

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**VIABILIDADE ECONÔMICA DA
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM BIOGÁS:
APLICADA AO MEIO RURAL**

EFFRAIN RONEY BERNARDES

EFFRAIN RONEY BERNARDES

**VIABILIDADE ECONÔMICA DA
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM BIOGÁS:
APLICADA AO MEIO RURAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Fontes Alternativas de Energia e Eletricidade Rural

Orientador: José Roberto Camacho, PhD - UFU

Uberlândia-MG

2020.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

B522v Bernardes, Effrain Roney, 1990-
2020 Viabilidade econômica da geração distribuída com biogás [recurso eletrônico] : aplicada ao meio rural / Effrain Roney Bernardes. - 2020.

Orientador: José Roberto Camacho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.3032>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia elétrica. . I. Camacho, José Roberto, 1954-, (Orient.).
II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

EFFRAIN RONEY BERNARDES

**VIABILIDADE ECONÔMICA DA
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM BIOGÁS:
APLICADA AO MEIO RURAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Fontes Alternativas de Energia e Eletricidade Rural

Banca Examinadora:

José Roberto Camacho, PhD - UFU

Márcio José da Cunha, Dr - UFU

Juliana Almansa Malagoli, Dra - UFPR



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 735, PPGEELT				
Data:	Trinta de julho de dois mil e vinte	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	17:00
Matrícula do Discente:	11712EEL004				
Nome do Discente:	Effrain Roney Bernardes				
Título do Trabalho:	Viabilidade Econômica da Geração Distribuída com Biogás: Aplicada ao meio rural.				
Área de concentração:	Sistemas de energia elétrica				
Linha de pesquisa:	Eletricidade rural e fontes alternativas de energia				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Programa: ENGENHARIA ELÉTRICA (32006012001P9) Nome: ESTUDOS DINÂMICOS PARA ANÁLISE DE IMPACTO DOS REQUISITOS MÍNIMOS PARA A CONEXÃO DE PRODUTORES INDEPENDENTES DE ENERGIA (PIE) AO SISTEMA ELÉTRICO COMERCIAL. Data de Início: 01/01/2010. Natureza do Projeto: OUTRA. Situação do Projeto: EM ANDAMENTO				

Reuniu-se no Anfiteatro 1E, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Márcio José da Cunha - FEELT/UFU; Juliana Almansa Malagoli - UFPR; José Roberto Camacho - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). José Roberto Camacho, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **Mestre**.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **José Roberto Camacho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/07/2020, às 17:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcio José da Cunha, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/07/2020, às 18:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **JULIANA ALMANSA MALAGOLI, Usuário Externo**, em 30/07/2020, às 18:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1858775** e o código CRC **41C7F889**.

Agradecimentos

A DEUS por tudo.

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pela saúde e pela oportunidade, gostaria de agradecer à minha esposa Raquel Bernardes, pela paciência e dedicação, à minha família pela ajuda e amparo, ao professor José Roberto Camacho pelo incentivo e conselhos e à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelas oportunidades.

Resumo

BERNARDES, E. R. **VIABILIDADE ECONÔMICA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM BIOGÁS: APLICADA AO MEIO RURAL**. 103 p. Dissertação – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Julho de 2020.

Na década de 70, a crise do petróleo no Brasil despertou o interesse em pesquisar fontes de energia inesgotáveis. Dentro dessas fontes de energia, as conhecidas como limpas e abundantes tornou-se alternativa viável, diminuindo a capacidade poluidora de resíduos, pois o gás emitido por eles na decomposição que antes iria para o meio ambiente, agora se destina a produção de energia e a porção sólida utilizada como adubo orgânico (GASPAR, 2013). Esse trabalho visa implementar um estudo de caso para estimar a viabilidade econômica do projeto, fontes híbridas, em zona rural. O projeto em questão, será analisando através de software Homer e métodos matemáticos, garantindo resultados próximos aos calculados analiticamente, em comparação às fontes de energia estudadas bem como suas viabilidades e rentabilidades através da geração distribuída isolada, podendo trazer retornos rápidos e seguros, como um retorno de 84,37% biogás e 77,76% para fotovoltaico em comparação ao investimento inicial ao longo de 25 anos. Atualmente, o Brasil sofre com escassez de chuvas e consequentemente, com problemas na matriz energética, visto que, a maior parte da eletricidade brasileira é oriunda de usina hidroelétrica. Por isso, a finalidade desse estudo é apresentar uma solução e consequentemente autossuficiência nas zonas rurais, aproveitando os biodigestores e sol em abundância para produzir energia elétrica.

Palavras-chave: Geração Distribuída, Biogás, Fotovoltaico, Sistema isolado, Taxa de retorno de investimento.

Abstract

BERNARDES, E. R. **ECONOMIC FEASIBILITY OF GENERATION DISTRIBUTED WITH BIOGAS: APPLIED TO RURAL ENVIRONMENT.** 103 p. Master Thesis – Faculty of Electrical Engineering, Universidade Federal de Uberlândia, January 2020.

In the 1970s, the Brazilian oil crisis sparked interest in researching inexhaustible sources of energy. Within these sources of energy, those known as clean and abundant have become a viable alternative, reducing the pollutant capacity of waste, because the gas emitted by them in the decomposition that would previously go to the environment, is now destined for energy production and solid portion used as organic fertilizer (GASPAR, 2013). This work aims to implement a case study to estimate the economic viability of the project, hybrid sources, in rural areas. The project in question will be analyzed through software and mathematical methods, guaranteeing results close to those calculated analytically, compared to the energy sources studied as well as their feasibility and profitability through isolated distributed generation, which can bring fast and safe returns, such as a return of 84.37% biogas and 77.76% for photovoltaic compared to the initial investment over 25 years. Currently, Brazil suffers from a shortage of rainfall and consequently, with problems in the energy matrix, since the majority of Brazilian electricity comes from a hydroelectric power plant. Therefore, the purpose of this study is to present a solution and consequently self-sufficiency in rural areas, taking advantage of biodigestors and abundant sun to produce electricity.

Keywords: Distributed Generation, Biogas, Photovoltaic, Isolated system, Payback.

Lista de Figuras

Figura 1.1 –Sistema desconectado da rede, sistema off-grid.(Fonte:Avaliação de Desempenho de Geradores Solares Fotovoltaicos conectados à rede elétrica no brasil, 2015)	30
Figura 1.2 –Sistema Conectado à Rede, sistema on-grid.(Fonte:Avaliação de Desempenho de Geradores Solares Fotovoltaicos conectados à rede elétrica no brasil, 2015)	31
Figura 2.1 –Órbita da terra em torno do sol, com seu eixo N-S.(Fonte:fisica.ufpr.br/)	36
Figura 2.2 –Distribuição espectral da radiação solar.(Fonte:fisica.ufpr.br)	37
Figura 2.3 –Trajetória dos raios de Sol na atmosfera e definição do coeficiente de "Massa de Ar"(AM).(Fonte: CRESESEB,2004)	38
Figura 2.4 –Efeito fotovoltaico na junção pn.(Fonte: CRESESEB,2004)	40
Figura 2.5 –Efeito fotovoltaico na junção pn.(Fonte:bluesol.com.br)	40
Figura 2.6 –Modelos de células fotovoltaicas.(Fonte: CRESESEB,2004)	41
Figura 2.7 –Seção transversal do biodigestor tipo canadense.(Fonte:revistaea.org/) .	43
Figura 2.8 –Modelo de biodigestor Indiano.(Fonte: ANDRADE et al., 2002)	44
Figura 2.9 –Modelo de biodigestor chinês.(Fonte: DEGANUTTI et al, 2002)	44
Figura 2.10 –Motor ciclo Otto alimentado por biogás (FONTE:adaptado de patente DUAL FUEL method and system(2003))	49
Figura 2.11 –Sistema dual fuel aplicado a motores de combustão interna (FONTE>manual biogás)	49
Figura 3.1 –Software Homer Pro(Fonte:www.homerenergy.com)	54
Figura 3.2 –Dimensionamento da Carga.(Fonte:homerenergy.com)	55
Figura 3.3 –Tipo de Carga.(Fonte:homerenergy.com)	56
Figura 3.4 –Carga de biomassa para Biogás.(Fonte:homerenergy.com)	56
Figura 3.5 –Dados de entrada sistema fotovoltaico.(Fonte:homerenergy.com)	57
Figura 4.1 –Modelo de geração híbrida isolada.(Fonte: Software Homer Pro)	60

Figura 4.2 –Confinamento de gado leiteiro.(Fonte: Próprio autor)	61
Figura 4.3 –Biodigestor.(Fonte: Próprio autor)	65
Figura 4.4 –Caixa de passagem biodigestor.(Fonte:Próprio Autor)	65
Figura 4.5 –Planta de topo de escavação e dimensionamento da manta.(Fonte>manual de treinamento biogás WINROCK)	66
Figura 4.6 –Dimensionamento da área da manta a ser utilizada por volume de bi- odigestor.(Fonte:Próprio Autor)	67
Figura 4.7 –Planta do biogás contemplando todas as etapas.(fonte: https://wamgroup.com.br)	68
Figura 4.8 –Separador de Sólidos e Líquidos (Fonte:próprio autor)	69
Figura 4.9 –Níveis de irradiação no território brasileiro.(fonte:SWERA)	75
Figura 5.1 –Fazenda Sabiá no município de Monte Alegre-MG(Fonte:googlemaps.com)	80
Figura 5.2 –Consumo da Fazenda Sabiá em Monte Alegre-MG.(Fonte:CEMIG) . .	80
Figura 5.3 –Motor Biogás 150 kVA (FONTE: Próprio Autor)	84
Figura 5.4 –Detalhes do alternador de energia (FONTE: WEG)	87
Figura 5.5 –Separador de Sólidos e Líquidos(FONTE: wamgroup.com.br)	88
Figura 5.6 –Usina de 72,6 kWp em Monte Alegre-MG (Fonte:Próprio Autor)	89
Figura 5.7 –Radiação Solar em Monte Alegre-MG.(Fonte:Software Radasol 2) . . .	89
Figura 6.1 –Níveis de radiação ao longo do ano, software PVsyst(Fonte: Software PVsyst)	91
Figura 6.2 –Resultado da produção de energia ao longo do ano PVsyst(Fonte: Soft- ware PVsyst)	92
Figura 6.3 –Resultado da simulação no software Homer Pro para duas fontes de energia(fonte: homer pro)	93
Figura 6.4 –Resultado do payback ao longo de 25 anos entre as duas fontes de energia(Fonte: Próprio Autor)	94

Lista de tabelas

Tabela 4.1 –Dados para dimensionamento do Biodigestor.	63
Tabela 4.2 –Dimensionamento do biodigestor de acordo com o volume.	66
Tabela 5.1 –Dimensionamento para Vaca Leiteira.	81
Tabela 5.2 –Dimensionamento para Bezerro.	81
Tabela 5.3 –Dimensionamento para Bois.	81
Tabela 5.4 –Dimensionamento Total.	82
Tabela 5.5 –Equações para cálculo dimensionamento do biodigestor.	83
Tabela 5.6 –Dados do material orgânico.	84
Tabela 5.7 –Dados do Biogás Informações.	88
Tabela 5.8 –Dados técnicos dos módulos fotovoltaicos	90
Tabela 5.9 –Dados técnico do Inversor.	90
Tabela 6.1 –Dados de entrada software Homer Pro fonte biogas.(Fonte: adaptado Software Homer Pro)	92
Tabela 6.2 –Dados de entrada Software Homer Pro fonte fotovoltaica.(Fonte: adap- tado Software Homer Pro)	92
Tabela 6.3 –Resultados dos indicadores de retorno sobre o investimento.	94
Tabela 6.4 –Levantamento do Consumo Anual da Fazenda Sabiá.	95
Tabela 6.5 –Energia gerada pelas diferente fontes de energia Biogás/Fotovoltaica .	96

Lista de símbolos

BPld - Potência da grade respectivamente(KVA);
CB - custo do biodigestor(R)
CB -volume útil do reator(m³);
E - energia desejada (kWh/mês);
Ec - energia consumida (kWh);
Es - Energia gerada(kWh);
FAC - fração anual de confinamento(adimensional);
Gstc - constante(1kWh/m²);
Htot - irradiação(kWh/m²/*dia* \times 30*dias*);
kW - potência instalada do sistema(kW);
Nd - número de dias trabalho(dias);
Nh - número de horas que o sistema é ligado (horas);
Nd - número de dias trabalhado, quando o sistema é ligado(dia/mês);
Pld - carga da Demanda (KVA);
PPld - Demanda de potência de pico de carga(KVA);
PADB - produção anual de dejetos por bovinos(m³/*ano*);
PDDb - produção diária de dejetos por bovinos da categoria(m³/*dia*);
PPld - volume diário de dejetos(m³/*animal.dia*);
PTE - potencial de produção de eletricidade (kWh.dia);
PCI - poder calorífico(kWh.m);
PB - produção anual de biogás(m³.*dia*);
Pr - potência requerida(kWh);
Q - vazão(m³/*d*);
TDH - Tempo de detenção hidráulico (dias);
Td - taxa de desempenho(está entre 0, 75 e 0, 85);
Tpc - período de ponta de carga(horas);
Vb - volume do biogestores (m³);

Sumário

1	Introdução	23
1.1	Motivação	24
1.2	Objetivos	25
1.2.1	Objetivo Geral	25
1.2.2	Objetivo Específico	26
1.3	Problematização	26
1.3.1	Geração Qualificada através de sistema Biogás	28
1.3.2	Geração Energia Através da Energia Fotovoltaica	29
1.3.3	Sistema Isolado	29
1.3.4	Sistema Conectado	30
1.4	Estrutura do Trabalho	31
2	Estado da Arte	33
2.1	Introdução	34
2.2	Sistema Híbrido de Geração	34
2.3	Especificação do sistema híbrido	35
2.3.1	Sistema fotovoltaico	35
2.3.2	Radiação Solar	35
2.3.3	Radiação Solar: Captação e Conversão	36
2.3.4	Radiação Solar a Nível do Solo	37
2.3.5	Efeito Fotovoltaico	38
2.3.6	Módulos Fotovoltaicos	41
2.3.7	Sistema Biogás	41

2.3.8	Características do Biodigestores	42
2.3.9	Características do Gerador Biogás	47
2.3.10	Motores a Biogás	47
2.3.11	Motores de ciclo otto operando com biogás	48
2.3.12	Motores de Diesel adaptado operando com biogás	50
2.4	Etapas do processo de digestão	51
2.5	Biofertilizante	52
3	Software: Homer Pro	53
3.1	Introdução	53
3.2	Uso do Homer Pro	54
3.3	Dados de Entrada	55
3.4	Dados de Saída	57
3.5	Conclusão	58
4	Modelagem da Geração Híbrida Isolada e suas Aplicações	59
4.1	Metodologia desenvolvida para biogás e fotovoltaica para sistemas isolados	59
4.2	Dimensionamento e Topologia da Geração Híbrida	60
4.2.1	Consumo Mensal	60
4.2.2	Dimensionamento do sistema de biogás	60
4.2.3	Dimensionamento Biodigestor	62
4.2.4	Composição de matérias orgânicos nos dejetos	73
4.2.5	Dimensionamento do Sistema Fotovoltaica	74
4.2.6	Custos Associados aos Sistemas Híbridos	76
4.3	Conclusão	76
5	Metodologia da Geração Distribuída Isolada com Biogás e Fotovoltaica	79
5.1	Introdução	79
5.2	Consumo Mensal	79
5.3	Material Orgânico	80
5.4	Dimensionamento Biodigestor	82
5.5	Sistema Fotovoltaico	87
5.6	Conclusão	89
6	Análises dos resultados dos Projetos de Geração Híbrida	91

6.1	Análise através do software Homer Pro	92
6.2	Resultados da Viabilidade Econômica	93
6.3	Efeitos sobre o solo	96
7	Conclusões	99
7.0.1	Sugestões para trabalhos futuros	100
	Referências	101

CAPÍTULO 1

Introdução

Com os efeitos do aquecimento global, várias alternativas de energia vêm sendo discutida aos longo dos anos, sendo assim, apartir do ano de 1970 com a crise no petróleo no Brasil despertou o interesse em pesquisas fontes de energia inesgotáveis. Nos últimos anos, tanto a energia proveniente do Biogás, fermentação orgânica, quanto a fotovoltaica, energia solar, ficaram mais acessíveis ao pequeno e médio produtor rural, com isso trouxe um maior rentabilidade na implementação de projetos com fontes alternativas para esse tipo de unidade consumidora.

