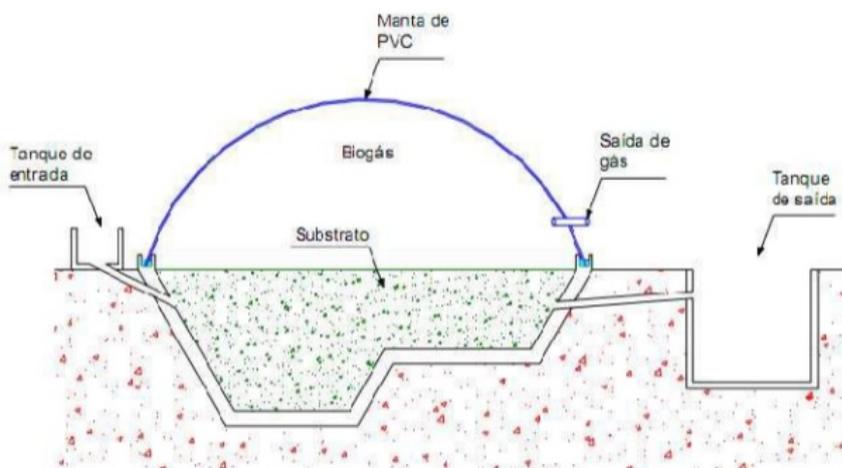


um reservatório para entrada de biomassa, um sistema para saída de gás e uma saída para um reservatório de biofertilizantes (SHUBEITA et al.,). Sua instalação pode ser constituída por apenas um tanque anaeróbio ou vários em série (SOUZA, 2010).

Seu abastecimento é feito de uma única vez, mantendo a fermentação por um período que seja conveniente. A utilização deste modelo é indicada quando a disponibilidade de biomassa ocorre em períodos mais longos (SOUZA, 2010).

A Figura 9 mostra a vista frontal em corte de um biodigestor modelo canadense.

Figura 9 – Vista frontal do Biodigestor Canadense.



2.6 Tecnologias para Conversão de Energia

São diversas as tecnologias possíveis para a conversão energética do biogás. Conversão energética é a transformação de um tipo de energia em outro. No caso do biogás, essa transformação ocorre entre energia química e mecânica. A energia química contida nas moléculas é convertida em energia mecânica por um processo de combustão. Essa energia mecânica ativa um gerador que converte energia mecânica em elétrica (PECORA, 2006).

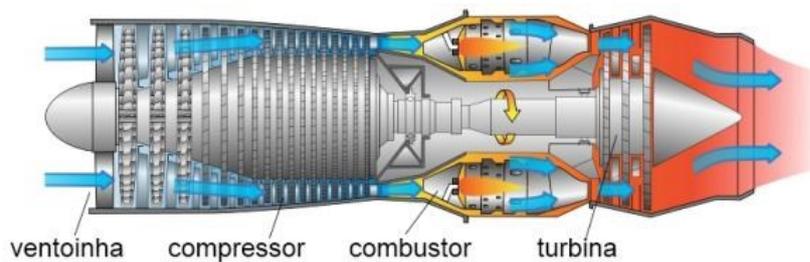
As turbinas a gás e os motores de combustão interna do tipo ciclo Otto, são as tecnologias mais utilizadas para esse tipo de conversão (PECORA, 2006).

2.6.1 Turbinas a Gás

As turbinas a gás, para geração estacionária, foram desenvolvidas baseadas em turbinas utilizadas na aviação, onde o fluido é o próprio gás de combustão (PECORA, 2006). O ar atmosférico é aspirado e comprimido no compressor e encaminhado, a alta pressão, para a câmara de combustão. Neste momento, o ar é misturado ao combustível e é provocada a ignição. Obtém-se um gás a alta pressão e temperatura que é enviado a uma turbina onde ocorre expansão dos gases até a pressão de exaustão. O resultado destas operações é a obtenção de potência no eixo da turbina. (BARBOSA et al., 1995).

Neste tipo de turbina, o dimensionamento é feito para que gases de exaustão saiam em velocidade baixa da turbina, expandindo a geração na turbina e, assim gerando um excedente de energia para o gerador (PECORA, 2006).

Figura 10 – Turbina a gás.



Fonte:(BARBOSA et al., 1995).

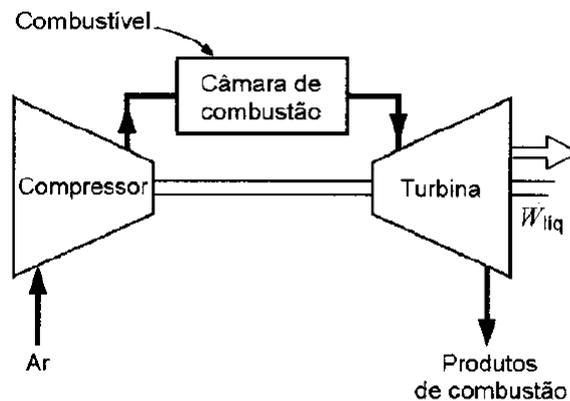
2.6.1.1 Turbinas a Gás de Ciclo Brayton

Em turbinas a gás que utilizam o ciclo Brayton, o ar atmosférico é constantemente succionado pelo compressor, onde é comprimido para alta pressão. Na câmara de combustão, o ar comprimido é misturado ao combustível e então ocorre a combustão, resultando em gases com alta temperatura. Os gases da combustão se expandem através da turbina e vão para atmosfera. A turbina realiza trabalho, parte deste trabalho é utilizado para

acionar um compressor e a outra parte, um gerador elétrico ou um dispositivo mecânico (PECORA, 2006).

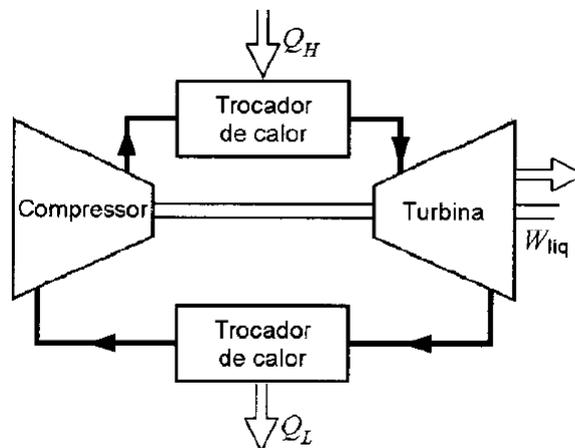
A Figura 11 mostra detalhadamente o ciclo brayton aberto e a Figura 12 mostra o ciclo brayton fechado, que apresenta transferência de calor, aumentando o rendimento.

Figura 11 – Turbina ciclo brayton aberto.



Fonte:(BARBOSA et al., 1995).

Figura 12 – Turbina ciclo brayton fechado.



Fonte: (BARBOSA et al., 1995).