A energia é um bem indispensável à existência de qualquer ser vivo. Dentre as suas formas finais, a energia elétrica é uma das mais utilizadas, e, embora presente na vida de muitos, não abrange todas as pessoas. A busca pela universalização do atendimento elétrico constitui um constante desafio vivido por cidadãos comuns, autoridades, governos e demais segmentos da sociedade. Um dos principais motivos da ausência de energia elétrica na vida de milhares de pessoas no mundo, é a condição de pobreza aliada à situação de isolamento geográfico em que elas se encontram. Apesar de ainda crítico, esse panorama vem sendo alterado com o passar do tempo. O avanço na pesquisa e desenvolvimento de alternativas energéticas baseadas em fontes renováveis, junto com programas governamentais e sociais, preocupados principalmente com a exclusão proporcionada pela ausência de energia elétrica e com os crescentes problemas ambientais, têm sido responsáveis por profundas e importantes mudanças. Países como a Alemanha, Espanha e Estados Unidos já contam com grande incorporação de energias renováveis em suas matrizes energéticas.

Em âmbito nacional, programas governamentais como o Proinfa e o Luz Para Todos, constituem grandes incentivos ao desenvolvimento de estudos que visam tornar as fontes renováveis ainda mais competitivas. A expansão do atendimento elétrico no Brasil, assim como em muitos outros países do mundo, dá-se basicamente por meio da extensão de linhas de transmissão pertencentes ao sistema interligado, ou através da geração térmica de pequeno, médio e até mesmo grande porte, usualmente com a utilização de grupos geradores com combustível de origem fóssil, principalmente o óleo diesel. A primeira é

uma solução viável quando o sistema de transmissão/distribuição não se encontra muito distante do centro de consumo a ser atendido, ou quando este tem porte suficiente para representar atratividade econômica para a concessionária. O segundo tem seus maiores atrativos na relativa facilidade de aquisição, instalação e uso, além do reduzido custo inicial. Tais soluções, entretanto, não constituem opção única. Ao contrário, o acelerado crescimento técnico das fontes renováveis vem tornando-as competitivas, e por muitas vezes mais viáveis do que as fontes ditas convencionais. Sistemas renováveis, cujas fontes primárias são dos tipos solar fotovoltaica e eólica, estão entre as opções mais consideradas atualmente, embora haja também a possibilidade de utilização de sistemas à biomassa e pequenas centrais hidrelétricas.

No contexto atual da situação energética do Brasil, vem destacando-se fontes alternativas de energia para suprir a falta da mesma. Contudo, principalmente em zonas rurais onde energia de qualidade é de difícil acesso, através de investimento, os produtores rurais vêm empenhando em novas fontes de energia. De acordo com os órgãos regulamentadores, a produção animal é uma das atividades de maior impacto ambiental, considerada por estes como uma das principais causadoras de degradação, tendo um grande potencial poluidor no que diz respeito aos recursos hídricos. Seguindo essa linha, surgiu a necessidade de se criar biodigestores para juntar os dejetos animais, e, através disso, utilizar o metano, oriundo da decomposição da matéria orgânica, para geração de energia elétrica. Por outro lado, sempre existiu uma fonte inesgotável de energia, o Sol, usando dessa matéria prima também, para geração de energia elétrica através do efeito fotovoltaico.

Com as resoluções normativa da ANEEL 482, o sistema de geração distribuída ficou altamente rentável, visto que, essas normas ajudam nas formas de compensação, assim trazendo uma maior viabilidade. Em meio à conjuntura tecnológica e aos avanços científicos que propiciam o advento de novas ferramentas computacionais, softwares são frequentemente desenvolvidos com o propósito de simplificar a resolução de problemas e de garantirem maior confiabilidade nos resultados. O programa de simulação de energia solar (PVsyst) com interface em 2D, vem com este objetivo de aliar um método: teórico na resolução de problemas ligados à engenharia, em especial à engenharia elétrica, tais como: sombreamento, quantidades de módulos fotovoltaicos, inversores, cabeamento e viabilidade econômica. Sua interface traz ferramentas necessárias para estimar a quantidade necessária para atender a demanda e verificar se há sombreamento ou outros fatores que possam trazer futuros problemas para a geração de energia. O programa PVsyst tem ganhado grande espaço, tanto na área acadêmica quanto industrial.

1.1 Motivação

A motivação da dissertação se dá pelo seguinte aspecto, pois a geração distribuída vem criando dimensões em grandes escalas, por isso, cada vez mais o investimento em fontes

alternativas de energia tem sido a solução para os países em termo de geração de energia elétrica limpa e renovável, sendo que, em países com grandes dimensões territoriais como Brasil, tem havido a necessidade de buscar novas soluções para crises energéticas, visto que, a maior parcela da sua matriz energética vem da geração hídrica na qual cada vez mais vem se tornando mais escassa.

O aspecto é que o uso da energia está diretamente relacionado ao desenvolvimento econômico e industrial. Países como EUA, Japão e o continente europeu que apresentam o maior desenvolvimento econômico, são justamente aqueles que possuem os menores preços de energia e demandam os maiores consumos energéticos. Historicamente, a revolução industrial gerou uma mudança no uso da energia, impactando o preço de mercado. Outra mudança de paradigma ocorreu em 1973, quando a crise do petróleo gerou uma necessidade de rever o mercado energético mundial. Não distante, em 2000, com a queda do óleo e do gás natural, bem como, com o aumento do preço dessas fontes de energia, outras fontes passaram a ser consideradas no planejamento estratégico. Diferentes vetores energéticos passaram a serem maximizados no uso.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é demonstrar a viabilidade econômica da geração distribuída contendo biogás e energia fotovoltaica em rede isolada, isto é, sem estar conectado na rede. A geração distribuída pode ser definida, conforme a *Wade World Alliance for Decentralized Energy*, como a redução de perdas nas linhas de transmissão e com a possibilidade de cogeração são benefícios diretos (HOLANDA, 2003). Praticamente todas as regiões do Brasil recebem mais de 2.200 horas de insolação por ano, com um potencial equivalente a 15 milhões de TWh (15×10^6 Wh), correspondendo a 32 mil vezes o consumo nacional de eletricidade, que em 2015 atingiu 464,70 TWh (NORTE, 2012). A maior parte do território brasileiro está localizada próxima à linha do equador, o que implica em dias com maior quantidade de horas de radiação solar. A energia fotovoltaica tem pouca participação na matriz elétrica brasileira (0,11%) (SOUZA, 2012). Se todo o potencial de geração de energia solar nas residências e comércios brasileiros fosse aproveitado com sistemas fotovoltaicos, o país produziria 283,5 milhões de MWh por ano. Esse volume de energia seria suficiente para abastecer mais de duas vezes o atual consumo doméstico de eletricidade, que é de 124,80 milhões de MWh por ano (YANNING; BINGGANG, 2015).

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral ser uma referência para estudos posteriores na área de fontes alternativas de energia, com ênfase na viabilidade econômica de geração distribuída com biogás e fotovoltaica, bem como fazer com que algumas informações im-

portantes, que são multidisciplinares e que são relacionadas à área de energias renováveis sejam reunidas em um único documento e, que uma explicação objetiva a respeito de temas não familiares ao engenheiro eletricista, seja aplicada.

1.2.2 Objetivo Específico

O crescimento populacional, assim como a necessidade da expansão industrial e comercial são fatores que exigem a ampliação da geração da energia elétrica e das melhorias nas técnicas de geração, transmissão e distribuição elétrica. Estima-se que no ano de 2030 o consumo global da energia elétrica seja 50 % maior que no ano de 2008 (REN21,2011;US EIA,2011). No Brasil, estudos realizados mostram que o consumo de energia elétrica, em 2022, será cerca de 50,17% maior que no ano de 2012 (ANEEL, 2012).

1.3 Problematização

Nos últimos anos, o consumo da energia elétrica no Brasil cresceu de uma forma significativa. Em 2015, a Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) chegou a 615,9 TWh, montante 1,3% inferior ao de 2014, destaque para os aumentos de 77,1% na oferta por geração eólica, de 7,1% por biomassa e outras renováveis, e de 5,8% por bagaço de cana. Assim, o Brasil conta com 4.602 empreendimentos em operação, totalizando 149 GW de potência (ANEEL, 2016).

A população humana da Terra já ultrapassou 7 bilhões (NILOY C. S.; SHUVAJYOTI, 2010), e todos esses habitantes querem a energia necessária para sustentar suas vidas. Exatamente como muita energia é necessária para atender a essas necessidades e exatamente quais fontes de energia vão atender a essas necessidades serão perguntas a serem abordadas pelo presente e por gerações futuras. Uma certeza, no entanto, é que as nações em desenvolvimento estarão aumentando seu uso de energia per capita significativamente. Por exemplo, em 1997, a República Popular da China estava construindo usinas geradoras elétricas à taxa de 300 megawatts por semana. Estas plantas têm usado relativamente a barata, velha e ineficiente, tecnologia a carvão e fornecem eletricidade para predominantemente usos finais ineficientes (BERNARDES R.L.M.;GIAROLA, 2019). As potenciais consequências para o planeta são contínuas. A importância desse esforço é profunda, assim, a seguir será demonstrado os detalhes da energia fotovoltaica, uma fonte promissora de energia para o futuro, é instrutivo olhar para o quadro atual de energia técnica e econômica. Esse visual vai permitir o leitor para avaliar melhor as contribuições que os engenheiros precisarão fazer em direção a um futuro de energia sustentável para o planeta (ANEEL, 2016).

Estudos indicam que, 90% do CH₄ emitido para atmosfera deriva-se da decomposição de biomassa, sendo o restante de origem fóssil, como por exemplo, de processos

petroquímicos (ALVES, 2000).

De acordo com Constant et al (1989), a biomassa como matéria-prima pode originar-se de quatro fontes diferentes:

- ❑ **Resíduos Agrícolas:** Estrume de animais e dejetos;
- ❑ **Resíduos industriais:** efluentes do processo agroalimentar ou de outras indústrias;
- ❑ **Lamas:** Lamas de depuração de estações de tratamento de esgoto;
- ❑ **Lixo doméstico:** Lixo proveniente de aterros, após remoção de componentes minerais e plásticos.

A digestão anaeróbica é uma tecnologia processada em equipamentos de ambiente controlado, denominados biodigestores, cuja função é fornecer condições propícias para que um grupo distinto de bactérias degrade o material orgânico, com consequente liberação do gás. É o processo mais utilizado para conversão da carga orgânica dos dejetos em biogás e biofertilizante de alta qualidade, o qual atua como substrato digerido. Em relação a produção de biofertilizante, pode-se afirmar que se trata de material isento de agentes causadores de doenças e pragas para a lavoura, pois é inodora, não atraindo insetos e roedores. A constituição do biofertilizante resultante é composta por potássio, fosfato, nitrato, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, ferro, molibdênio e zinco, atuando, desta forma, como agente de melhores condições físicas e químicas do solo, além de contribuir para a atividade microbiana, podendo ser aplicado na forma líquida ou desidratada, dependendo da infraestrutura local. A produção de biofertilizante a partir do efluente disponível apresenta muitos benefícios, promovendo a economia de insumos, minimizando o impacto ambiental e apresentando bom desempenho (CERVI, 2009).

A partir do domínio do processo, foi criado o biodigestor, para facilitar e acelerar a fermentação da matéria orgânica e o Biogás. Funciona com mistura de água e esterco animal e também fibras vegetais, como capim, cascas, etc.

Existem alguns tipos de biodigestores, sendo os mais comuns o indiano, o chinês e o canadense:

- ❑ **Biodigestor Chinês:** De volume constante, é contruído em alvenaria, modelo de peça única. Pode ser enterrado para ocupar menos espaço. O custo é mais baixo em relação aos outros, pois a cúpula é feita em alvenaria;
- ❑ **Biodigestor Indiano:** De pressão constante, que é sempre enterrado, a cúpula é móvel, geralmente feita de ferro ou fibra. Tem a forma de poço com a função de um tanque digestor e possui uma campânula flutuante para o fornecimento do biogás

a uma pressão constante. Movimenta-se para baixo ou para cima, de acordo com a produção do biogás. Neste tipo de biodigestor o processo de fermentação ocorre mais rápido, pois aproveita a temperatura do solo, que é pouco variável, favorecendo a ação das bactérias. Como não são objetos de estudo deste trabalho, não é realizado aqui um aprofundamento da descrição dos mesmos, apenas citações;

- ❑ **Biodigestor Canadense:** Objeto deste trabalho, que também pode ser entendido como uma lagoa anaeróbica coberta, é um modelo tipo horizontal, apresentando uma largura maior que a profundidade, possuindo assim uma maior área de exposição ao sol, o que possibilita grande produção de biogás, evitando o entupimento. Durante a produção de gás, a cúpula do biodigestor infla porque é feita de material plástico maleável (PVC), podendo ser retirada. O maior empecilho deste modelo, é o alto custo da cúpula (KUNZ A.;HIGARASHIM, 1995).

1.3.1 Geração Qualificada através de sistema Biogás

Os motores de combustão podem ser classificados como do tipo de combustão externa, no qual o fluido de trabalho está completamente separado da mistura ar-combustível e o calor dos produtos da combustão são transferidos através das paredes da caldeira, e do tipo de combustão interna, no qual o fluido de trabalho consiste nos produtos da combustão da mistura ar-combustível propriamente (TAYLOR, 1971). Segundo Andrade et al (1975), os motores de combustão interna são máquinas que transformam a energia calorífica do combustível em energia mecânica diretamente utilizável. São chamados de combustão interna porque a mistura ar-combustível é queimada internamente em um cilindro.

Além disso, os Motores de ignição por centelha (ICE) são motores que admitem, para o interior do cilindro, uma mistura de ar e combustível e o início do processo de combustão se dá por uma centelha elétrica, através da vela de ignição. Geralmente, esses motores usam como combustível gasolina, álcool, gases derivados do petróleo, gasogênio, biogás, etc. Motores com carburação são motores nos quais o combustível é combinado com o ar antes de fechar a válvula de admissão (TAYLOR, 1971). Motores com carburadores são motores com carburação em que o combustível é combinado com o ar por meio do carburador. A maioria dos motores de ignição por centelha também são motores desse tipo (TAYLOR, 1971).

A eficiência de transformação da energia mecânica em energia elétrica é de 90%, segundo (MITZLAFF, 1988) e, dependendo das necessidades utilização, o gerador e sistema de controle podem ser de dois tipos:

- ❑ **Geração independente da rede elétrica:** Um gerador síncrono, cuja rotação é proporcional à frequência da rede a qual está conectado, será escolhido, e a frequência controlada pela rotação do motor. Para este tipo de instalação, serão necessários

dispositivos para manter a rotação constante, independentemente da carga do motor. Nesta situação, a potência do motor dependerá da carga requerida a cada instante de operação e, recomenda-se, caso a carga requerida diminua significativamente durante certo período, o desligamento do motor, para não operar em baixas temperaturas (MITZLAFF, 1988);

- ❑ **Geração ligada à rede elétrica:** pode-se utilizar um gerador assíncrono cuja rotação não trabalha em sincronia com a frequência. Neste sistema, a frequência será sempre controlada pela frequência da rede, a potência de saída do motor relativamente constante e os períodos de parada do motor dependerão do tipo de contrato com a concessionária de energia elétrica. Para devolução de energia, a concessionária de energia elétrica deve estar atenta à quantidade de gás gerado e sua composição, pois a variação no funcionamento do motor pode causar oscilação na quantidade e qualidade de energia elétrica devolvida.

1.3.2 Geração Energia Através da Energia Fotovoltaica

A energia fotovoltaica consiste numa das mais recentes formas de geração de energia elétrica, permitindo a geração distribuída e no ponto de consumo. Os sistemas fotovoltaicos de geração oferecem vantagens: podem não possuir partes rotativas, os painéis solares têm um vida útil superior a 30 anos, baixa manutenção, não gera poluição ou ruído, não requer combustível, exceto o sol (KUNZ A.;HIGARASHIM, 1995). A energia solar fotovoltaica é obtida da conversão direta da luz em eletricidade, denominada de efeito fotovoltaico e é realizado pelos dispositivos fotovoltaicos (FV). Tal efeito foi relatado pelo físico Edmon Becquerel, em 1839, como sendo o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz, ou seja, no momento da interação da radiação solar como o material semicondutor, ocorre a liberação e movimentação de elétrons por este material, gerando-se assim essa diferença de pontecial (CRESESB,2004).Os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do brasil ($1533-2171 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$) são superiores aos da maioria dos países da União Européia, como Alemanha ($900-1250 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$), França ($900-1650 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$) e Espanha ($1200-1850 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$), locais onde a localização de sistemas fotovoltaicos são amplamente disseminados e contam com incentivos governamentais (KUNZ A.;HIGARASHIM, 1995).