2.6.1.2 Microturbinas a Gás

Microturbinas são pequenas turbinas de combustão que operam com potência na faixa de 20 a 250 kW, com elevadas velocidades de rotação e com alguns tipos de combustível, como gás natural, biogás, gás liquefeito de petróleo, gás de poços de petróleo e plataformas offshore, diesel/gás oil e querosene (PECORA, 2006).

Em microturbinas, o ar é aspirado em alta pressão e alta velocidade para dentro da turbina. O ar, na turbina, se junta ao combustível e é queimado na câmara de combustão. O processo de queima é controlado para maximizar a eficiência do processo e minimizar os níveis emissões. Os gases que são produzidos na queima sofrem expansão nas palhetas da turbina, produzindo trabalho. Os gases não aproveitados vão para a atmosfera (PECORA, 2006).

2.6.2 Motores de Combustão interna

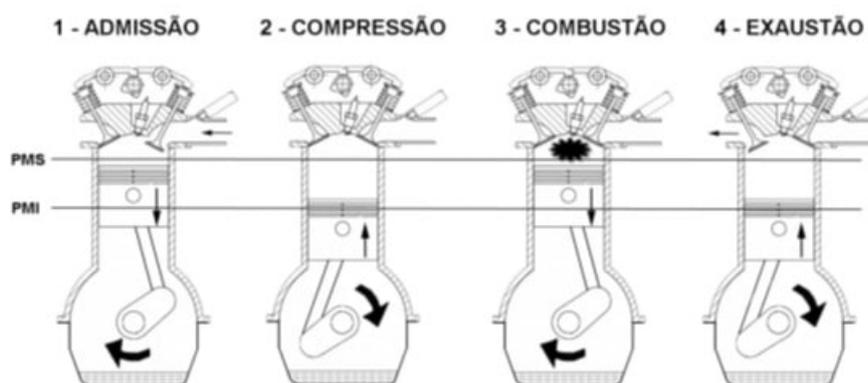
São motores que possuem o ciclo de combustão interna semelhante da ignição por centelha. Seu rendimento depende da relação de compressão (BARBOSA et al., 1995). Podem ser utilizados tanto para geração de energia elétrica quanto mecânica, que pode ser empregada no acionamento de bomba hidráulica, compressor ou veículo (PECORA, 2006).

2.6.2.1 Ciclo a Ar Otto

A combustão no ciclo Otto ocorre pela explosão do combustível através de uma fagulha na câmara de combustão. Este ciclo consiste em expansão e resfriamento adiabático, seguido de resfriamento a volume constante, aquecimento e compressão adiabático e, aquecimento a volume constante.

A Figura 13 mostra o funcionamento de um motor de ciclo Otto.

Figura 13 – Funcionamento de um motor de ciclo Otto.



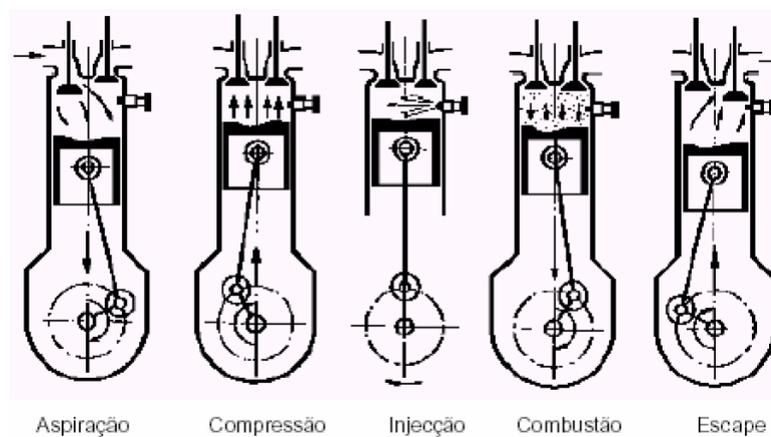
Fonte: (BARBOSA et al., 1995).

2.6.2.2 Ciclo a Ar Diesel

O motor a diesel utiliza óleo como combustível e é projetado para ser pesado e potente quando comparado a motores que utilizam gasolina. Sua utilização é dedicada a máquinas pesadas, locomotivas, navios e em alguns automóveis.

A combustão neste ciclo ocorre através da compressão do combustível na câmara de combustão. A Figura 14 mostra o funcionamento de um motor ciclo Diesel.

Figura 14 – Funcionamento de um motor ciclo Diesel.



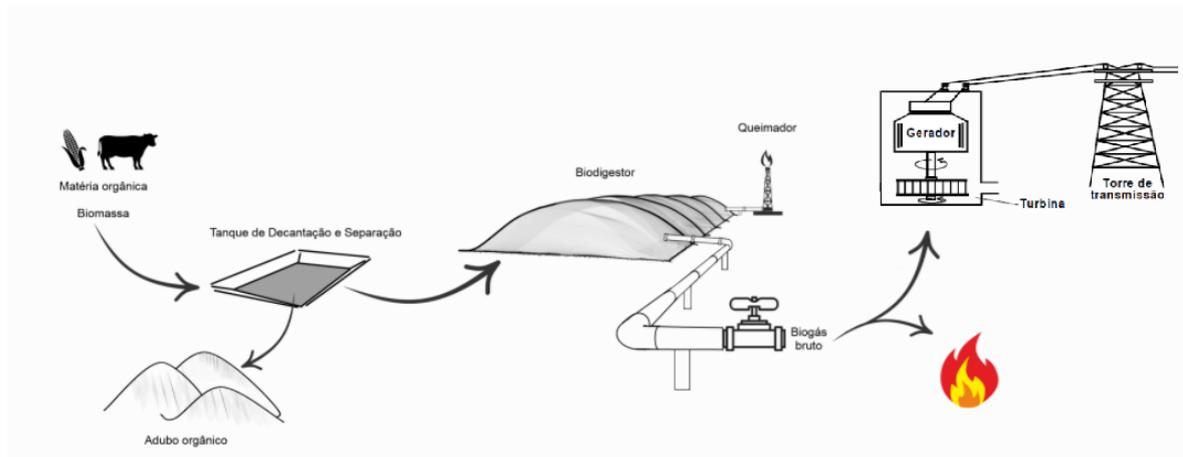
Fonte: (BARBOSA et al., 1995).

3 Metodologia

Este trabalho tem como principal objetivo desenvolver um estudo de caso para implantação de um sistema de biodigestão em propriedades rurais, sendo possível analisar a viabilidade econômica e ambiental de uma usina biomassa. A análise será embasada em artigos acadêmicos, pesquisas e notícias de alta confiabilidade e o mais recente..

A Figura 15 mostra em detalhes o processo de geração de energia por meio da biomassa. Os dejetos são colocados no tanque de decantação e separação, uma parte é utilizada como biofertilizante e a outra vai para o biodigestor para se transformar em biogás. O biogás pode ser utilizado como combustível ou para gerar energia, que é o foco deste trabalho.