1.3.3 Sistema Isolado

Para armazenar a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos em sistemas isolados se faz necessário o uso de um banco de baterias, para que, posteriormente, a energia seja distribuída para os pontos de consumo. Esse tipo de tecnologia é utilizado no Brasil em algumas comunidades onde a rede elétrica é de difícil acesso (RUTHER, 2004). No país, a

legalização para sistemas FV isolados é regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), através da Resolução Normativa nº 493, 05 de junho de 2012, que define "Microsistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica - MIGDI ou Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente - SIGFI". Em sistemas isolados é necessário um controlador de carga para abastecer o banco de baterias, que tem como principal função controlar a carga enviada para a bateria melhorando sua vida útil.

A Figura 1.1 mostra um esquema de uma residência com sistema FV isolado puro:

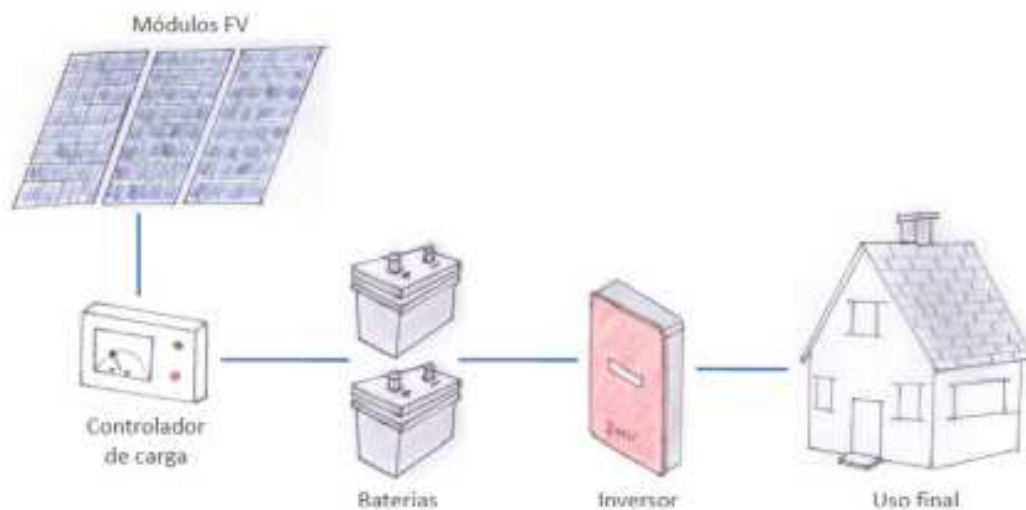


Figura 1.1: Sistema desconectado da rede, sistema off-grid. (Fonte: Avaliação de Desempenho de Geradores Solares Fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil, 2015)

O sistema FV isolado também pode ser utilizado numa configuração híbrida, juntamente com um gerador complementar, que pode ser um motor a diesel, um gerador eólico ou qualquer outro que utilize um tipo de fonte de energia auxiliar.

1.3.4 Sistema Conectado

Os SFVCR (sistemas fotovoltaicos conectados à rede) costumam não utilizar armazenamento de energia, pois a rede elétrica pública é utilizada como sistema de armazenamento. Os equipamentos principais que compõem um SFVCR são os painéis fotovoltaicos e inversores que têm a função de sincronizar os módulos com a rede. A Figura 1.2 mostra o esquema de uma residência com SFVCR.

Tanto os sistemas centralizados, quanto os distribuídos, por estarem ligados à rede, não necessitam de banco de bateria e são constituídos basicamente de painel fotovoltaico e inversor, além de componentes de comando e proteção, como chaves, fusíveis e disjuntores. Nos sistemas fotovoltaicos distribuídos as perdas por transmissão e distribuição são minimizadas e a geração e consumo de energia têm coincidência espacial, o que o

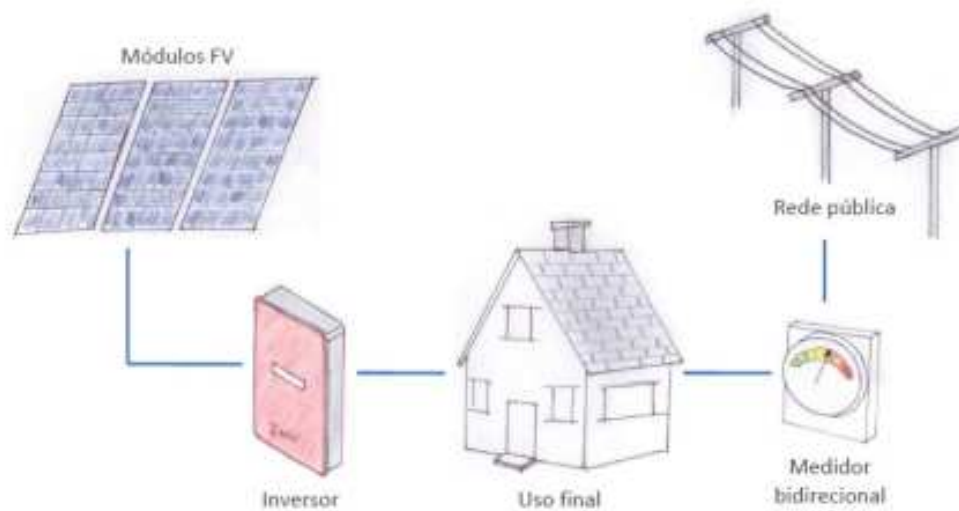


Figura 1.2: Sistema Conectado à Rede, sistema on-grid.(Fonte:Avaliação de Desempenho de Geradores Solares Fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil, 2015)

torna mais eficientes do ponto de vista energético. Além disso, por estarem integrados à edificação não necessitam de área extra para sua instalação, e ainda, dependendo do perfil de consumo, pode haver uma coincidência temporal com a geração solar (RUTHER, 2004).

O sistema de distribuição da concessionária elétrica pode ser aliviado com instalações solares fotovoltaicas integrada a prédios comerciais e interligadas à rede elétrica pública, pois em geral os picos de consumo e insolação máxima são muitas vezes coincidentes. Consequentemente há economia de energia, aumento de vida útil dos transformadores e de outros componentes do sistema de distribuição, além da redução no risco de apagões (RUTHER, 2004).

1.4 Estrutura do Trabalho

O Trabalho é dividido em 7 capítulos, de modo que:

- ❑ **Capítulo 1:** Introdução, onde serão apresentados os aspectos gerais sobre o tema e sobre o trabalho;
- ❑ **Capítulo 2:** Estado da arte;
- ❑ **Capítulo 3:** Software: Homer Pro;
- ❑ **Capítulo 4:** Modelagem da geração distribuída isolada;

- ❑ **Capítulo 5:** Metodologia da Geração Distribuída Isolada com Biogás e Fotovoltaica;
- ❑ **Capítulo 6:** Resultados e discussões;
- ❑ **Capítulo 7:** Conclusão;

Estado da Arte

Nesse capítulo será discutido sobre os sistemas híbridos de energia, demonstrando vários tipos de eletricidade que o mesmo pode utilizar, para isso, é necessário um sistema de controle principal para o controle das diferentes fontes de energia. Um sistema híbrido típico combina duas ou mais fontes, a partir de tecnologias de energia renovável, como painéis fotovoltaicos, eólicos ou pequenas turbinas hidráulicas; e de tecnologias convencionais, geralmente geradores a diesel ou GLP(gás liquefeito de petróleo) (embora os grupos geradores alimentados com biomassa também sejam uma opção viável, se disponível localmente). Além disso, inclui eletrônica de potência e baterias de armazenamento de eletricidade. O sistema híbrido pode ser projetado em diferentes configurações para usar efetivamente fontes de energia renováveis disponíveis localmente e para servir aparelhos de energia (que requerem eletricidade DC ou AC)(NILOY C. S.; SHUVAJYOTI, 2010). Isso resulta em uma grande redução no consumo de combustível em comparação com o sistema que é alimentado apenas por um conjunto motor-gerador(JOSE A. M.; ROSSI, 2015).

Portanto neste capítulo, também, será demonstrado os avanços de pesquisas em automação e controle do sistema de energia híbrido, fazendo, com que, o sistema torne-se cada vez mais popular para o mundo, incentivando os pesquisadores a usar diferentes tipos de fontes renováveis para reduzir a demanda por fontes não renováveis. Por conseguinte, ao reduzir as emissões e avançar em direção à descarbonização da energia são dois objetivos fundamentais para proteger o planeta. Para tal, a combinação das energias renováveis mais competitivas, como a eólica, a fotovoltaica e a hidráulica, em instalações híbridas que podem ser complementadas ou não com sistemas de armazenamento se consolida como um ferramenta bem-sucedida para fornecer energia limpa e eficiente.

2.1 Introdução

Com a evolução da topologia de sistema fotovoltaicos e biogás, nos últimos anos tivemos diversos avanços tecnológicos sendo implementados em projetos isolados, com esses avanços houve um melhoramento na distribuição de energia, ficando mais descentralizado e com isso ajudando no desenvolvimento da solução em diversos países.

2.2 Sistema Híbrido de Geração

Os sistemas híbridos geralmente são utilizados para atendimento de consumidores residenciais que estão em região afastada ou isolada da rede elétrica convencional, tendo como função gerar e distribuir eletricidade, dependendo da disponibilidade dos recursos, de forma otimizada e com custos mínimos.(LEONI, 2016)

Em 2010, três pesquisadores brasileiros publicaram um estudo sobre um projeto piloto de geração híbrida através de energia solar e células de combustível para uma área de preservação ambiental em Tocantins. O projeto piloto usa a energia solar como fonte primária de produção de energia elétrica, na qual a energia excedente é armazenada em hidrogênio proveniente da eletrólise da água. Posteriormente, ocorre a transformação em eletricidade pelas células de combustível em períodos de escassez solar(SILVA, 2010). Neste estudo os pesquisadores também utilizaram o software HOMER PRO para as análises econômicas.

Outro estudo empregando o HOMER PRO foi uma modelagem e análise de custos de um sistema híbrido de energia para ilha de St. Martin, em Bangladesh, em 2013, o qual concluiu, através de otimização do HOMER, que devido ao aumento do custo do diesel e a diminuição do uso de fontes não renováveis de geração, a melhor solução para ilha foi um sistema composto por fonte solar, baterias, eólica e diesel (MAHMUD N.; HASSAN, 2006). Um projeto recente, 2017, foi proposto para dois casos: um sistema híbrido de energia para uma comunidade costeira e outra rural na África. Na região costeira, Mbandana, o sistema é composto por fonte solar e eólica e na comunidade rural, Dikgomo, um sistema com fonte biomassa e solar. Ambos foram otimizados no HOMER PRO. Uma das conclusões relevantes desse projeto foi quantificar o potencial de geração híbrida em duas regiões distintas da África Subsaariana, a qual grande parte da população não tem acesso à energia elétrica (LAMBANI N. E.; BUQUE, 2013).

No ano de 1986 foi instalado o primeiro sistema híbrido no Brasil, composto por fonte eólica e diesel, na ilha Fernando de Noronha. Entre 2014 e 2015 foram inauguradas duas usinas solares nessa ilha, e, segundo Leoni (2016), evita-se o consumo de aproximadamente 400 mil litros de diesel por ano. Também em 2014, em Tacaratu (Pernambuco), deu-se início a operação de uma usina híbrida eólico-solar, produzindo cerca de 17 GWh por ano, podendo suprir a demanda de aproximadamente 90 mil casas. Outra usina eólica-solar

estão em operação desde 2016 em Caetité, na Bahia. Possui 19.200 módulos fotovoltaicos e oito aerogeradores, com capacidade de geração de 12 MW sendo possível atender 130 mil pessoas. Estes são alguns empreendimentos brasileiros para ilustrar que os sistemas híbridos fazem parte do cenário elétrico anual.

2.3 Especificação do sistema híbrido

Os sistemas elétricos baseados no hibridismo da geração renovável e não renovável, com a acumulação de energia feita em baterias, representam hoje uma alternativa madura para o suprimento de energia, devido especialmente a:

- ❑ Avanços na conversão elétrica de energia através do desenvolvimento da eletrônica de potência;
- ❑ Desenvolvimento de programas computacionais para simulação e análise de sistemas híbridos (Hybrid 2, HOMER, VIPOR etc.);
- ❑ Contínuo aumento da eficiência e robustez dos equipamentos geradores (principalmente dos módulos fotovoltaicos e aerogeradores);
- ❑ Desenvolvimento de sistemas de controle automático mais confiáveis;
- ❑ Desenvolvimento da tecnologia de baterias chumbo-ácido livres de manutenção para sistemas eletrificação com fontes renováveis;

2.3.1 Sistema fotovoltaico

O Sol é uma fonte de energia limpa e praticamente inesgotável, com um potencial extremamente vasto para sua exploração na geração de energia, tanto térmica como elétrica. A geração de energia elétrica através do efeito fotovoltaico apresenta características específicas, que são discutidas nas seções subsequentes.

2.3.2 Radiação Solar

O Sol é a fonte de energia que controla a circulação da atmosfera. O sol emite energia em forma de radiação eletromagnética, da qual uma parte é interceptada pelo sistema Terra-atmosfera e convertida em outras formas de energia, por exemplo, calor e energia-cinética da circulação atmosférica. É importante notar que a energia pode ser convertida, mas não criada ou destruída. É a lei da conservação da energia. A energia solar não é distribuída igualmente sobre a terra. Esta distribuição desigual é responsável pela correntes oceânicas e pelo ventos que, transportando calor dos trópicos para os pólos, procuram atingir um balanço de energia (PARANA, 2014).

2.3.3 Radiação Solar: Captação e Conversão

O nosso planeta, em seu movimento anual em torno do Sol, descreve em trajetória elíptica um plano que é inclinado de aproximadamente $23,5^\circ$ com relação ao plano equatorial. Esta inclinação é responsável pela variação da elevação do Sol no horizonte em relação à mesma hora, ao longo dos dias, dando origem às estações do ano e dificultando os cálculos da posição do Sol para determinada data, como pode ser visto na figura.

A posição angular do Sol, ao meio dia solar, em relação ao plano do Equador (Norte positivo) é chamada de Declinação Solar (d). Este ângulo, que pode ser visto na Figura 2.1.1, varia, de acordo com o dia do ano, dentro dos seguintes limites:

O ângulo varia entre $d > 23,45^\circ$ e $d < 23,45^\circ$. A soma da declinação com a latitude local determina a trajetória do movimento aparente do Sol para um determinado dia em um dada localidade na Terra.

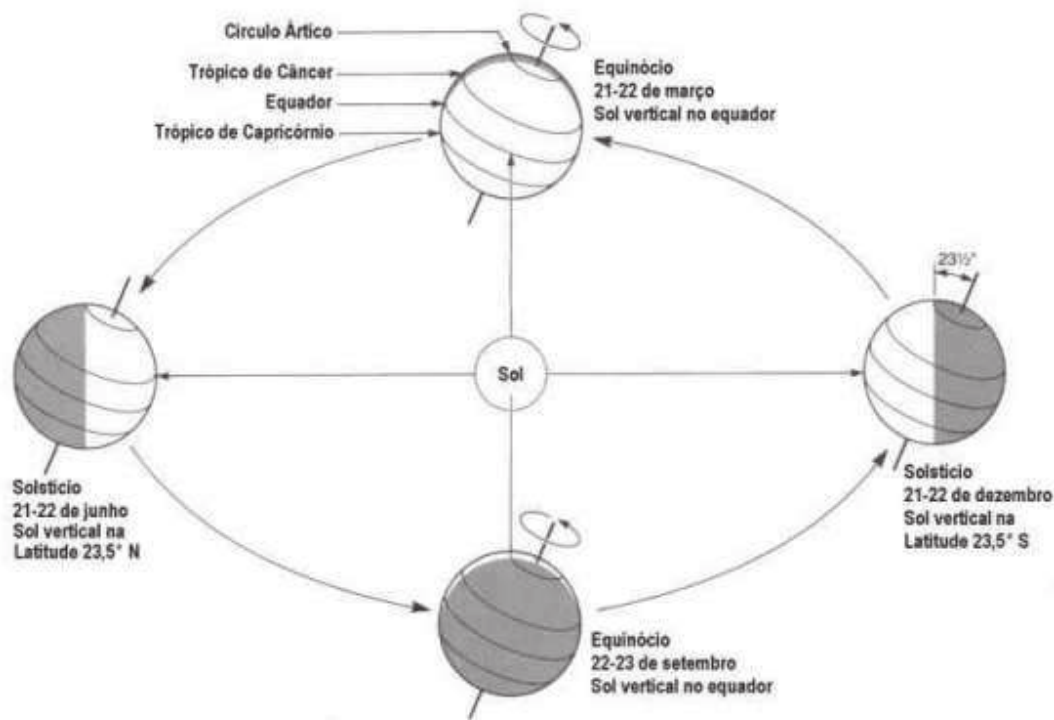


Figura 2.1: Órbita da terra em torno do sol, com seu eixo N-S. (Fonte: fisica.ufpr.br/)

A radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre provém da região da fotosfera solar que é uma camada tênue com aproximadamente 300 km de espessura e temperatura superficial da ordem de 5800 K. Porém, esta radiação não se apresenta como um modelo de regularidade, pois há a influência das camadas externas do Sol (cromosfera e coroa), com pontos quentes e frios, erupções cromosféricas, etc.

Apesar disto, pode-se definir um valor médio para o nível de radiação solar incidente normalmente sobre uma superfície situada no topo da atmosfera. Dados recentes da WMO (*World Meteorological Organization*) indicam um valor médio de 1367 W/m^2 para

radiação extraterrestre. Fórmulas matemáticas permitem o cálculo, a partir da "Constante Solar", da radiação extraterrestre ao longo do ano, fazendo a correção pela órbita elíptica. A radiação solar é radiação eletromagnética que se propaga a uma velocidade de 300.000 km/s , podendo-se observar aspectos ondulatórios e corpusculares. Em termos de comprimentos de onda, a radiação solar ocupa a faixa espectral de $0,1 \text{ mm}$ a 5 mm , tendo uma máxima densidade espectral em $0,5 \text{ mm}$, que é a luz verde. É através da teoria ondulatória, que são definidas para os diversos meios materiais, as propriedades na faixa solar de absorção e reflexão e, faixa de $0,75$ a 100 mm , correspondente ao infra-vermelho, as propriedades de absorção, reflexão e emissão (CRESESB, 2014).

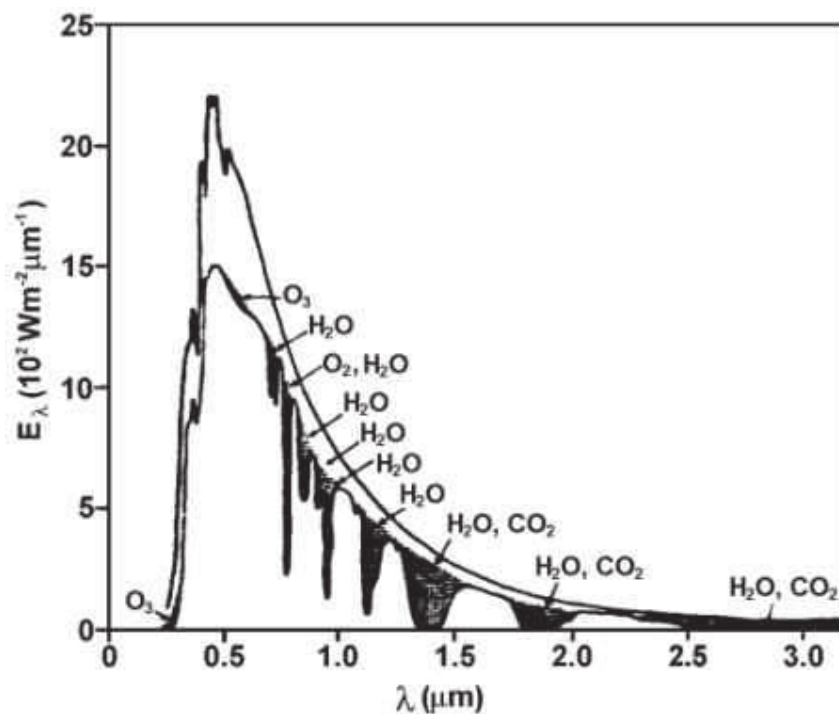


Figura 2.2: Distribuição espectral da radiação solar. (Fonte: fisica.ufpr.br)

A energia solar incidente no meio material pode ser refletida, transmitida e absorvida. A parcela absorvida dá origem, conforme o meio material, aos processos de fotoconversão e termoconversão.

2.3.4 Radiação Solar a Nível do Solo

De toda a radiação solar que chega às camadas superiores da atmosfera, apenas um fração atinge a superfície terrestre, devido à reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera. Esta fração atinge o solo é constituída por um componente direta (ou feixe) e por uma componente difusa. Notadamente, se a superfície receptora estiver inclinada com relação à horizontal, haverá uma terceira componente refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos, etc.). O coeficiente de reflexão destas superfícies é denominado de "albedo". Antes de atingir o solo, as características da

radiação solar (intensidade, distribuição espectral e angular) são afetadas por interações com a atmosfera devido aos efeitos de absorção e espalhamento. Estas modificações são dependentes da espessura da camada atmosféricas, também identificada por coeficiente denominado "Massa de Ar"(AM), e, portanto, do ângulo Zenital do Sol, da distância Terra-Sol e das condições atmosféricas e meterológicas. Devido à alternância de dias e noites, das estações do ano e períodos de passagem de nuvens e chuvosos, o recurso energético solar apresenta grande variabilidade, induzindo, conforme o caso, à seleção de um sistema apropriado de estocagem para a energia resultante do processo de conversão. Observa-se que somente a componente direta da radiação solar pode ser submetida a um proceso de concentração dos raios através de espelhos parabólicos, lentes etc. Consegue-se através da concentração, uma redução substancial da superfície absorvedora solar e um aumento considerável de sua temperatura(CRESESB, 2014).

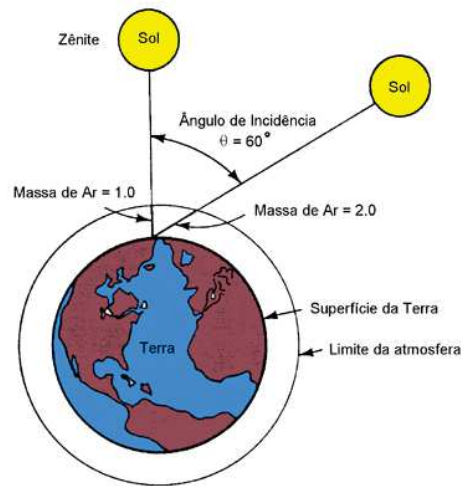


Figura 2.3: Trajetória dos raios de Sol na atmosfera e definição do coeficiente de "Massa de Ar"(AM).(Fonte: CRESESB,2004)

2.3.5 Efeito Fotovoltaico

A conversão fototovoltaica baseia-se no princípio do efeito fotovoltaico, descoberto pelo cientista francês Edmond Becquerel, em 1839. Através de seus experimentos, Becquerel observou que a radiação luminosa poderia ser convertida em energia elétrica, mediante a incidência de luz em um eletrodo mergulhado numa solução eletrolítica. Diversos avanços foram obtidos com o passar do tempo, principalmente os relacionados ao material utilizado na conversão. Finalmente, em 1954, teve início a era que culminaria na utilização de sistemas fotovoltaicos em escala comercial. Naquele ano, Daryl Chapin, Calvin Fuller e Gerald Pearson, do Bell Laboratories, desenvolveram o primeiro protótipo de célula fotovoltaica, produzida com silício, capaz de converter luz em eletricidade suficiente para alimentar equipamentos elétricos. Surgia, então, a primeira célula fotovoltaica, com

eficiência de 6%. O efeito fotovoltaico é definido como a conversão direta de luz em eletricidade. Os seus fundamentos baseiam-se na teoria do diodo de junção pn, e os elementos que constituem o dispositivo conversor são chamados de fotoelementos.

As células solares são as responsáveis pelo funcionamento de um sistema fotovoltaico, pois é nelas que se dá o efeito fotovoltaico, através do qual a radiação solar é convertida diretamente em energia elétrica. Neste processo, são utilizados materiais semicondutores como o silício, o arseneto de gálio, telureto de cádmio ou disseleneto de cobre e índio, ao qual são adicionados dopantes com o objetivo de se criar um meio adequado ao estabelecimento do efeito fotovoltaico.

Por serem sólidos e terem uma boa estrutura atômica cristalina de condutividade elétrica intermediária, os materiais semicondutores são os mais adequados para este tipo de uso. Cerca de 95% de todas as células solares do mundo são de silício, elemento bastante abundante na Terra, mas que não existe como um elemento químico puro, e sim como uma ligação química em forma de dióxido de silício, encontrado na areia de sílica, por exemplo.

Como o material utilizado nas células solares deve ter a maior pureza possível, é necessário separar o oxigênio não desejado do dióxido de silício. Dessa forma, a areia de sílica é aquecida e fundida junto com pó de carvão, criando-se assim o silício metalúrgico, com uma pureza de 98%. Entretanto, 2% de impurezas no silício para aplicações eletrônicas ainda é uma porcentagem muito expressiva, fazendo com que seja necessário purificar o silício em estado bruto através de vários processos químicos. Assim, é obtido o silício de alta qualidade, que poderá ser processado de diferentes modos, para a produção de células monocristalinas ou policristalinas.

Uma das características dos materiais semicondutores é a existência de uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons, e uma banda de condução totalmente vazia. Quando os quatro elétrons de ligação dos átomos de silício se ligam aos seus vizinhos é formada uma rede cristalina. No entanto, quando são adicionados átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e conseqüentemente, devido à baixa energia térmica, este elétron se livra e vai para a banda de condução. Devido a esse fenômeno, o fósforo é considerado um dopante de elétrons conhecido como dopante n ou impureza n. A seção transversal de uma célula fotovoltaica é ilustrada na Figura 2.4 (CRESESB, 2014).

Caso sejam introduzidos átomos com apenas três elétrons de ligação, como é o caso de boro, haverá uma falta de elétrons para completar as ligações com os átomos de silício da rede. Este fenômeno é conhecido como buraco ou lacuna, e devido à pouca energia térmica, um elétron de sítio vizinho pode passar a esta posição, deslocando o buraco. Desse modo, o boro é um aceitador de elétrons ou dopante p.

Desse modo, denomina-se junção pn quando átomos de boro são introduzidos em uma

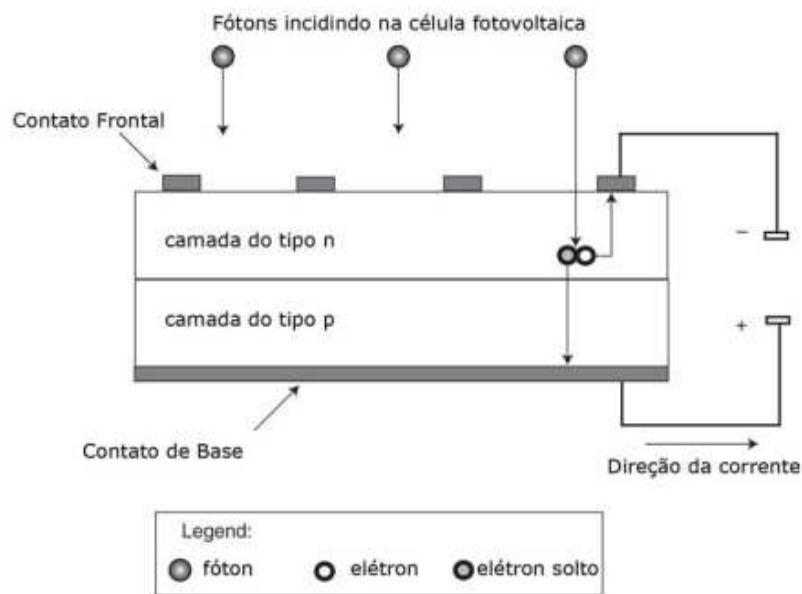


Figura 2.4: Efeito fotovoltaico na junção pn.(Fonte: CRESESB,2004)

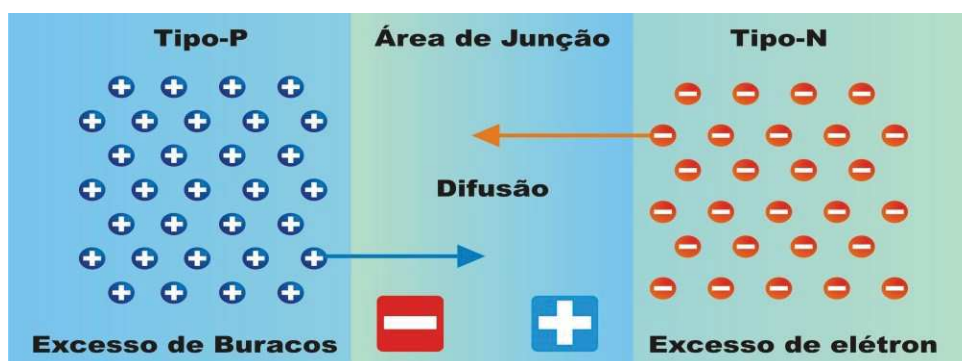


Figura 2.5: Efeito fotovoltaico na junção pn.(Fonte:bluesol.com.br)

metade e fósforo na outra, fazendo com que os elétrons livres do lado n passem ao lado p onde encontram os buracos que os capturam. Consequentemente, é gerado um acúmulo de elétrons no lado p, tornando-o negativamente carregado, e uma redução de elétrons do lado n, tornando-o eletricamente positivo. Assim, é criado um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado n para o lado p.

Durante a formação da junção P-N há a formação também de uma barreira de potencial, e de uma região de depleção. Considere um instante em que seja formada a junção, neste instante surgem duas correntes: a corrente de difusão (gerada pela tendência dos portadores de cada material se distribuírem) e a corrente de derivação (devido ao campo elétrico). Inicialmente surge uma corrente de difusão maior que a corrente de derivação através da junção. Esta corrente diminui com o tempo, até que se anula igualando-se à corrente de derivação. Durante este processo a barreira de potencial e a região de depleção vão se formando, até que seja atingido o equilíbrio(NORTE, 2012).

2.3.6 Módulos Fotovoltaicos

A maioria dos materiais utilizados na conversão fotovoltaico são cristalinos, caracterizando-se por terem uma estrutura de átomos que se repete. Atualmente, o silício é o material mais utilizado na produção de células fotovoltaicas, podendo ser encontrado nas formas de monocristalina, multicristalina ou policristalina e amorfa.

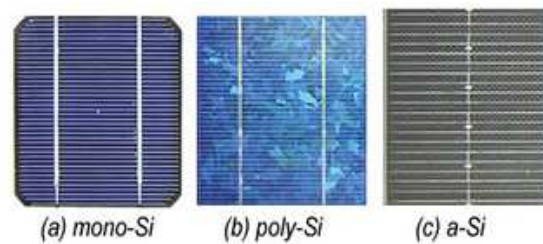


Figura 2.6: Modelos de células fotovoltaicas.(Fonte: CRESESB,2004)

- ❑ Células de Silício Monocristalino: representando pela modelo (a) mono-Si da Figura 2.6,são atualmente as mais utilizadas comercialmente. O silício é o segundo material mais abundante na crosta terrestre e células fabricadas com esse material não apresentam problemas ambientais causados pela combinação por seus elementos constituintes, além de apresentarem elevada vida útil. As células de silício monocristalino são desenvolvidas a partir de um único cristal. Comercialmente, a eficiência dessas células já atinge valores próximos a 16 %. As desvantagens estão relacionadas com o alto custo de produção, devido ao processo construtivo, e ao alto consumo de energia nos processos de fabricação.
- ❑ Células de Silício Poli ou Multicristalino: representando pela modelo (b) poly-Si da Figura 2.6, são constituídas de diversos cristais em contato entre si, dispostos de maneira não alinhada. Esse procedimento visa reduzir custos de fabricação, embora haja uma pequena perda de eficiência. Os avanços tecnológicos vêm reduzindo bastante as diferenças de custo e eficiência entre as células mono e policristalinas, sendo essas diferenças atualmente pouco perceptíveis.
- ❑ Células de Silício Amorfo: representando pela modelo (c) a-Si da Figura 2.6,não apresentam qualquer ordenamento na estrutura dos átomos. Seus custos de material são reduzidos se comparados às células anteriores, porém apresentam eficiência também reduzida, com o máximo valor comercial atingindo 100% (CRESESB, 2014).

2.3.7 Sistema Biogás

O biogás é um subproduto do processo de tratamento de esgoto doméstico. Esse subproduto é gerado em decomposição da matéria orgânica que compõem o esgoto ou o

Iodo. O metano, principal constituinte do biogás, é um composto inflamável, inodoro, incolor, com densidade menor que aquela atribuída ao ar e com alto poder calorífico. Em condições normais de temperatura e pressão, a massa específica do metano é $0,717 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ e seu poder calorífico inferior é $35,9 \text{ (Mj/Nm}^3\text{)}$. Dessa maneira, o teor de metano define a quantidade de energia que pode ser extraída do biogás.

A conversão energética do biogás em energia elétrica ocorre a partir da conversão da energia química contida nas moléculas do biogás em energia mecânica por meio da combustão. Essa energia mecânica é, então, convertida em energia elétrica com a utilização de um gerador. (COELHO S. T.; VELAZQUEZ, 2006) Para a geração de energia elétrica a partir do biogás, são três principais tecnologias disponíveis comercialmente: turbinas a gás, motores de combustão interna e microturbinas. Os motores de combustão interna (MCI) acoplados a geradores de eletricidade são a tecnologia mais utilizada na geração de energia elétrica, tendo o biogás como combustível primário. Para isso, é explicado a seguir as etapas do projeto para implantação de um motor de combustão do tipo biogás e seus complementos.