Figura 15 – Detalhamento do processo de transformação da biomassa em energia.



3.1 Detalhamento do Projeto para Estudo de Caso

Esta proposta de projeto utiliza o modelo de biodigestor canadense por possuir a tecnologia mais moderna e construção mais simplificada.

Para implantação do biodigestor devem ser analisadas três coisas para escolha do local de implantação: fácil acesso ao local de acumulo de resíduos, fácil acesso aos locais de aplicação do biofertilizantes e proximidade ao local de uso do biogás (JUNQUEIRA, 2014).

O biodigestor deve ficar em um local de fácil acesso e não muito distante, pois isso implica dificuldades para operação do mesmo. O sistema de geração de energia deve ficar protegido e, mantendo distâncias seguras em relação ao biodigestor. O local de implantação do biodigestor deve ser exposto ao sol (JUNQUEIRA, 2014).

Na Figura 16, pode ser observado um biodigestor modelo canadense, com detalhes da construção.

Figura 16 – Biodigestor canadense em construção.



Fonte: Manual de Treinamento em Biodigestão 2008.

3.1.1 Dimensionamento do Sistema de Biodigestão

É recomendado, pelo Manual de Treinamento em Biodigestão, que o biodigestor fique situado à uma distância de, no mínimo, 15 metros de qualquer edificação, como medida de segurança. O modelo detalhado neste trabalho será com único estágio, alimentação contínua e sem agitação, do modelo canadense e segue as instruções contidas no Manual de construção do biodigestor rural.

Pode-se estimar o tamanho do biodigestor pela Eq (3.1).

$$VB = VC.THR \quad (3.1)$$

Onde VB é o volume do biodigestor em metros cúbicos (m^3), VC o volume da carga diária, os dejetos e água, em metros cúbicos por dia (m^3/dia) e THR o tempo de retenção, é o tempo necessário para que a matéria orgânica seja fermentada, é dado em dias.

O volume de alimentação do biodigestor depende de qual matéria orgânica será utilizada. Para esse cálculo devemos saber a média de produção de matéria orgânica e a quantidade de água necessária para preparação da carga do biodigestor (OLIVER et al., 2008).

A produção do metano começa a se processar depois de 20 dias. A quantidade de metano cresce até o trigésimo dia, após esse período começa a decrescer e ocorre o período de fermentação que dura cerca de 90 dias. Costuma-se dimensionar biodigestores para um tempo de retenção de 5 a 6 semanas (OLIVER et al., 2008).

A quantidade de material para produzir $1m^3$ de biogás é dada na Tabela 4.

Tabela 4 – Quantidade de material para produzir $1 m^3$ de biogás

Material	Quantidade (kg)
Esterco fresco de vaca	25
Esterco seco de galinha	16
Esterco de suíno	12
Resíduos agrícolas	25
Lixo	20

As dimensões do biodigestor podem ser definidas de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – Dimensões do Biodigestor

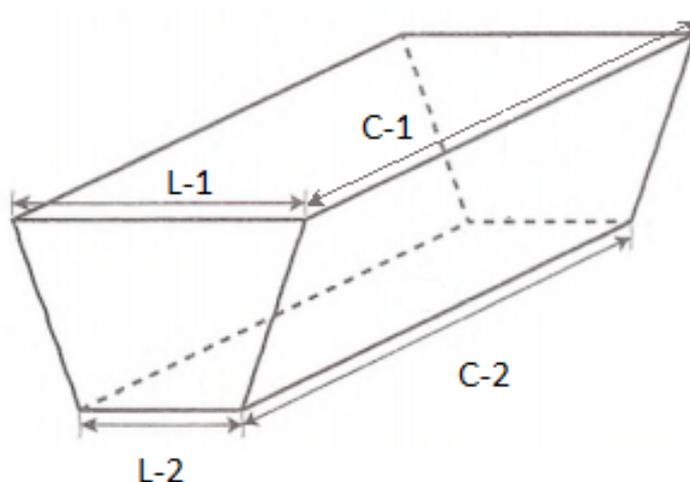
Volume	Profundidade	Comprimento Superior (C-1)	Largura Superior (L-1)	Comprimento Inferior (C-2)	Largura Inferior (L-2)
(m^3)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
3,0	1,0	3,5	1,2	3,0	0,7
7,0	1,0	6,0	2,0	4,8	0,8
15,0	1,4	7,0	2,5	5,5	1,0
20,0	1,5	8,0	3,0	6,0	1,0
30,0	1,5	10,0	3,5	8,0	1,5

Fonte: (OLIVER et al., 2008).

A Figura 17 o dimensionamento do biodigestor seguindo os parâmetros da Tabela 5.

A caixa de carga pode ser um tonel de plástico ou um tanque de concreto, dependendo do volume de carga diária. Não é recomendado o uso de tonéis de metal por enferrujarem rapidamente. A caixa de descarga pode ser utilizada como armazenamento de biofertilizantes; recomenda-se dimensiona-lá para suportar três vezes o volume da carga diária (OLIVER et al., 2008).

Figura 17 – Dimensões do biodigestor.



3.1.2 Materiais Necessários

Segundo (OLIVER et al., 2008), os materiais necessários para a construção do biodigestor são listados abaixo:

- Tonel de plástico com volume igual ao VC;
- Manta plástica de revestimento PVC flexível 1,0 mm;
- Manta plástica de cobertura PVC flexível 1,0 mm;
- Tubulação de PVC 150 mm *branca* para entrada de dejetos e saída de biofertilizantes;
- Tubulações e conexões PVC 40 mm para água *marrom* para condução do biogás;
- Caixa de alvenaria ou fibra para armazenamento do biofertilizante.

3.1.3 Instalação do Biodigestor

De acordo com o (OLIVER et al., 2008), os procedimentos para instalação do biodigestor são:

- Escavar um buraco no solo, com as medidas definidas no projeto de dimensionamento;
- Escavar outro buraco, maior que o primeiro, na saída do biodigestor para acomodar o tonel ou caixa de saída de biofertilizantes;
- Abrir a manta plástica de PVC sobre o buraco;

- Colocar tubos e colar as mangas da manta no biodigestor;
- Fixar o perímetro da manta plástica, enterrando-o, ou com selo d'água;
- Instalar a tubulação de biogás;
- Iniciar a carga.

Na instalação, é de grande importância que a campânula do biodigestor esteja completamente selada, que é o local de armazenamento do biogás. Para que esse processo seja garantido, pode-se enterrar as bordas da manta de PVC ou utilizar um selo d'água, que é um pequeno tanque d'água que deve circundar o biodigestor, e a manta de cobertura do biodigestor, ficará presa no fundo do tanque, com a água selando a câmara (JUNQUEIRA, 2014).

3.2 Critérios Econômicos

Os critérios econômicos escolhidos para avaliação são *Payback*, VPL e TIR. Eles serão relatados individualmente e ao final será feita uma análise comparativa, utilizando os mesmos critérios, das usinas biomassa, fotovoltaicas e de um investimento em poupança.