2.3.8 Características do Biodigestores

De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento - PNUD e o Ministério do Meio Ambiente - MMA (2010), biodigestor é uma câmara fechada que fornece condições adequadas para a fermentação da matéria orgânica realizada por bactérias metanogênicas. Essas bactérias do metano, na ausência de oxigênio, realizam a fermentação alcalina da matéria orgânica putrescível, com a produção de gás metano. O biodigestor é alimentado por biomassa, matéria orgânica animal ou vegetal, podendo também ser recuperada a partir dos resíduos florestais, agropecuários e urbanos, e utilizada como fertilizante dos solos para agricultura ou para produção de energia primária.

A condição básica para a classificação dos processos anaeróbicos é a temperatura, uma vez que os processos metanogênicos dependem do calor. Embora a maior parte do processo de fermentação seja operado na faixa de temperatura mesofílica (30°C a 35°C) há um crescente interesse na fermentação termofílica (acima de 50°C) sozinha ou antes da fermentação mesofílica. (METCALF E EDDY, 1991) Há ainda a fermentação psicofílica que ocorre a temperaturas inferiores a 25°C . Maiores temperaturas aceleram o processo de degradação, porém encarecem o projeto pela a necessidade de aquecimento adicional do reator. (CIDADES, 2015)

Biodigestor Canadense É o modelo mais moderno encontrado que opera e pode ser construído de forma simples, porém possui pouco tempo de vida útil. A biomassa abastece uma lagoa construída em ambiente externo, com grande extensão e baixa profundidade de forma que possua maior exposição ao sol para maior produção de biogás. Essa lagoa

possui uma manta flexível de PVC que vai inflando à medida que o biogás é produzido. Existe um tanque que abastece a lagoa com substrato e um tanque que recebe o resíduo da lagoa em forma de biofertilizante (JÚNIOR, 2015). Este modelo é de fácil limpeza, descarga e manutenção. O polímero utilizado é polietileno de alta densidade (PEAD) (EMBRAPA, 2006). A Figura 2.7 apresenta um biodigestor canadense.

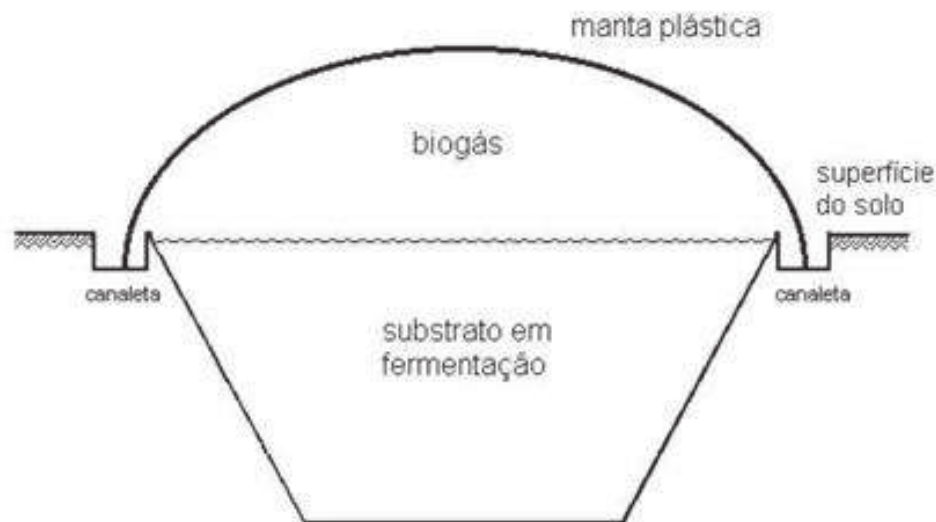


Figura 2.7: Seção transversal do biodigestor tipo canadense. (Fonte: revistaea.org/)

Biodigestor Indiano Este modelo de biodigestor caracteriza-se por possuir uma campânula de metal como gasômetro, a qual estará mergulhada sobre a biomassa em fermentação. Em sua estrutura, há ainda uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras. À medida que o volume de gás produzido não é consumido de imediato, o gasômetro tende a deslocar-se verticalmente e aumenta desta forma o seu volume. Com isso, a pressão interna do biodigestor mantém-se constante. Como o gasômetro está disposto sobre o substrato ou selo d'água, há uma redução na perda durante o processo de produção do biogás (DEGANUTTI et al., 2002). Esses equipamentos apresentam alto custo de construção, devido à necessidade da campânula, e quando feita de aço-carbono ou ferro fundido, entram em corrosão resultando em uma vida útil curta de aproximadamente 5 anos. Por isto devem ser feitas com aço inoxidável, pois a taxa de corrosão é de ordem de 1.000 a 10.000 vezes menor que em aço comum (TEBECHERANI, 2011). Figura 2.8 apresenta um modelo desse tipo de biodigestor.

Biodigestor Chinês Este tipo de biorreator é construído com reservatório abastecedor de substrato, depósito de biofertilizante em alvenaria, tijolos e cimento com campânula reguladora de pressão, preferencialmente feita de aço inoxidável, também chamado de biorreator com campânula fixa. Na China na década de 70, 7,2 milhões de biodigestores instalados produziram o valor energético equivalente a cinco "itaipus" ou 48 milhões de

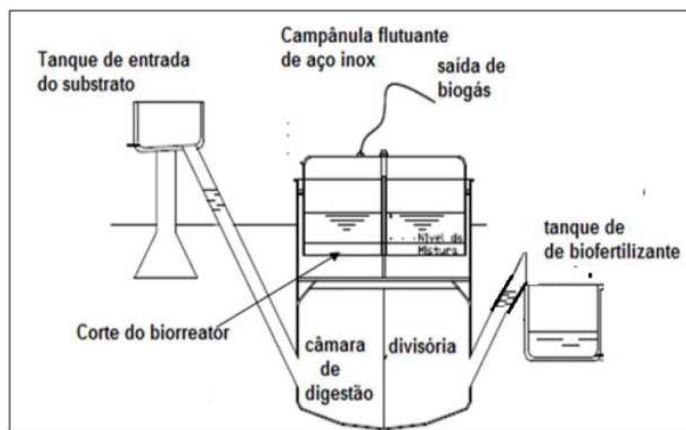


Figura 2.8: Modelo de biodigestor Indiano.(Fonte: ANDRADE et al., 2002)

toneladas de carvão mineral (GASPAR,2003). O modelo chinês tem como base construtiva a mesma estrutura que o indiano, só que possui apenas algumas adaptações básicas. Ele é formado por uma câmara cilíndrica em alvenaria com teto abobado e impermeável, que tem como finalidade o armazenamento do biogás. Seu funcionamento baseia-se no princípio de prensa hidráulica, ou seja, conforme a pressão interna aumenta durante a produção de biogás, os efluentes da caixa de entrada se deslocarão para a caixa de saída, e em sentido contrário quando ocorre a descompressão (isto é, quando não há produção de biogás) (DEGANUTTI et al., 2002). A Figura 2.9 mostra um modelo do biodigestor chinês.

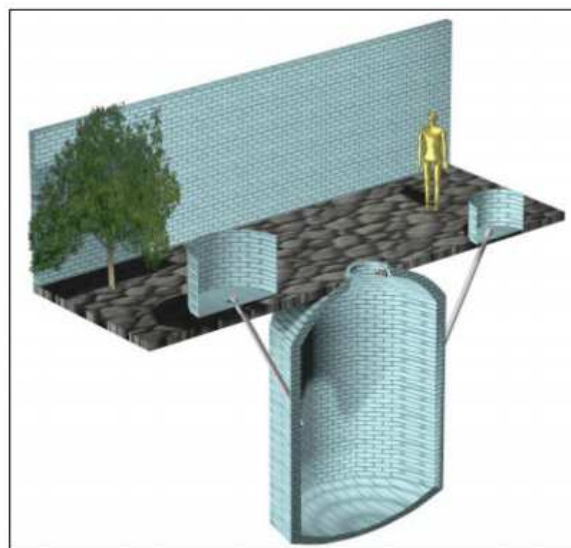


Figura 2.9: Modelo de biodigestor chinês.(Fonte: DEGANUTTI et al, 2002)

Para cálculo preciso das principais dimensões do biodigestor, apresentado nas equações 2.1 à 2.10, usaremos o modelo matemático desenvolvido por Ribeiro(2011), que foi baseado nas sugestões de Ribeiro (2004), que desenvolveu diferentes tipos biodigestores canadenses com fossas trapezoidais que são utilizados por pequenos produtores na América Central.

Para calcular o perímetro do biodigestor segue equação 2.1:

$$P = C = 2r\pi \quad (2.1)$$

Onde:

P Perímetro total(m);

C Circunferência da bolsa(m);

r Raio da bola plástica (m);

Para calcular a porcentagem do perímetro transversal destinado ao arco do biodigestor conforme equação 2.2:

$$A\% = 0,521 \times p^2 - 0,042 \times p + 0,352 \quad (2.2)$$

Onde:

A Porcentagem do perímetro transversal destinado ao arco(%);

C Proporção da fase gasosa desejada ($p \leq 0,4$);

Para calcular a base ou largura menor da fossa do biodigestor conforme equação 2.3:

$$b = \left(\frac{-1}{3} \times A\% + \frac{1}{3} \right) \quad (2.3)$$

Onde:

b base ou largura menor da fossa(m);

Para calcular a lateral da fossa do biodigestor conforme equação 2.4:

$$a = 1,618.b \quad (2.4)$$

Onde:

a Lateral da fossa(m);

Para calcular a lateral da fossa do biodigestor conforme equação 2.5:

$$h = 0,951.b \quad (2.5)$$

Onde:

h Profundidade da fossa(m);

Para calcular a área transversal da fossa do biodigestor conforme equação 2.6:

$$Af = 0,4755.(a + b).b \quad (2.6)$$

Onde:

Af Área transversal da fossa(m^2);

Para calcular a área total transversal da fossa mais área transversal da campana total do biodigestor conforme equação 2.7:

$$At = \frac{Af}{1 - p} \quad (2.7)$$

Onde:

At Área total transversal da fossa mais área transversal da campana(m^2);

p Perímetro total(m);

Para calcular o volume total do biodigestor conforme equação 2.8:

$$Vt = At.L \quad (2.8)$$

Onde:

Vt Volume total do biodigestor (campana mais gás)(m^3);

L Comprimento do biodigestor(m);

Para calcular o volume total da fossa do biodigestor conforme equação 2.9:

$$Vf = Af.L \quad (2.9)$$

Onde:

Vf Volume total da fossa(m^3);

Para calcular o volume total do gás do biodigestor conforme equação 2.10:

$$Vg = Ag.L \quad (2.10)$$

Onde:

Vg Volume total do gás(m^3);

2.3.9 Características do Gerador Biogás

Os motores de combustão interna são muito utilizados por poderem operar com diferentes tipos de combustíveis, tanto líquidos como gasosos. Além disso, são máquinas térmicas nas quais a energia química do combustível se transforma em trabalho mecânico, sendo que o fluido de trabalho consiste dos produtos da combustão da mistura ar-combustível, e a câmara de combustão e o próprio processo de combustão estão integrados ao funcionamento geral do motor. Representam a tecnologia mais difundida dentre as máquinas térmicas, devido à sua simplicidade, robustez e alta relação potência/peso, o que faz com que estes acionadores sejam empregados em larga escala como elementos de propulsão para geração de eletricidade contínua, de back-up ou de carga de pico e para acionamento de bombas, compressores ou qualquer outro tipo de carga estacionária (SALOMON,2007). O biogás é um combustível gasoso com um conteúdo energético elevado semelhante ao gás natural, composto, principalmente, por hidrocarbonetos de cadeia curta e linear. Pode-se utilizar para geração de energia elétrica, térmica ou mecânica em propriedade rural, contribuindo para redução dos custos de produção. No Brasil, os biodigestores rurais vêm sendo utilizados, principalmente, para saneamento rural, tendo como subprodutos o biogás e o biofertilizante(ALMEIDA,2006). Para que o biogás possa ser utilizado como combustível, seja em motores, turbinas a gás ou microturbinas, é necessário identificar sua vazão, composição química e poder calorífico, parâmetros que determinam o real potencial de geração de energia elétrica, além de permitir dimensionar os processos de pré-tratamento do biogás, como a remoção de H_2S (ácido sulfídrico) e da umidade, com o propósito de evitar danos aos equipamentos da instalação e aumentar seu poder calorífico.(COELHO S. T.; VELAZQUEZ, 2006) A utilização do biogás em motores de combustão interna é outra opção viável. Há dois tipos básicos de motores que podem ser executados com o biogás. Os de Ciclo Otto e os de Ciclo Diesel (MARCHAIM,1992).

2.3.10 Motores a Biogás

O biogás, usado como combustível em motores, possui um conteúdo energético muito similar ao gás natural que, atualmente, é muito utilizado nessa aplicação (COELHO S. T.; VELAZQUEZ, 2006). Na indústria brasileira, existem grupos geradores, em que o motor é abastecido a biogás. Porém, todas as características do motor, tais como: curvas de torque, de potência e rendimento são consideradas como se o motor fosse o original, a gasolina (MIHIC, 2004). Os motores de ciclo Otto podem ser facilmente modificados para utilizar biogás, pois esse tipo de motor é projetado para utilizar uma mistura de ar e combustível com ignição por faísca. A principal alteração é no fornecimento de combustível à câmara de combustão, assim, o carburador, do motor que utiliza o combustível líquido, é substituído por uma válvula do tipo borboleta. Essa válvula irá controlar a admissão de biogás na câmara de combustão.

Para uma otimização desse tipo de sistema com biogás, é desejável um aumento na taxa de compressão, o que possibilita um menor consumo de combustível e uma maior potência. De qualquer forma, a transformação de um motor Otto, que utiliza gasolina para biogás, terá como consequência uma produção de energia inferior do que quando operado à gasolina. Isso ocorre porque a eficiência volumétrica, quando se usa biogás, é inferior à da gasolina. Essa redução é devida ao fato de que a gasolina possui um poder calorífico e uma massa específica superiores ao do biogás, assim, em um mesmo volume, a mistura gasolina e ar possui maior energia que a mistura de biogás e ar. Além de todas essas características citadas, o biogás possui uma velocidade de combustão mais lenta que a gasolina e o álcool, devido ao menor limite de inflamabilidade e maior temperatura de ignição mas é possível ajustar o sistema de ignição para trabalhar nessa condição. (MIHIC, 2004)

2.3.11 Motores de ciclo otto operando com biogás

As modificações realizadas em um motor ciclo Otto alimentado por combustível líquido são, relativamente, simples para conversão em alimentação a biogás. A modificação básica é a adaptação de um dispositivo ar-biogás, em substituição ao carburador ou sistema de injeção eletrônica, que tem como finalidade abastecer o motor com biogás no volume e pressão apropriados. Um motor ciclo Otto movido a biogás requer um biogás com, mínimo, 45% de CH_4 . Os motores de ignição por centelha, movidos a gasolina ou os motores diesel convertidos a ciclo Otto podem ser facilmente convertidos para motores a gás. As mesmas técnicas de conversão do motor a gasolina para gás natural são utilizadas para o biogás. O biogás tem um poder calorífico de aproximadamente a metade do gás natural; logo, o sistema de carburação tem que ser dimensionado para que o fluxo de biogás seja o dobro do gás natural para que a mesma potência seja mantida (MACARI N. C., 1987). A principal modificação de um motor a gasolina para biogás é a instalação de um misturador de gás com comburente (ar) no lugar do carburador. O controle do motor é efetuado pelo controle da mistura ar/combustível, por meio de uma válvula de variação de pressão, semelhante à válvula borboleta dos motores a gasolina. Outras modificações incluem a mudança na taxa de compressão e avanço de ignição.

A Figura 2.10 apresenta a composição típica de um motor movido a biogás. A potência e velocidade destes motores são controladas pelo fluxo da mistura ar-biogás ofertadas ao motor, obtido pela variação da posição de uma válvula borboleta, posicionada entre o dispositivo de mistura ar-biogás e a entrada do motor. Qualquer mudança de posição desta válvula, no sentido de estrangular a entrada de ar-biogás para o motor, reduzirá a oferta de combustível, com consequente redução de rendimento.

Diesel dual fuel para operação com biogás O sistema dual fuel é caracterizado por uma mistura ar-biogás, introduzida em condições abaixo da temperatura de autoignição.