As definições dos critérios são:

- **Payback:** Relaciona o tempo de retorno do capital investido. É a relação entre os custos de investimento na tecnologia e o lucro obtido a partir do tipo de geração a ser analisado.
- **VPL:** É a valorização do dinheiro com o tempo. Relaciona a diferença entre os fluxos de caixa futuros trazidos a valores presentes.
- **TIR:** É a Taxa Interna de Retorno. É a taxa de desconto que zera o VPL dos fluxos de caixa de um projeto.

3.3 Critérios Ambientais

Os critérios ambientais escolhidos para avaliação são os emissores de gases poluentes e área ocupada. Eles serão relatados individualmente e ao final será feita uma análise comparativa utilizando os mesmos critérios, das usinas biomassa e fotovoltaicas.

As definições dos critérios são:

- **Emissões de gases poluentes:** Referente à taxa de emissão de CO_2 na geração de energia biomassa.

4 Resultados

4.1 Estudo de Caso

Neste trabalho, desenvolve um estudo de caso para implantação de um biodigestor com volume de $30m^3$. O tipo de biodigestor escolhido foi o canadense por possuir menor custo e ser de mais fácil instalação. Não definindo o local para sua implantação, apenas será estimado o tamanho da plantação e a potencial de energia.

Os estudos têm como objetivo, melhorar o aproveitamento dos resíduos provenientes de uma plantação de cana-de-açúcar, além de uma economia de energia elétrica. Os resíduos, após inseridos no biodigestor, saem em forma de biofertilizantes, melhorando a adubação e reduzindo os impactos ambientais.

4.1.1 Dimensionamento

Para o dimensionamento do biodigestor, serão seguidas as etapas abaixo:

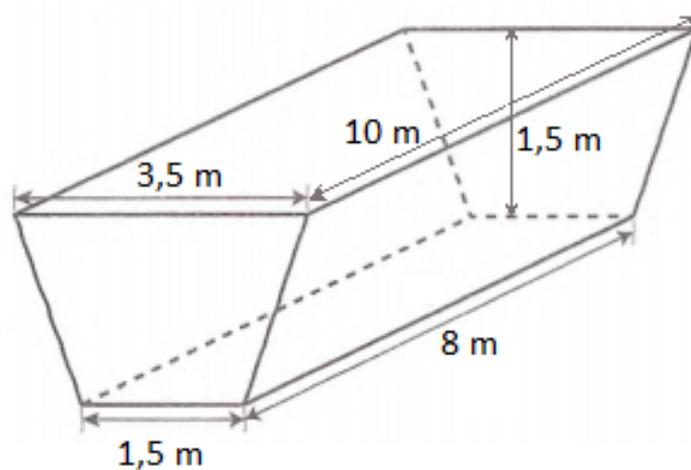
- Determinar as dimensões do biodigestor;
- Cálculo do volume de carga (VC);
- Cálculo do volume de cana-de-açúcar;
- Determinar a área necessária a ser plantada;
- Cálculo do volume de biogás obtido;
- Determinar a quantidade de energia produzida.

Utilizando os dados da Tabela 5, pode-se determinar as dimensões do biodigestor. Para o volume de $30m^3$, podemos definir a profundidade, o comprimento e a largura. As dimensões definidas do biodigestor podem ser observadas na Tabela (6), e na Figura 18.

Tabela 6 – Dimensionamento do Biodigestor

Volume	$30m^3$
Profundidade	1,5 m
Comprimento Superior	8 m
Comprimento Inferior	3,5 m
Largura Inferior	1,5 m

Figura 18 – Dimensões do biodigestor.



Como o abastecimento do biodigestor acontecerá diariamente, seu tamanho deve armazenar apenas a carga diária. Sendo assim, o Volume da carga (VC), será definido como a carga diária total em metros cúbicos. O tempo de retenção (THR) foi definido anteriormente como 6 semanas. Para estimar o Volume de carga (VC) utiliza-se a Eq. (3.1), os cálculos podem ser observados na Eq. (4.1).

$$VC = \frac{VB}{THR} = \frac{30m^3}{42dias} = 0,71428m^3/dia \quad (4.1)$$

O VC deve ser calculado 10% a mais para casos de variação de carga. Portanto, o VC que deve ser utilizado para cálculos da quantidade de resíduos é calculado na Eq. (4.2).

$$VC = VC + 10\% = 0,64286m^3/dia \quad (4.2)$$

O bagaço de cana é o resíduo da cana após a moagem. É um material fibroso obtido após a extração do caldo num terno de moendas. Ao sair da moenda, o bagaço tem aproximadamente 30% da massa da cana (MORAIS; ALSINA; GOMES, 2007). Podemos assim estimar o volume de cana-de-açúcar que deve ser colhido pela Eq. (4.5).

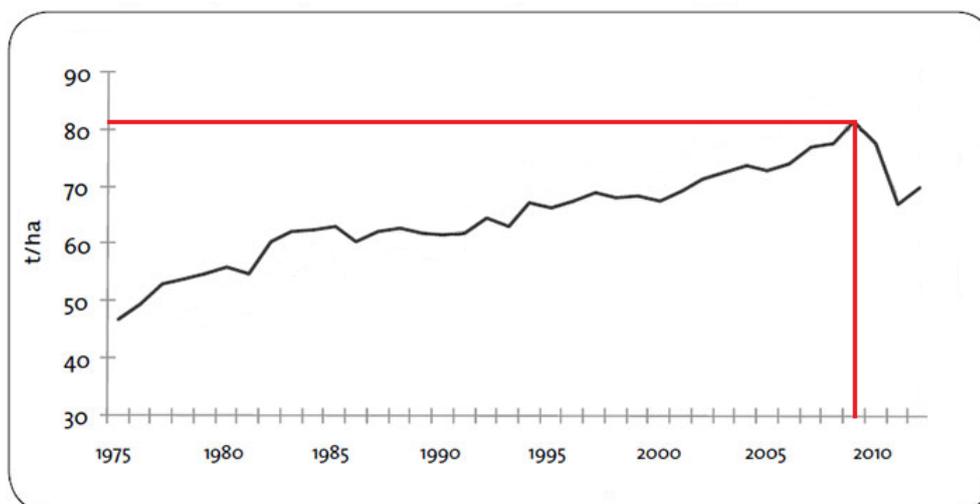
$$Volume(diário) = \frac{VC}{0,3} = \frac{0,64286}{0,3} = 2,1428m^3/dia = 2.142,8kg/dia \quad (4.3)$$

$$Volume(mensal) = Volume(diário)*30 = 2,1428m^3*30 = 64,286m^3/mês = 64.286kg/mês \quad (4.4)$$

$$Volume(anual) = Volume(mensal) * 12 = 64,286m^3 * 12 = 771,432m^3/ano = 771.432kg/ano \quad (4.5)$$

A fim de estimar a dimensão da área plantada, foi feito um estudo da produtividade agrícola da cana-de-açúcar entre 1975 e 2012 baseado em dados de CTC, Unica, Canab, IBGE e Mapa *apud* Brasil. A série para a produtividade em toneladas de cana por hectare (t/ha) é anual. Estes dados podem ser observados na Figura 19.