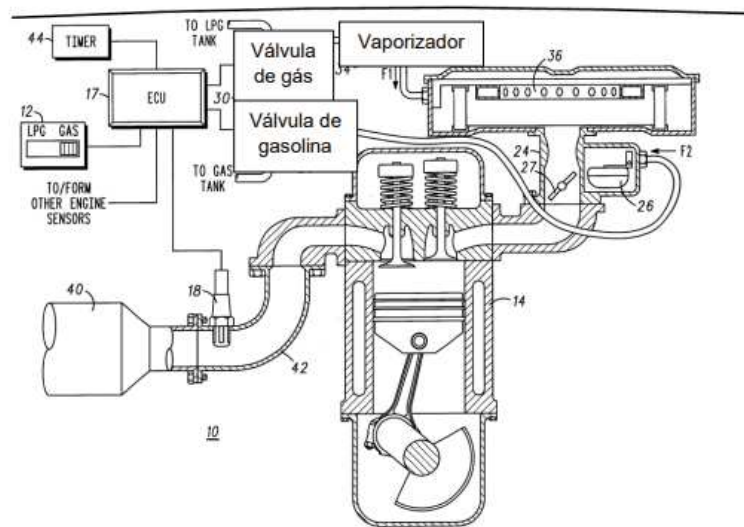


Figura 2.10: Motor ciclo Otto alimentado por biogás (FONTE:adaptado de patente DUAL FUEL method and system(2003))

O sistema original de injeção de combustível é mantido para prover certa quantidade de diesel ao sistema. No entanto, paralelamente, o motor admite e comprime uma mistura de ar-biogás, previamente preparada em um dispositivo externo de homogeneização, conforme demonstrada na Figura 2.11. Este equipamento possibilita a entrada independente de ar e biogás e garante uma mistura estequiométrica compatível para obtenção de combustão. Desta forma, a ignição é iniciada no final do processo de compressão da mistura ar-biogás, pela introdução de um pequeno volume de diesel injetado, o qual provocará um incremento de energia necessária para a combustão da mistura ar-biogás. O volume de diesel necessário para a ignição é de 10% a 20% do volume necessário para a ignição com diesel puro.

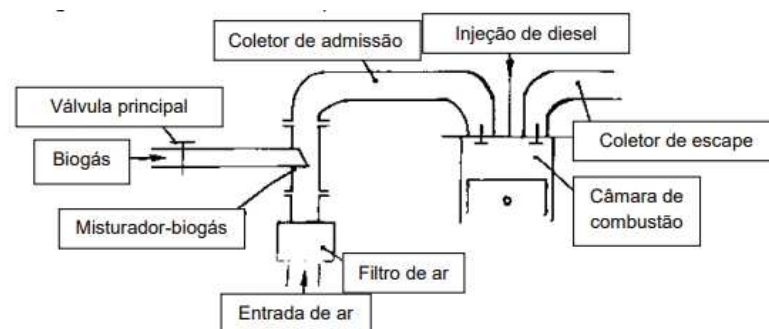


Figura 2.11: Sistema dual fuel aplicado a motores de combustão interna (FONTE>manual biogás)

O funcionamento do motor em cargas parciais requer uma redução no fornecimento de biogás por meio de uma válvula de controle. Esta válvula pode ser operada manualmente ou automaticamente, utilizando sistema de controle eletrônicos ou mecânicos. A redução da oferta de ar diminui a sucção de ar, reduzindo a pressão comprometer a manutenção da

autoignição necessária. Para a manutenção de altas pressões de compressão, os motores dual fuel não devem utilizar válvula borboleta para controle de fluxo de ar. A razão ar-combustível necessária sofrerá variação em função do volume de ar-biogás ofertado. Todos os outros parâmetros, como taxa de compressão e ponto de injeção, permanecem inalterados em motores dual fuel. As modificações aplicadas em um motor ciclo Diesel para operação com o sistema dual fuel apresentam as seguintes vantagens:

- ❑ Operação unicamente com diesel em caso de indisponibilidade de biogás.
- ❑ Qualquer adição de biogás com variação de 0% a 85% pode substituir o volume de diesel necessário para combustão, sem alteração de desempenho.

As limitações do sistema estão associadas aos seguintes fatores:

- ❑ O sistema dual fuel não pode operar sem suprimento de diesel para desencadeamento da ignição.
- ❑ Quando a injeção de diesel decresce a valores menores que 15% pode ocorrer superaquecimento dos jatos injetados. Motores de grande capacidade volumétrica possuem circulação interna de combustível nos bicos injetores para o seu resfriamento.

2.3.12 Motores de Diesel adaptado operando com biogás

Quando necessário, inviabiliza-se a obtenção de altas potências de saída e utilização de motores já desenvolvidas para operação com biogás e pode-se considerar a transformação de motores ciclo Diesel para operação com biogás. Em teoria, um motor de ciclo Otto deveria ser mais eficiente que um motor de ciclo Diesel, devido ao poder calorífico dos combustíveis líquidos utilizados normalmente. No entanto, devido à taxa de compressão inibir a eficiência dos motores ciclo Otto, é mais eficiente, na prática, um motor de ciclo Diesel operando com este combustível.

As principais modificações em motores de ciclo Diesel para viabilização da utilização com biogás consistem em:

- ❑ Remoção dos bicos injetores.
- ❑ Introdução de válvula borboleta para controle do fluxo de ar inserido no motor.
- ❑ redução da taxa de compressão para valores em torno de 13:1.
- ❑ Adaptação de velas de ignição, sistema de ignição e alternador.
- ❑ Adaptação de um dispositivo de controle de pressão antes da introdução de ar no motor.

A transformação de um motor ciclo Diesel em um motor adaptado para operação com biogás é uma conversão complexa, no entanto, parece ser a mais adequada, do ponto de vista técnico e econômico. Os projetos aplicados a motores ciclo Diesel, na maioria, já preveem baixas velocidades de rotação e altas taxas de compressão. Desta forma, o aproveitamento termodinâmico destes motores, operando com biogás, mostra-se mais vantajoso do que motores ciclo Otto que operam com biogás.

2.4 Etapas do processo de digestão

Ao contrário da degradação aeróbica, onde a matéria orgânica carbonácea é usualmente metabolizada diretamente a CO_2 , a degradação anaeróbica envolve quatro etapas distintas, a saber:

- ❑ **Etapa 1 - Hidrólise:** A primeira etapa tem início com a ação das bactérias fermentativas hidrolíticas em um processo chamado hidrólise onde o material orgânico presente em partículas no sistema é convertido em compostos solúveis de menor peso molecular. Posteriormente, tais compostos são hidrolisados a simples monômeros que serão utilizados pelas bactérias fermentativas da próxima etapa (LAMBANI N. E.; BUQUE, 2013). As proteínas são degradadas em peptídeos, os carboidratos em açúcares e os lipídeos, em ácidos graxos de cadeia longa e glicerol (REIS, 2012) ;
- ❑ **Etapa 2 - Acidogênese:** Esta etapa também é chamada de acidogênese. Os produtos solúveis (aminoácidos, açúcares, gorduras) gerados na hidrólise são absorvidos e metabolizados no interior das células das bactérias acidogênicas fermentativas, em substâncias orgânicas mais simples que são posteriormente excretadas. Substratos orgânicos servem tanto quanto doadores quanto aceptores de elétrons. Os principais produtos gerados na fermentação são acetatos (CH_3COOH), hidrogênio (H_2), dióxido de carbono (CO_2) e ácidos graxos voláteis (AGVs) como o propionato e o butirato. Estes últimos, após fermentados também produzem hidrogênio, dióxido de carbono e acetato (METCALF E EDDY, 1991);
- ❑ **Etapa 3 - Acetogênese:** Nesta fase que ocorre a conversão dos produtos gerados na acidogênese em compostos que formam os substratos para a produção de metano. A função dos microorganismos nessa fase é degradar os ácidos graxos e álcoois dando origem ao acetato, H_2 e CO_2 .
- ❑ **Etapa 4 - Metanogênese:** Nesta etapa, o acetato, o hidrogênio e o dióxido de carbono são convertidos em gás metano e dióxido de carbono, através da ação de micro-organismos metanogênicos, que também são classificados como arqueas metanogênicas, responsáveis pela fase limitante do processo;

2.5 Biofertilizante

A degradação da matéria orgânica em um processo de biogás também gera resíduos, mas de boa qualidade que pode ser utilizado como biofertilizante. Os nutrientes minerais disponíveis no material orgânico (substrato) são concentrados no produto final já digerido. Se a digestão é realizada com substratos relativamente limpos, como dejetos, resíduos de alimentos e de material vegetal, o produto final pode ser usado como biofertilizante. Este produto não deve ser confundido com o produto residual, chamado lodo, o qual é obtido por meio da digestão de lodos de estações de tratamento de esgotos.

O lodo digerido, devido ao seu conteúdo de metais e poluentes orgânicos, nem sempre é apropriado para ser disposto em terras agrícolas. A qualidade e o conteúdo nutritivo da digestão são influenciados por vários fatores, incluindo o tipo de substrato, o método de pré-tratamento e as condições do processo (temperatura, tempo de retenção, e etc.), após a digestão e o armazenamento (KARLSSON T.; KONRAD, 2014).

Software: Homer Pro

O software Homer Pro é um modelo computacional proposto pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis americano (*National Renewable Laboratory-NREL*). O programa foi desenvolvido para estimar alternativas de projeto em sistemas com fontes de energia conectadas ou não a rede. O software modela o comportamento físico de um sistema de energia e o seu custo de ciclo de vida, o qual compreende o custo de instalação e operação do sistema ao longo de sua vida útil. Dessa forma, facilita ao usuário comparar diversas opções de projeto baseadas em suas características econômicas e técnicas, da mesma maneira auxilia o projetista a entender e a quantificar os efeitos da incertezas ou de mudanças nos dados de entrada.

3.1 Introdução

O Homer Pro é um programa pago, que projeta a configuração dos componentes de um sistema de geração híbrido da forma mais otimizada e econômica (LAMBANI N. E.; BUQUE, 2013). Para isso, são necessários alguns dados de entrada relacionados aos painéis fotovoltaicos, turbinas dos aerogeradores, rede elétrica da concessionária e perfil de carga. Após a inserção do perfil de carga elétrica da região analisada, o programa solicita um fonte de geração. Quando os painéis fotovoltaicos são selecionados, é preciso colocar alguns parâmetros intrínsecos desta opção: marca do módulo (há uma lista com marcas conhecidas no mercado de energia solar e possibilidade de seleção de um módulo genérico), capacidade do painel (kW), preço unitário e preço de reposição. Em seguida, o programa solicita um inversor CC-CA e os dados inerentes à radiação solar (GHI e DNI) e temperatura. O usuário pode inserir manualmente ou por meio de arquivo, caso já possua estes dados, ou ainda utilizando a latitude e longitude da região estudada, assim o Homer Pro apresenta essas informações pelo banco de dados da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*).

Neste estudo, as informações de DNI foram retiradas do banco de dados disponibilizado

pelo software Radasol , 2019. O software, Homer Pro, desempenha três funções principais: simulações, otimização e análise de sensibilidade. Na etapa de simulação, como o próprio nome já esclarece, o programa irá simular um sistema viável para todas as combinações através de uma filtragem, conforme as especificações do usuário (aumento no número de painéis solares, por exemplo). Já na etapa de otimização, o programa irá propor a melhor arquitetura possível, dimensionando matéria prima para fontes de energia. Por fim, na análise de sensibilidade, que é um opcional, é possível explorar como o sistema se comporta com as variações de velocidade de vento, custo de combustível, entre outros aspectos que estão fora do controle de quem utiliza a ferramenta. Cabe ressaltar que o programa é basicamente um modelo de utilização econômica. Na figura 3.1 é demonstrado o layout do software.

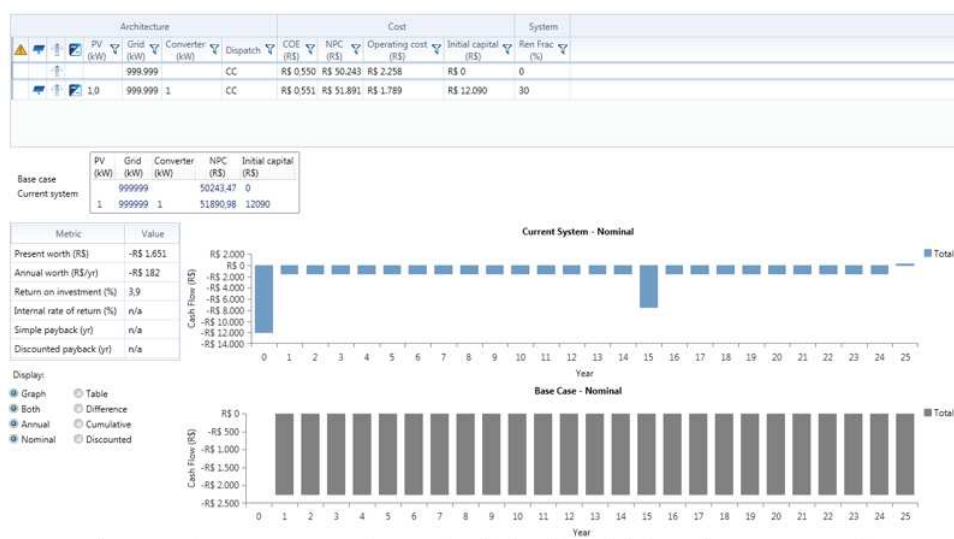


Figura 3.1: Software Homer Pro(Fonte:www.homerenergy.com)

3.2 Uso do Homer Pro

A importância do software Homer Pro destaca-se nas várias entradas de dados, tais como coordenada geográfica, demanda elétrica de entrada e saída, preço do litro de combustível fóssil e biocombustível, custo de investimento, taxa de financiamento, carga de pico, custo de financiamento de placa fotovoltaica, e outros elementos mais específicos (SILVA,2010).

Neste estudo foi utilizado o Sistema Homer Pro, cujas alternativas incorporadas ajudam a responder ao objetivos da pesquisa. Além disso, a energia solar fotovoltaica e Biogás têm resultados, na prática, satisfatórios na região de Monte Alegre de Minas-MG, conforme capítulo a seguir na dissertação.

Com o domínio do estudo dessa tecnologia, se pode contribuir qualitativamente e quantitativamente o problema da pesquisa, uma vez que essa ferramenta pode permitir

construir um banco de dados analítico e teórico sobre a viabilidade técnica e econômica da utilização de um sistema híbrido na geração de energia elétrica em localidades isoladas.

Na Figura 3.2, pode-se observar que foi inserido a demanda da carga do longo do dia, sendo assim, se faz necessário colocar a carga de acordo com as horas do mesmo, desta maneira, o sistema fará a média do dia e do ano, conforme irradiação do meses e temperatura.



Figura 3.2: Dimensionamento da Carga.(Fonte:homerenergy.com)

3.3 Dados de Entrada

Primeiro deve-se definir a carga que o sistema híbrido irá atender, para isso, é necessário selecionar o tipo de carga, como residencial, rural ou comercial, conforme Figura 3.3.

Para o sistema Biogás, os dados de entrada no Software consiste em selecionar primeiramente o tipo de motor gerador Biogás, através da biblioteca do próprio sistema e sua potência conforme Figura 3.4. Por outro lado, para a energia fotovoltaica também é necessário selecionar as placas fotovoltaicas e inversores do sistema para que seja possível a simulação do mesmo. Na figura 3.5 é demonstrado os dados de entrada do sistema fotovoltaico.

Os dados de entrada para o sistema fotovoltaico são, determinar se o painéis fotovoltaico produz energia CA ou CC, lembrando que todas as células fotovoltaicas produzem eletricidade DC, no entanto alguns arranjos fotovoltaicos têm inversores embutidos para

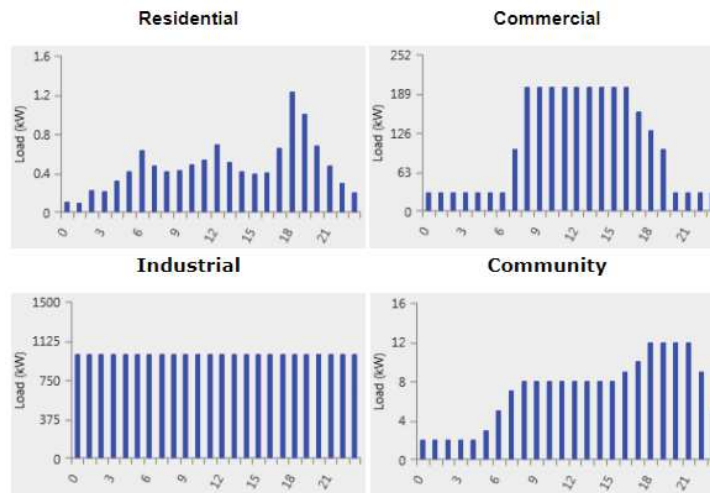


Figura 3.3: Tipo de Carga. (Fonte: homerenergy.com)

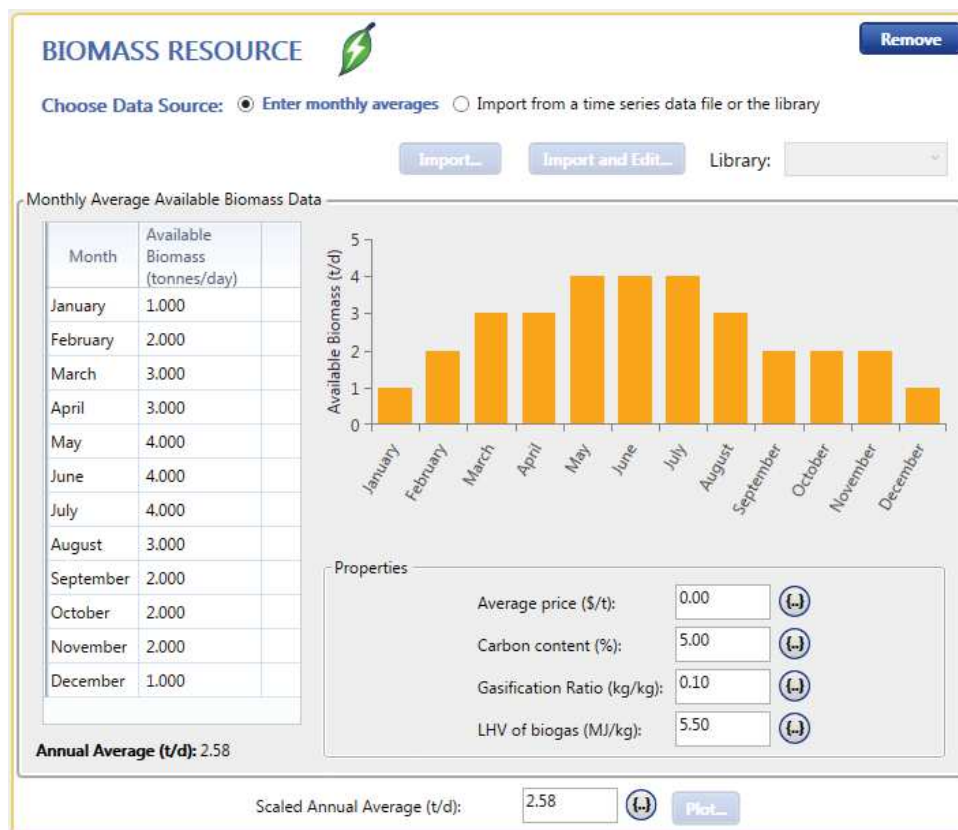


Figura 3.4: Carga de biomassa para Biogás. (Fonte: homerenergy.com)

converter para AC. O número de anos, isso serve para que os painéis fotovoltaicos sejam substituídos ao custo de substituição especificado na tabela de custos. Por fim o fator de durabilidade, em que o fator de escala é aplicado à saída de energia do painel fotovoltaico, para contabilizar a produção reduzida em condições operacionais reais em comparação com as condições operacionais nas quais o painel foi classificado.

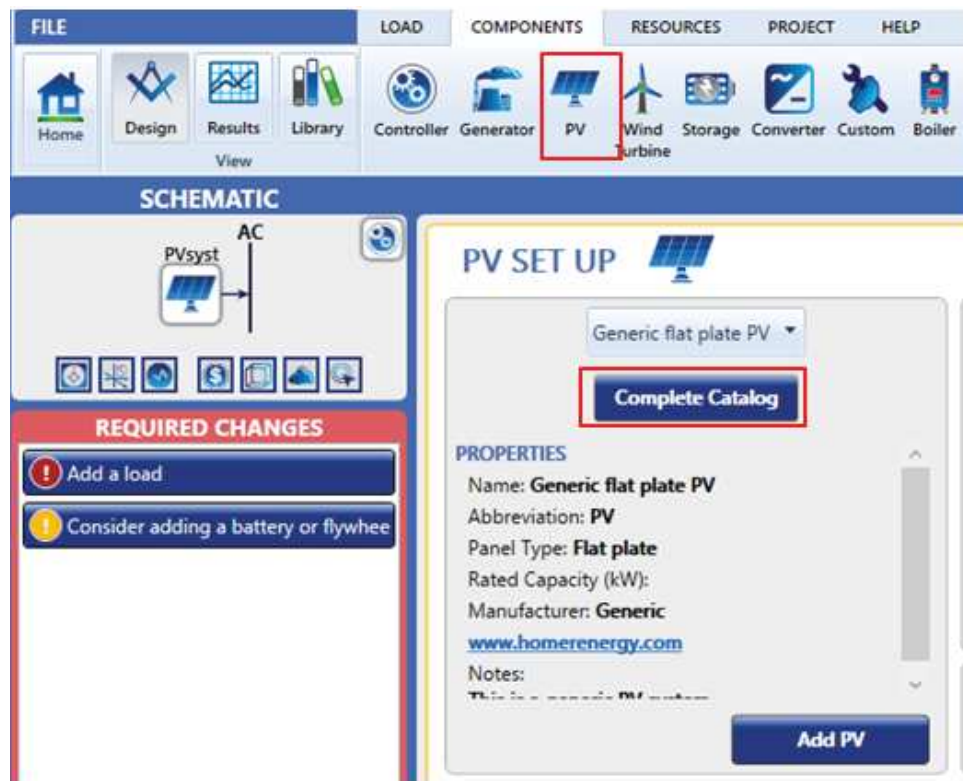


Figura 3.5: Dados de entrada sistema fotovoltaico.(Fonte:homerenergy.com)

3.4 Dados de Saída

Portanto, depois de simulado as diferentes fontes de energia é possível obter os seguintes resultados para sistema fotovoltaico, capacidade nominal do painel fotovoltaico sob condições padrão, em kW, quantidade de energia média do painel fotovoltaico ao longo do ano, em kW e kW/dia, potência média de saída do painel fotovoltaico (em kW) dividida por sua potência nominal em porcentagem (%). Além disso, a produção total de energia do painel fotovoltaico ao longo do ano, em kWh/ano, e, por fim, o número de horas do ano durante as quais a produção do painel fotovoltaico será maior que zero.

Para sistema biogás, os dados de saída são o tempo total de funcionamento do gerador durante o ano, em h/ano, o número de vezes que o gerador foi ligado durante o ano, número de anos que o gerador vai durar antes de exigir a substituição. Além disso, também a potência média de saída do gerador dividido por sua capacidade total, o custo

fixo de funcionamento do gerador, em \$/hr e a quantidade total de combustível, em litro, consumido pelo gerador durante o ano, em L/ano, quantidade média de combustível, em litro, por kWh de energia produzida pelo gerador, em L/kWh. Portanto, esses são os dados de saída da simulação do Software Homer Pro, que irá servir como parâmetro para analisar a geração distribuída isolada em instalações rurais.

3.5 Conclusão

O software utilizado foi de fácil manejo e mostrou-se bastante útil para análise e comparações entre outras tecnologias de geração de energia. O Homer Pro simula a operação de um sistema fazendo cálculos de balanço de energia em cada etapa (intervalo) do ano. Para cada intervalo de tempo, o Software compara a demanda elétrica e térmica nesse intervalo de tempo com a energia que o sistema pode fornecer naquele período e calcula o fluxo de energia de cada componente do sistema. Para sistemas que incluem baterias ou geradores movidos a combustível, o Homer Pro também decide em cada etapa de tempo, como operar os geradores e se carrega ou descarrega as baterias. Portanto, o software Homer Pro mostrou-se eficiente para esse tipo de estudo, demonstrado confiabilidade nos dados gerados da simulação.

Modelagem da Geração Híbrida Isolada e suas Aplicações

No capítulo a seguir foi desenvolvido uma modelagem para o sistema híbrido isolado, para biogás e fotovoltaica. Sendo assim, nesse tópico será discutido o método adotado para dimensionar a matéria orgânica, biodigestores, motores a biogás e sistemas fotovoltaicos. O dimensionamento é importante para evitar desperdícios de material e subdimensionamento de equipamentos e é de suma importância na análise econômica ao avaliar se o investimento é viável ou não.

4.1 Metodologia desenvolvida para biogás e fotovoltaica para sistemas isolados

Os dados empíricos dos experimentos utilizados para a realização deste trabalho, foram coletados nas regiões dos municípios de Monte Alegre de Minas e do Prata, no estado de Minas Gerais. Nestes municípios foram desenvolvidos usinas fotovoltaicas e biogás com intuito de melhorar a qualidade da energia rural nestas regiões, sendo assim, foram simulados equipamentos de última geração, para gerar uma energia de qualidade e eficiente. O sistema híbrido de geração de eletricidade e a seleção de equipamentos, ocorrem de acordo com as fontes geradores de energia, porém, consiste basicamente de biodigestor, necessário para produção de biogás utilizado como combustível, gerador a biogás, gerador a diesel/biodiesel, placas fotovoltaicas, conversor e, opcional, conjunto de baterias (COELHO S. T.; VELAZQUEZ, 2006).

Portanto, para sistema de biodigestão optou-se pelo modelo canadense (biodigestor). Considerou-se para dimensionamento, a produção diária de dejetos de $2,1 \text{ kg/animal.dia}$ em fase de terminação e utilizou-se o tempo de retenção hidráulica (TRH) de 30 dias.

4.2 Dimensionamento e Topologia da Geração Híbrida

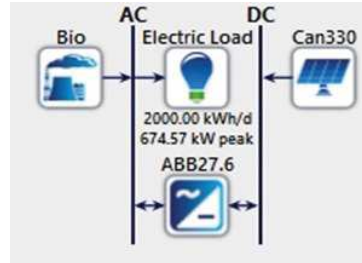


Figura 4.1: Modelo de geração híbrida isolada.(Fonte: Software Homer Pro)

Para determinar a potência do sistema que é necessária para atender a carga de destino, conforme Figura 4.1 que ilustra as fontes de energia, utiliza-se a seguinte equação (4.1).

$$Pl_d = PPl_d + BPl_d \quad (4.1)$$

Onde:

Pl_d é a carga da Demanda (kVA);

PPl_d é a Demanda de potência de pico de carga (kVA);

BPl_d é a Potência da grade respectivamente (kVA);

4.2.1 Consumo Mensal

Faz-se necessário fazer o levantamento de carga em campo para saber o consumo médio mensal ($KWh/mês$) da unidade consumidora.

4.2.2 Dimensionamento do sistema de biogás

A criação de bovinos de leite, isso é, de vacas propensas para ordenha, compreende inicialmente sua aquisição, o que normalmente ocorre através da gestação de alguns animais selecionados da própria propriedade, ou então por meio de fornecedores (COSTA;BATTAGLIA,2014).

Os animais neste tipo de criação podem permanecer em regime de confinamento, semiconfinamento ou livres no pasto. No entanto, mesmo nos casos de semiconfinamento e livre a pasto, por pelo menos algumas horas durante o dia os animais estarão confinados no curral para a realização da ordenha.

As vacas leiteiras tendem a permanecer na propriedade até que sejam produtivas. O peso médio de um bovino de leite atinge entre 550 e 720 kg, a espécie mais utilizada é a

de origem Holandesa (EMBRAPA,2002;AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND ENGINEERS,2003).



Figura 4.2: Confinamento de gado leiteiro.(Fonte: Próprio autor)

A alimentação dos animais é semelhante à dos bovinos de corte, podendo ser composta por alimentos volumosos, energéticos, protéicos, minerais, vitaminas e aditivos (EMBRAPA GADO DE LEITE,2015). Por se tratar de criação de bovino com vistas à produção de leite, exigências devem ser cumpridas, principalmente em relação à higienização do ambiente de ordenha e demais cuidados com relação ao armazenamento do leite, que deve ser mantido no resfriador a 4°C para evitar a proliferação microbiana (COSTA;BATTAGLIA,2014).

Os dejetos produzidos em unidades de bovinos de leite tendem a se concentrarem no curral de ordenha. Conforme Figura 4.2, o sistema de confinamento será do tipo *COMPOSTO BARN*, assim os dejetos estão dispostos de maneira concentrada, é possível encaminhá-los para algum sistema de tratamento.

A metodologia desenvolvida pelo Centro Internacional de Energias Renováveis- CIBiogás-ER (2009) estima a produção de biogás e foi elaborada com base na metodologia e nos parâmetros descritos no IPCC (2006). Ressalta-se que, na metodologia desenvolvida pelo CIBiogás-ER, foram adicionados dados referente ao peso dos animais e a fração diária de confinamento (bovinos), além de fórmulas para calcular a produção de dejetos.

4.2.2.1 Bovinos

Para calcular a quantidade de dejetos produzidos ao longo dos dias e anos, utiliza-se fórmulas para encontrar os valores, sendo assim, precisa-se, primeiro, saber a quantidade de números de animais confinados e as horas de confinamento que é de suma importância para a produção do biogás.

Para cálculo da produção diária e mensal de dejetos de bovinos, é necessário saber o número de animais da categoria, no caso bovino, horas de confinamento e a produção diária específica da categoria, conforme equação 4.2, cujos resultados podem ser verificados na tabela 5.7. Utiliza-se 100 animais confinados em regime de *COMPOST BARN* com

tempo de retenção de 24 horas diária, para obter a produção diária aplicaremos os valores na equação abaixo(EMBRAPA-DID, 1980).

$$PDDDB = \sum (N^{\circ} \times TC \times PE) \quad (4.2)$$

Onde:

$PDDDB$ produção diária de dejetos por bovinos da categoria (m^3/dia^1);

N° número de animais da categoria em questão(*número absoluta*);

TC horas de confinamento por dia(d);

PE produção específica de dejetos de bovino por categoria($m^3/cab.hora$).

Calcula-se o valor de 2,1 (Nm^3/d) por animal, sendo assim, o valor para planta inteira considerando 100 animais confinados será de 210 Nm^3/d . Para cálculo da produção anual de dejetos para bovinos deve-se utilizar a equação 4.3, assim, sabe-se qual e a produção anual de dejetos para o sistema da fazenda.

$$PADB = \sum (PDDDB \times FAC) \quad (4.3)$$

Onde:

$PADB$ produção anual de dejetos por bovinos(m^3/ano);

$PDDDB$ produção diária de dejetos por bovinos da categoria(m^3/dia);

FAC fração anual de confinamento(*adimensional*).

4.2.3 Dimensionamento Biodigestor

Sobre o dimensionamento do biodigestor, primeiro, precisa-se saber o tamanho do biodigestor que será implantado, para isso, precisa-se estimar o tamanho do biodigestor que será construído através do volume necessário para suportar o volume de carga diária, pelo período de retenção necessário para que ocorra a fermentação. Para essa estimativa usa-se a equação 4.4:

$$Vb = Vd \times TRH \quad (4.4)$$

Onde:

Vb volume do biodigestores (m^3);

Vd volume diário de dejetos ($m^3/animal.dia$);

TRH tempo de retenção hidráulica (dia).

O tempo de retenção hidráulico também varia de acordo com a fonte de matéria orgânica. Para bovinos e suínos, esse tempo é de 35 dias, em média, enquanto que para

caprinos tem-se um tempo de 45 dias, e 60 dias para aves. Para o cálculo, é necessário o volume da matéria orgânica do biodigestor, conforme apresentado na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Dados para dimensionamento do Biodigestor.

Materia Prima	Fórmula
Esterco por animal (Kg)	A
Quantidade de animais	B
Total de Esterco (Kg)	$C=A \times B$
Relação esterco/água	D
Volume de agua(m^3) ¹	$E = C \times D$
Volume de carga (m^3)	$F=C + E$

(Fonte:adaptado pelo próprio autor)

O aumento do Tempo de Detenção Hidráulica resulta em elevação da temperatura, além do tempo, para ocorrência das reações da digestão anaeróbica o que ocasiona em um maior ganho líquido de energia, devido a uma maior produção de biogás. Por outro lado, reatores com TDH elevados requerem grande capacidade de armazenamento. Deste modo, se faz importante o estabelecimento do Tempo de Detenção Hidráulica ideal do substrato, levando-se em considerações a produção necessária de biogás que viabilize o projeto e a área disponível para implantação do biodigestor (SASSE, 1988).

4.2.3.1 Especificação Técnica Motor Gerador

O funcionamento dos motores a gás obedece ao princípio dos motores a diesel e a gasolina (SASSE, 1988). Verifica-se atualmente a aplicação dos motores diesel ou a gasolina em equipamentos e veículos que são convertidos para funcionar com gás, o maior exemplo são os veículos automotores transformados de gasolina para GNV (MURARO, 2006).