Figura 19 – Evolução da produtividade da cana-de-açúcar entre 1975 e 2012.



Fonte: CTC, Unica, Conab, IBGE e Mapa *apud* Brasil.

Este estudo de caso leva em consideração a maior safra de cana-de-açúcar mostrada na Figura 19, de acordo com os dados. Para uma plantação fictícia contendo 1 hectare(ha) em áreas plantadas, podemos estimar 80 toneladas de cana-de-açúcar entre os anos de 2009 a 2010. A Eq. (4.7) calcula o tamanho da área plantada necessária para abastecer o biodigestor.

$$Peso = 771,432t \quad (4.6)$$

$$Área = \frac{771,432}{80} = 9,64ha \quad (4.7)$$

4.1.2 Produção de Biogás

A partir dos dados calculados no item anterior, pode se obter a quantidade de biogás que será produzida utilizando a Tabela 4, onde, se mostra que 25 kg de resíduos agrícolas produzem $1m^3$ de biogás. A Eq.4.8 mostra o cálculo da produção mensal de biogás.

$$Volume(biogás)/mês = \frac{(64,286t/ano) * (1m^3)}{0,025t} = 2.571,44m^3/mês \quad (4.8)$$

Pode ser observado que com 9,6ha de cana-de-açúcar plantada, pode-se obter 2.571,44m³ de biogás por mês.

4.1.3 Seleção do Gerador

Utilizando os dados da Tabela 3, sabe-se que o poder calorífico do bagaço da cana-de-açúcar é de 2130kcal/m³. Se para cada 1kcal/m³ de resíduo tem-se um potencial de energia de 0,001163kWh, podemos produzir 2,74kWh para cada m³ de bagaço da cana.

Para o volume mensal de biogás encontrado na Eq. 4.8, pode-se calcular a quantidade de energia produzida.

$$Energia = \frac{(2,47kWh)(2.571,44m^3)}{1m^3} = 6.351,45kWh/mês \quad (4.9)$$

4.2 Análise Econômica

Para determinar os custos iniciais considera-se os preços de materiais e equipamentos necessários para implantação do biodigestor e, ainda, os custos para obtenção da biomassa necessária para o projeto. Os valores envolvidos nos cálculos foram levantados após uma análise de mercado.

4.2.1 Custo de Instalação

Os dados utilizados para o cálculo do custo do biodigestor e grupo gerador foram estimados com base em pesquisas e comparação de pelo menos três empresas que comercializam estes tipos de materiais. A Tabela 7 mostra o custo estimado total pra implantação do sistema de biodigestão e grupo gerador.

Tabela 7 – Custo para implantação do biodigestor e do grupo gerador

	Preço (R\$)
Adaptação a rede elétrica local	7.000,00
Equipamentos do biodigestor e instalação	80.000,00
Projetos e montagem	4.000,00
Valor estimado do grupo gerador	35.000,00
TOTAL	126.000,00

Segundo dados do (CORECON, 2014), o valor médio de 1 hectare de terra, em Minas Geras é de R\$16.500,00. O custo para compra de toda a área necessária esta calculado na Eq. (4.10).

$$Valor(\acute{a}rea) = 9,64ha * 16.500,00 = 158.400,00 \quad (4.10)$$

Segundo dados da (ASSOCANA, 2015), o custo médio da lavoura de cana-de-açúcar, levando em consideração matéria prima e operação, é R\$17.746,83 para cada hectare. Portanto, para este estudo de caso o custo da lavoura é de R\$170.369,57.

Tabela 8 – Custos totais

Tipo de custo	Custo total
Compra da área	158.400,00
Plantação	170.369,57
Biodigestor e grupo gerador	126.000,00
TOTAL	454.769,57

Os dados da Tabela 8 mostram os custos por cada setor e os custos totais para a implantação de uma usina de biomassa utilizando bagaço de cana-de-açúcar como fonte energética e que forneça aproximadamente 6.351,45kWh por mês. Sendo o custo total 454.769,57 para implantação desta usina de biomassa.

Segundo (OLIVEIRA et al., 2009), o tempo de vida útil de uma usina biomassa é, em média, 20 anos. Sendo este tempo referente ao tempo médio de vida do gerador. Porém é possível que ele seja restabelecido com menor custo, ao final desse período.

4.2.2 Indicadores de Viabilidade de Projetos

Segundo (FILHO; KOPITTKE, 2011), para implantação de um projeto devem ser considerados alguns critérios. Econômicos, que se referem a à rentabilidade de um investimento; financeiros, que trata da disponibilidade de recursos; e os imponderáveis, que são os fatores não conversíveis em dinheiro. Em alguns casos é necessário considerar aspectos de análise global de investimentos, como fatores qualitativos e restrições ou políticas e objetivos gerais de uma empresa.

4.2.2.1 Payback

Payback é o tempo necessário para recuperação do capital investido, podendo ser simples, sem considerar o custo de capital, ou descontado considerando o valor do dinheiro no tempo. O *Payback* é utilizado de forma preliminar. Estipula-se um período máximo em que os fluxos de caixa devem cobrir o investimento inicial, caso seja maior que esse período estabelecido, o projeto não deve ser aceito (BRUNI; FAMÁ; SIQUEIRA, 1998).

Segundo o Ranking nacional de tarifas residenciais da (ANEEL, 2015), o valor médio cobrado por 1kWh em Minas Gerais é R\$0,49. Para um mesmo consumo de 211kWh por dia, ficaria em R\$103,39, por mês R\$3.101,70 e por ano 37.220,40. Para a análise de *Payback*, leva-se em consideração critérios como fator de capacidade e tempo de vida útil do projeto.

O cálculo do *Payback descontado* foi realizado para duas situações diferentes. A primeira, quando é necessário todo o investimento para construção da usina biomassa e a segunda quando já existe a área e a plantação. Neste caso, o investimento é apenas para construção da usina.

Figura 20 – Payback para investimento total.

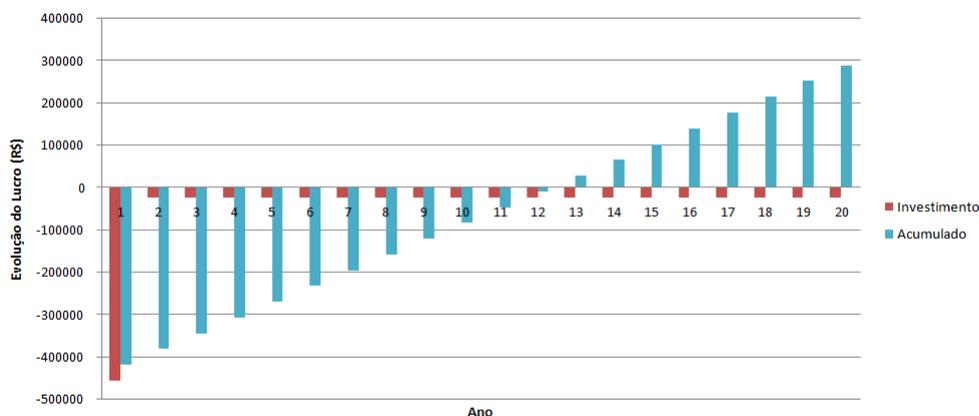
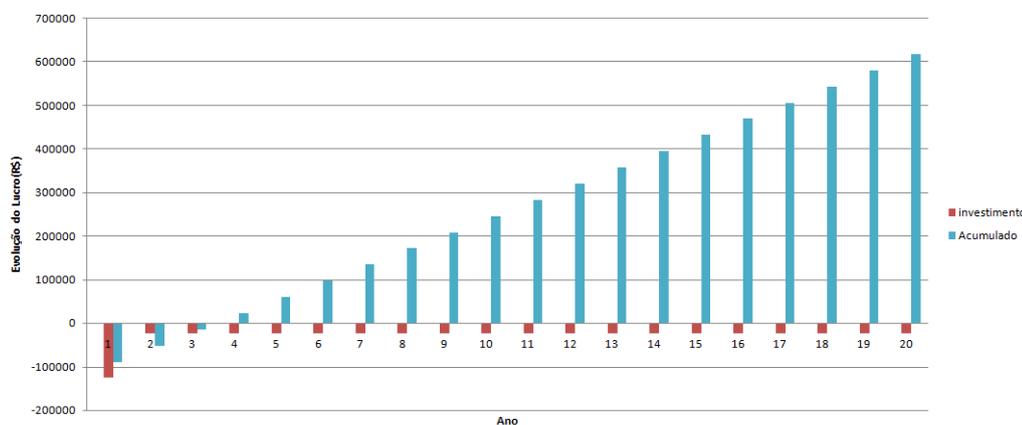


Figura 21 – Payback para investimento apenas na usina biomassa.



O cálculo do *Payback* foi realizado anualmente. As Figuras 20 e 21 mostram os valores acumulados ano a ano. No primeiro caso, o tempo para recuperação do capital investido é de 13 anos, para o segundo caso é de 4 anos. Essa grande diferença se deve ao fato de que a usina de biomassa como forma de aproveitar o resíduo que já existe. No caso da cana-de-açúcar, é indicado quando a lavoura existe para outro fim, e ao invés de descartar os resíduos, eles serão reaproveitados gerando energia. Vale ressaltar que os parâmetros escolhidos são valores médios e estimados, visto que estes variam com a região e economia do país.

4.2.2.2 VPL

O Valor Presente líquido, VPL, é a diferença entre os fluxos de caixa futuros trazidos a valor presente pelo custo de oportunidade do capital e o investimento inicial (BRUNI; FAMÁ; SIQUEIRA, 1998). Se positivo indica que o capital investido será recuperado, remunerado na taxa de juros que mede o custo de capital de projeto.

Quanto maior for o piso mínimo de retorno exigido para o projeto, menor o VPL e, conseqüentemente, mais difícil a viabilização do projeto. É possível fazer relações quanto ao VPL e a viabilidade do projeto, se VPL for maior que zero o projeto é considerado viável e deve continuar sendo analisado; se menor que zero o projeto é inviável e deve ser abandonado; caso o VPL seja igual a zero esta análise é indiferente (SOUZA; CLEMENTE, 2004).

$$VPL = \sum \frac{FC}{(1 + i)^n} \quad (4.11)$$

Para cálculo do VPL foi utilizada a Eq.(4.11). Foi considerada a taxa de desconto igual a 10% ao ano. O cálculo considerou 20 anos. Novamente, foram realizadas análises de VPL para os mesmos dois casos anteriores. O primeiro, sendo necessário a compra do terreno, investimentos com a plantação e com a usina, o valor obtido foi igual a -106.202,50. O segundo caso, onde são necessários apenas investimentos com a usina biomassa, o valor obtido foi igual a 222.567,07. Mais uma vez podemos constatar que o investimento apenas para usina biomassa é muito mais vantajoso.

4.2.2.3 TIR

A Taxa Interna de Retorno representa o valor do custo de capital que torna o VPL nulo, sendo então uma taxa que remunera o valor investido no projeto (BRUNI; FAMÁ; SIQUEIRA, 1998).

Se a TIR for maior que a taxa mínima de atratividade, o investimento no projeto deverá ser realizado, pois gerará valor. Caso seja menor do que a taxa mínima de atratividade, o investimento não deverá ser realizado.

Para cálculo do TIR foi utilizada a Eq.(4.11). o cálculo considerou 20 anos. O valor estimado para o primeiro caso foi igual a 5,93%, para o segundo caso, o valor estimado foi igual a 41,87%. Estes resultados mostram que, quando analisado o TIR, o projeto pode ser realizado para qualquer um dos casos; porem, não irá ser muito lucrativo para o primeiro.

4.2.3 Análise Comparativa

Para o julgamento da viabilidade econômica da usina biomassa, é necessário que os valores apresentados tenha algum parâmetro de comparação. Assim, estes dados serão comparados a um investimento de poupança e com uma usina fotovoltaica.

O investimento de poupança aqui comparado tem taxa de juros 8% ao ano e é baseado em dados do Banco Central. Considerando o mesmo investimento inicial, as análises de Payback, VPL e TIR estão dispostas na Tabela 9.

Tabela 9 – Análise financeira para investimento em poupança

Investimento de poupança	
Payback descontado(anos)	14
VPL(R\$)	-150.439, 73
TIR(R%)	4,59

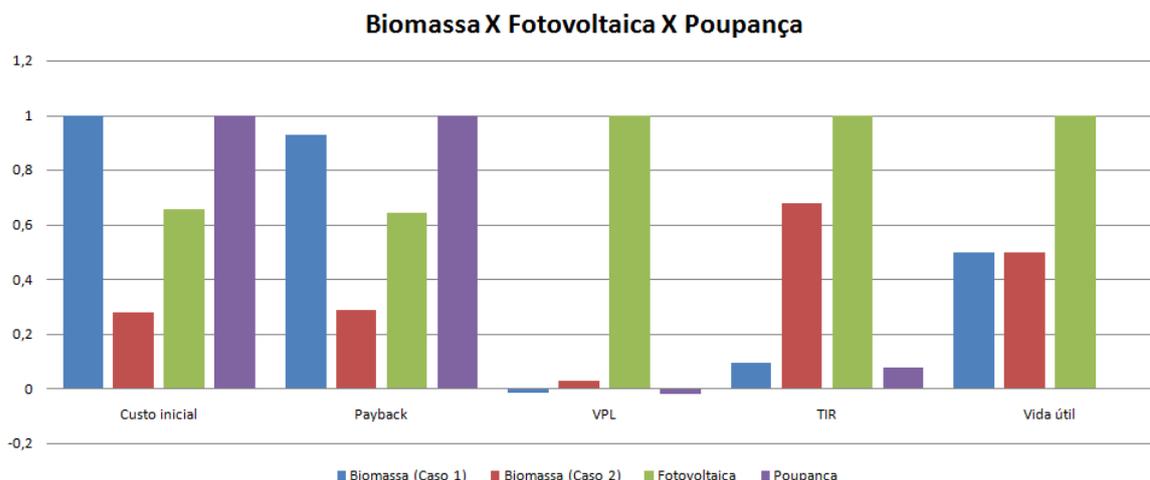
A usina fotovoltaica utilizada para comparação foi simulada através de estudos realizados pelo professor Welbert Rodriques Alves no departamento de engenharia elétrica na UFOP - ICEA, e os dados obtidos estão dispostos na Tabela 10.

Tabela 10 – Análise financeira para usina fotovoltaica

Usina fotovoltaica	
Payback descontado(anos)	9
VPL(R\$)	7.442.302, 40
TIR(%)	61,78

Para facilitar a visualização e comparação dos dados econômicos dos três tipos de investimentos foi gerada a Figura 22, com todos os parâmetros normalizados.

Figura 22 – Parâmetros para análise econômica.



A análise da Figura 22 mostra que o custo de investimento unitário da usina biomassa é mais alto quando comparado a uma usina fotovoltaica, porém para usina biomassa do caso 2, o custo de investimento é o menor de todos. Quando observamos o payback, a usina biomassa do segundo caso é muito menor que da fotovoltaica, da biomassa do primeiro caso e para investimento em poupança.

Em relação aos indicadores VPL e TIR, a usina fotovoltaica possui melhores índices, possuindo ainda o melhor tempo de vida útil, maximizando o tempo de lucro com o investimento. Porém, a usina biomassa para o caso 2 não mostra valores que a tornam inviável em comparação aos outros investimentos.

4.3 Análise Ambiental: Emissões de Gases Poluentes

Emissões de combustíveis fósseis foram responsáveis, na década de 1990, por 83% do poder de aquecimento das emissões de gases de efeito estufa nos Estados Unidos. Os países desenvolvidos contribuíram com 84% do total de emissões de gases de efeito estufa (GEE) desde 1800 no mundo (MACEDO et al., 2005).

Impactos ambientais são alterações das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente causada por alguma forma de matéria ou energia resultante de atividades humanas, que direta ou indiretamente afetam a sociedade (CONAMA, 1986).

Fontes renováveis também apresentam aspectos ambientais negativos. Esse capítulo irá identificar os aspectos positivos e potenciais aspectos negativos associados à implantação de uma usina biomassa.

A análise dos impactos ambientais não é direta como no caso da análise econômica. Isso se deve ao fato de cada tipo de usina causar impactos específicos e, em geral, distintos entre si.

A biomassa tem sido reconhecida como um contribuinte significativo para minimizar os efeitos das mudanças climáticas. A geração de energia utilizando biomassa tem um ciclo de carbono fechado, ao contrário dos combustíveis fósseis. As emissões de carbono são parte de um ciclo, com trocas compensadoras do carbono terrestre e atmosférico. Quando uma floresta cresce, o carbono atmosférico diminui, e vice-versa, sem qualquer alteração líquida de carbono no ciclo (BIOENERGIA, 2012).

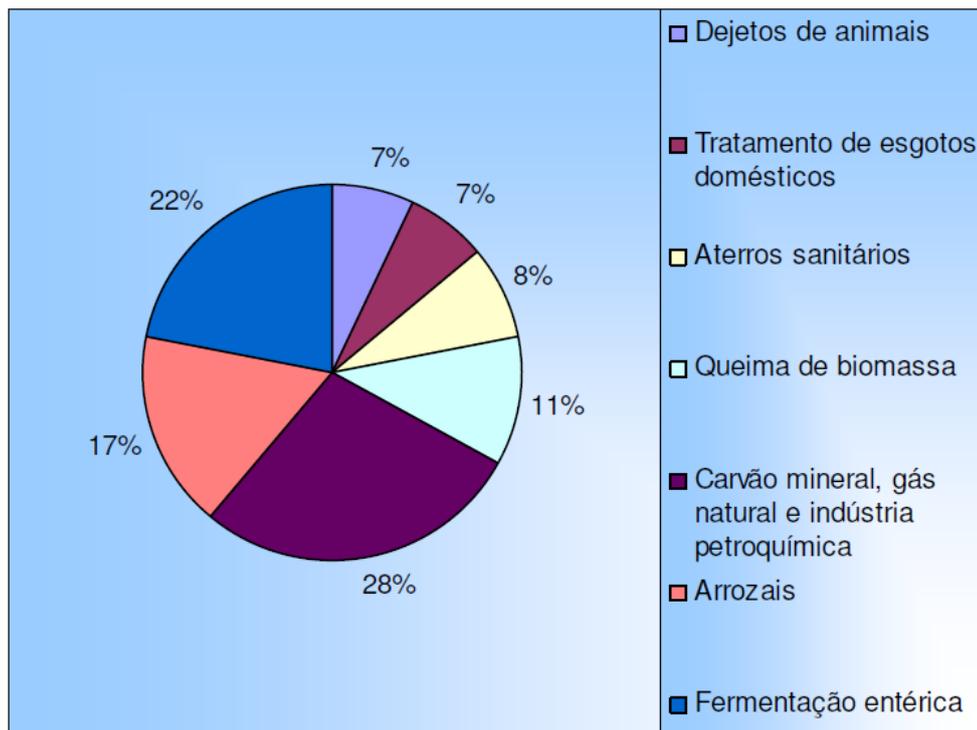
O tratamento através da biodigestão anaeróbica dos dejetos é bastante eficiente, uma vez que aproveita os resíduos para a produção de biogás, contribuindo também para o saneamento rural e a conservação do meio ambiente, pois trás ótimas vantagens na utilização de composto orgânico como adubo, devido o processo de estabilização da matéria orgânica, e benefícios ao pequeno agricultor, reduzindo a emissão de metano e óxido nitroso para a atmosfera, diminuindo o efeito estufa, e assim melhorando a qualidade de vida dos produtores rurais (OLIVER et al., 2008) (FARIAS et al., 2012).

A utilização do biogás como combustível para geração de energia elétrica não apenas aproveita de forma sustentável este subproduto da disposição dos resíduos sólidos, como também evita que o gás metano nele contido seja emitido para a atmosfera. Como o metano tem potencial 21 vezes maior que o CO_2 para aumento do efeito estufa, a queima do biogás na produção de energia gera emissões evitadas deste gás. A quantidade de carbono equivalente que potencialmente seria impedido de alcançar a atmosfera da Terra,

assim, equivale a 12 milhões de toneladas no primeiro ano de geração de energia por meio da recuperação e utilização do biogás. Tais emissões evitadas podem ser credenciadas para a geração de créditos de carbono, que são títulos comercializados em mercado. Os créditos de carbono representam uma segunda fonte de receita para os aterros que geram energia por meio do biogás, complementando assim a receita oriunda da geração e comercialização da energia elétrica (TETRPLAN, 2012).

A Figura 23 apresenta as principais fontes antropogênicas de metano.

Figura 23 – Principais fontes antropogênicas de metano.



5 Conclusão

Este trabalho mostrou que a atividade rural é de grande importância para a economia brasileira, e por isso um estudo visando o melhor aproveitamento energético e sustentabilidade é de grande importância.

Como forma de aproveitar uma fonte de energia renovável, pode-se utilizar biodigestores em propriedades rurais, sendo que existem tipos diferentes, onde a utilização de cada um depende da localização geográfica, tipo de resíduo que será utilizado e benefício que apresenta. No Brasil, o tipo de biodigestor mais utilizado é o canadense.

O sistema de biodigestão proposto mostrou-se uma boa opção para o aproveitamento dos resíduos da cana-de-açúcar, uma vez que apresenta grandes ganhos ambientais da redução da carga orgânica promovidos pelo tratamento, a cana-de-açúcar biodigerida pode ser aproveitada como fertilizante.

A geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores é viável economicamente e ambientalmente, principalmente para o consumo próprio, desde que o proprietário já possua o resíduo e tenha que investir apenas na usina biomassa. A utilização desta tecnologia pode gerar uma renda extra e contínua para o produtor, além de promover um ciclo de produção dentro da propriedade com a utilização do biofertilizante, aumentando assim o potencial produtivo.

Levando em conta os ganhos ambientais, o biodigestor é um excelente método de tratamento de resíduo, propiciando um desenvolvimento sustentável e contínuo, desde que o mesmo seja dimensionado de forma correta e eficiente.

Referências

- ANEEL. Agência nacional de energia elétrica. 2015. 1, 5, 7, 31
- ASSOCANA. Departamento agrícola. 2015. 31
- BARBOSA, C. et al. *Fundamentos da termodinâmica clássica*. [S.l.: s.n.], 1995. 18, 19, 20, 21
- BARBOSA, C. et al. *Biomassa para energia*. [S.l.]: Unicamp, 2008. 4, 13
- BEN. Balanço energético nacional. 2016. 7
- BIG. Banco de informações de geração. 2011. <http://www.aneel.gov.br/outorgas/geracao/-/asset_publisher/mJhnKli7qcJG/content/big-banco-de-informacoes-de-geracao/655808>. Accessed: 2017-03-20. 4
- BIOENERGIA, B. e. Biomassa e bioenergia proporcionam benefícios para diminuir as emissões de gases do efeito estufa. 2012. <<http://www.newsrondonia.com.br/noticias/biomassa+e+bioenergia+proporcionam+beneficios+para+diminuir+as+emissoes+de+gases+do+efeito+estufa/25417>>. Accessed: 2017-09-27. 35
- BRUNI, A. L.; FAMÁ, R.; SIQUEIRA, J. d. O. Análise do risco na avaliação de projetos de investimento: uma aplicação do método de monte carlo. *Caderno de pesquisas em Administração*, v. 1, n. 6, p. 1, 1998. 31, 33
- CARDOSO, B. M. *Uso da Biomassa como Alternativa Energetica*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012. 1, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13
- CONAMA. Resolução conama. 1986. Resolução no.001. 35
- CORECON. Conselho regional de economia. 2014. 30
- EPE. Empresa de pesquisa energética. 2012. <<http://http://www.epe.gov.br>>. Accessed: 2017-08-04. 9, 13
- FARIAS, R. Marques de et al. Biodigestão anaeróbia de dejetos de poedeiras coletados após diferentes períodos de acúmulo. *Ciência Rural*, SciELO Brasil, v. 42, n. 6, 2012. 35
- FILHO, N. C.; KOPITTKKE, B. H. *Análise de investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial*. [S.l.]: Atlas, 2011. 31
- FILHO, P. L. D. Análise de custos na geração de energia com bagaço de cana-de-açúcar: um estudo de caso em quatro usinas de São Paulo. *Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Energia*, 2009. 10
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. *Estudos avançados*, SciELO Brasil, v. 21, n. 59, p. 7–20, 2007. 3
- JUNQUEIRA, S. Geração de energia através de biogás proveniente de esterco bovino: estudo de caso na fazenda aterrada. *Universidade do Rio Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica DEM/POLI/UFRJ, Rio de Janeiro*, 2014. 22, 26

- LORA, E.; ANDRADE, R. Biomass as energy source in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 13, n. 4, p. 777–788, 2009. 5
- MACEDO, I. d. C. et al. A energia da cana-de-açúcar. *Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e sua sustentabilidade. União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo (UNICA)*, 2005. 35
- MORAIS, V. L. M.; ALSINA, O. L. S.; GOMES, W. C. 4. utilização do bagaço de cana-de-açúcar como biomassa adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos. *Revista eletrônica de Materiais e processos*, v. 2, n. 1, 2007. 28
- OLIVEIRA, R. D. et al. *Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2009. 31
- OLIVER, A. d. P. M. et al. Manual de treinamento em biodigestão. *Instituto de Estudos Del Hambre. Bahia*, p. 23, 2008. 23, 24, 25, 35
- 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. *São Paulo*, 2006. 18, 19, 20
- PNE. Plano nacional de energia. 2016. 1, 9
- PRATI, L. Geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores. *Monografia do Curso de Graduação de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná*, 2010. 14, 15
- PRETO, E. V.; MORTOZA, G. L. Geracao de energia eletrica utilizando biomassa. 2011. 1, 5, 6, 8, 9, 11
- SHUBEITA, F. d. M. et al. Um estudo sobre monitoramento e controle de biodigestores de pequena escala. 15, 16, 17
- SOUZA, A.; CLEMENTE, A. *Decisões financeiras e análise de investimentos: fundamentos, técnicas e aplicações*. [S.l.]: Atlas, 2004. 33
- SOUZA, K. C. G. d. *Modelo de simulação para análise da viabilidade de geração de energia a partir da utilização de biodigestores*. Dissertação (Mestrado), 2010. 14, 15, 16, 17
- SZYMANSKI, M. S. E.; BALBINOT, R.; SCHIRMER, W. N. Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono—estudo de caso. *Semina: Ciências Agrárias*, Universidade Estadual de Londrina, v. 31, n. 4, 2010. 15
- TETRAPLAN, A. Estudo sobre o potencial de geração de energia a partir de resíduos de saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável. *Acesso em*, v. 15, 2012. 36