A transformação para gás constitui-se basicamente em modificações nos sistemas de alimentação e de ignição, bem como taxa de compressão. Os motores a gás, de ignição por centelha, possuem uma eficiência volumétrica menor que o equivalente motor que se utiliza dos combustíveis fósseis, porque quando ocorre a adição de gás reduz-se o volume de ar aspirado. Contudo, essa menor eficiência volumétrica é, geralmente, compensada pelo fato de que os motores a gás conseguem funcionar com taxas de compressão elevadas, entre 12-13:1 (SOUZA, 2012). Isto é possível porque o poder antidetonante do gás está ligado ao número de metano, ou seja, quanto maior a quantidade de metano maior será a resistência à detonação.

Ensaio realizados com motor Honda 270 cm^3 , alimentado com biogás bruto e mantidos o ponto de ignição e a taxa de compressão da gasolina, as curvas de torque e potência

tiveram um decréscimo de 50 em relação ao combustível original (OZ M; MORENO, 2000). Pesquisas mostram que a melhor taxa de compressão é de 13:1, por atender a todas as misturas que compõe o biogás. Motores construídos para essa mistura de gases que compõe o biogás são encontrados no mercado em alguns modelos e características. O modelo B4T-10HBio é um motor com 3600 rpm, 10CV, 4 Tempos, 389 cm³, refrigerado a ar e que pode ser instalado para utilização diretamente com biogás com pressão variável. Essa tecnologia possui filtragem integrada com o motor que permite a instalação direta no reator de geração de biogás (HUANG J.; CROOKES, 1995).

4.2.3.2 Biodigestor Canadense

Nos biodigestores em batelada, a matéria orgânica é inserida toda de uma só vez e então ele é fechado hermeticamente até que ocorra o processo de digestão anaeróbica e a produção de biogás. O biodigestor será aberto novamente só quando a produção de biogás baixar, indicando que a matéria orgânica já foi decomposta e que pode ser feita a retirada da matéria restante, por causa desta interrupção no processo e a alimentação do biodigestor ser descontínua, a produção de biogás não é constante, conforme Figura 4.3.

De maneira simplificada, o biodigestor modelo canadense possui os seguintes componentes (MACEDO, 2013):

1. Caixas de passagem na entrada e saída dos dejetos;
2. Câmara de fermentação;
3. Tubulação de entrada e saída para fluxo do dejetos;
4. Campânula em manta de PVC;
5. Campânula de saída do biogás;
6. Conjunto de bombas centrífugas.

4.2.3.3 Caixa de passagem

Como o fluxo dos biodigestores é contínuo, não há necessidade de construção da caixa de entrada para estoque de dejetos à entrada e à saída do biodigestor. Projetam-se apenas caixas de passagem para inspeção (MACEDO, 2013). Abaixo, é ilustrado na Figura 4.4 o tipo de caixa de passagem e fluxo de material orgânico para fermentação e geração do biogás.



Figura 4.3: Biodigestor.(Fonte: Próprio autor)



Figura 4.4: Caixa de passagem biodigestor.(Fonte:Próprio Autor)

4.2.3.4 Câmara de fermentação

A câmara de fermentação pode ou não ter revestimento em alvenaria (protege e ajuda na colocação da manta). O volume do digestor pode ser determinado através do TDH (tempo que o efluente deve permanecer no reator para se atingir a degradação esperada) (MAHMUD N.; HASSAN, 2006).

A equação 4.5 apresenta o TDH, que pode ser determinado como o inversor da Carga Hidráulica Volumétrica (AMBIENTAL, 2007). O TDH é igual a 35 dias com gado confinado e o valor da vazão (Q) é igual a $3,26 \text{ m}^3/\text{dia}$ com uma variação de 10% para suportar alguma variação da carga, assim, sabe-se calcular o valor do volume do reator:

$$V = \frac{TDH}{Q} \quad (4.5)$$

$$V = \frac{35}{3.26} \quad (4.6)$$

$$V = 10.7361 \text{ m}^3 \quad (4.7)$$

Onde:

TDH Tempo de detenção hidráulico (*dias*);

V volume útil do reator(m^3);

Q vazão(m^3/d);

A escavação é realizada conforme os cálculos do dimensionamento abaixo. Não é necessário revestimento em alvenaria, mas pode-se utilizar a perfeita colocação e manutenção da manta. As medidas de escavação para alguns volumes de biodigestor estão dipostas na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Dimensionamento do biodigestor de acordo com o volume.

Volume	Profundidade	Comprimento maior C1 (m)	Largura maior L1 (m)	Comprimento menor C2(m)	Largura menor L2 (m)
3	1,0	3,5	1,2	3,0	0,7
7	1,0	6,0	2,0	4,8	0,8
15	1,4	7,0	2,5	5,5	1,0
20	1,5	8,0	3,0	6,0	1,0
30	1,5	10,0	3,5	8,0	1,5
100	2,0	15,0	5,0	13,0	3,0
200	2,5	19,0	6,0	16,0	4,0
300	3,0	21,0	7,0	18,0	5,0

(Fonte:adaptado pelo próprio autor)

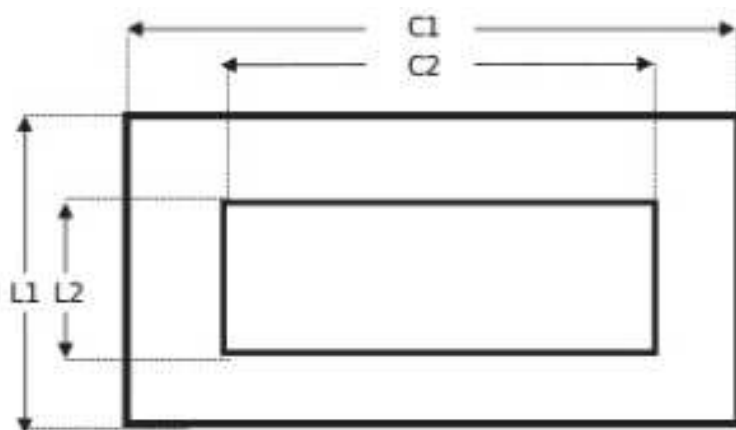


Figura 4.5: Planta de topo de escavação e dimensionamento da manta.(Fonte:manual de treinamento biogás WINROCK)

A Figura 4.5 ilustra às dimensões da largura e comprimento do biodigestor, tanto maior valor em termos de comprimento, quanto em largura.

4.2.3.5 Tubulações

Devem ser previstas tubulações e conexões para os seguintes usos do projeto:

1. Abastecimento e drenagem de Iodo;
2. Sistema de armazenamento, transporte e distribuição do efluente digerido;
3. Sistema de transporte e conversão do biogás.

4.2.3.6 Bombas Centrífugas

O fluxo de dejetos pode ser gerado através de descargas por gravidade, quando o biodigestor é projetado em uma cota inferior ao sistema de produção de bovinos, ou através de bombas de recalque. As bombas de recalque são dimensionadas comparando-se a altura manométrica do sistema com a altura manométrica que a bomba poderá recalcar (EMBRAPA,2004).

4.2.3.7 Campânula de manta

A manta de PVC que cobre o biodigestor deve ter volume suficiente para armazenar o gás produzido sem que este exerça pressão na manta. A área da manta varia com o volume do biodigestor e a quantidade de biogás que ele poderá produzir (OLIVER, 2008).

A figura 4.6 foi feita com base em uma curva de tendência criada com os valores de uma tabela para a área utilizada de manta plástica.

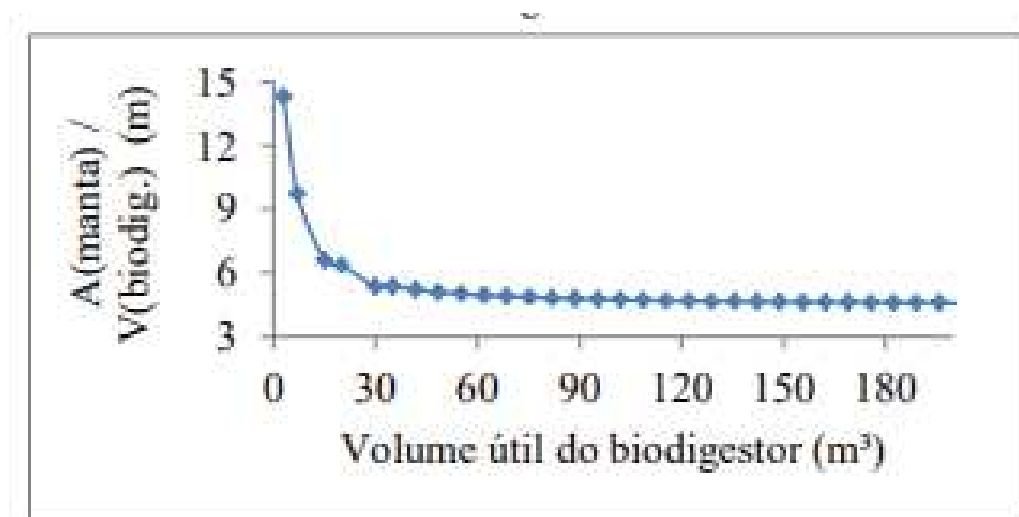


Figura 4.6: Dimensionamento da área da manta a ser utilizada por volume de biodigestor. (Fonte: Próprio Autor)

A figura 4.7 demonstra a planta do biogás em todas etapas do processo, primeiro é feito a captação dos dejetos na área de confinamento *compost barn*, depois é levado através

do fluxo e pela força da gravidade até o separador de líquido e sólido, depois da separação a parte líquida é concentrada em uma lagoa de fermentação para que possa gerar o gás metano para geração de energia elétrica e a parte sólida é utilizada na adubação.



Figura 4.7: Planta do biogás contemplando todas as etapas. (fonte: <https://wamgroup.com.br>)

4.2.3.8 Separador de Sólidos e Líquidos

Na Suécia, cerca de 200.000 toneladas de fertilizantes são produzidas por ano, das quais cerca de 90% são destinadas para uso agrícola. Em comparação com o adubo químico, o uso de biofertilizantes é relativamente novo e por isso ainda existe a necessidade de desenvolvimento de tecnologias e pesquisas. É evidente que o biofertilizante proporciona rendimentos nas plantações na mesma magnitude que o adubo químico. O iodo tem teor de sólidos entre 2% e 7% , ou seja, é similar ao teor de sólidos entre a parte líquida e a parte sólida, concentram-se na parte líquida os nutrientes, e na parte sólida a matéria orgânica. A tabela 5.7 faz referência ao número de dejetos por animal, levando em consideração que utilizamos 100 animais para produção desse material orgânico.

Biofertilizantes líquidos contêm cerca de 7,2% de sólidos, que é aproximadamente igual ao teor de sólidos em suspensão. Com o biofertilizante disposto em solo agrícola durante a semeadura, podem-se obter plantações com cerca de 20 cm de altura. Uma das vantagens do bom crescimento das plantações pode ser explicada pelo fato de o solo ter a competência de transportar os nutrientes no período em que os vegetais possuem as maiores necessidades nutricionais. Os agricultores que utilizam o biofertilizante acreditam que ele melhora o efeito do nitrogênio contido no dejetos líquido e também melhora as propriedades em termos de odor, patógenos e dispersão.

A máquina de separação de sólidos-líquidos é baseada na tecnologia de rosca transportadora. Realizando a separação tanto por gravidade quanto por compressão mecânica, isto é, o estrume do animal, bovino, é espremido até a total absorção da parte líquida, assim, a máquina é destinada para separar a fase líquida da fase sólida de uma ampla gama de materiais, como processamento de frutas e vegetais, lama, esgoto, e, no geral, mistura de sólidos/líquido residuais em que a porcentagem de líquido dentro dos sólidos

pode diferir consideravelmente (KARLSSON T.; KONRAD, 2014), separador de líquidos e sólidos representado na Figura 4.8.



Figura 4.8: Separador de Sólidos e Líquidos (Fonte: próprio autor)

Com isso, uma dos benefícios do uso desse tipo de equipamento e a cesta de tela de alto desempenho resistente ao desgaste, redução de custo significativo do gerenciamento geral da separação de sólidos/líquidos de digestão anaeróbica, tempo de manutenção e montagem significativamente reduzido e peça sobressalentes acessíveis.

4.2.3.9 Tratamento de Dejetos

As principais técnicas de tratamento de dejetos costumam combinar processos físicos e biológicos, de acordo com Diesel, Miranda e Perdomo (2002). No tratamento físico, o dejetos passa por um ou mais processos físicos, quando ocorre a separação das partes sólidas e líquidas. A separação das partes pode ser efetuada por processo de decantação, centrifugação, peneiramento e/ou prensagem. A desidratação da parte líquida pode ser feita por meio do vento, ar forçado ou ar aquecido. Uma das vantagens do tratamento físico é que a separação entre as partes sólidas e líquidas pode minimizar os custos do tratamento.

A separação de fases consiste em separar as partículas maiores contida nos dejetos da fração líquida e conduzir a obtenção de dois produtos:

- ❑ Fração Líquida: uma fração líquida mais fluída, mas conservando a mesma concentração em elementos fertilizantes solúveis, que os dejetos brutos;
- ❑ Fração Sólida: uma fração sólida, com umidade próxima a 70% mantendo-se agregada e podendo evoluir para um composto.

Na separação de partículas maiores que 10 cm (0,01mm) contidas nos dejetos líquidos pode-se utilizar os seguintes processos: decantação, peneiramento e centrifugação.

4.2.3.10 Produção do Biogás

De acordo com o volume diário de substrato produzido pelos animais da fazenda, e com relação a produção de biogás apresentada na tabela 5.4, podemos calcular a produção diária e mensal de biogás em nosso biodigestor, a fim de verificar-se o potencial de geração de energia apresentado. A tabela 5.7 apresenta o cálculo da produção de biogás da fazenda.

4.2.3.11 Dimensionamento do Gerador Biogás

Para o dimensionamento do motor gerador, deve-se utilizar os parâmetros da tabela 5.6 e tabela 5.7, o poder calorífico do biogás, a eficiência do motor gerador, a disponibilidade diária de biogás junto a cada uma das unidades agroindustriais ($m^3.dia$) e o tempo de utilização da planta de geração. Com o poder calorífico do biogás é possível quantificar a energia elétrica gerada por metro cúbico de biogás. Esta quantificação pode ser obtida por meio da equação 4.8:

$$PTE = PCI \times PB \quad (4.8)$$

Onde:

PTE é o potencial de produção de eletricidade ($kWh.dia$);

PCI é o poder calorífico (kWh/m^3);

PB é a produção anual de biogás ($m^3.dia$).

Para isso pode-se utilizar vários tipos de motores para geração de energia através do biogás.

4.2.3.12 Consumo específico do motor

O consumo específico é definido como a quantidade de combustível medido em gramas que um motor gasta para cada Kw de potência produzida durante uma hora de operação (g.kWh)(PENIDO FILHO,1991), equação 4.9:

$$Pr = \frac{Ec}{T_{pc} \times Nd} \quad (4.9)$$

Onde:

Pr potência requerida (kW);

Ec energia consumida (kWh);

Nd número de dias trabalho ($dias$);

T_{pc} período de ponta de carga ($horas$).

O consumo específico varia em função da rotação do motor e quanto mais baixo for o seu valor absoluto, maior será o rendimento do motor.

Então, como a produção diária de biogás é $(210Nm^3/d)$, para descobrir a autonomia do sistema ao longo das horas do dias utiliza-se a equação 4.10:

$$Aut = \frac{V_{biogas}}{C_{sistema}} \quad (4.10)$$

Onde:

Aut autonomia do sistema de geração de energia elétrica(*em horas*);

$V_{biogás}$ volume de biogás disponível(m^3);

$C_{sistema}$ consumo de biogás pelo sistema($m^3biogás/hora$).

Portanto, com os geradores ligado 8 horas por dia durante 30 dias, a energia elétrica gerada (Es) será dimensionado pela equação 4.11:

$$Es = Nh \times Nd \times Psistema \quad (4.11)$$

Onde:

Es Energia gerada(kWh);

Nh número de horas que o sistema é ligado (*horas*);

Nd número de dias trabalhado, quando o sistema é ligado(*dia/mês*);

$Psistema$ potência instalada do sistema(kW).

Para a determinação do potencial técnico de produção de eletricidade, deve-se levar em consideração a eficiência global de conversão nas máquinas térmicas(conjunto motor gerador, microturbinas a gás, etc.). Dessa forma, para efeitos de uma estimativa mais precisa, o valor a ser adotado é de 25% (SOUZA,2004). O potencial técnico de geração de eletricidade é calculado pela equação 4.12:

$$PTCE = \frac{PTE.n}{100} \quad (4.12)$$

Onde:

$PTCE$ potencial técnico de geração de eletricidade (kWh/dia);

PTE potencial teórico de produção de energia elétrica (kWh/dia);

n eficiência de conversão(*adimensional*).

O cálculo da potência elétrica da planta de geração é obtido por meio da equação 4.13:

$$POT = \frac{PTCE}{HO.cos\phi} \quad (4.13)$$

Onde:

POT potencial elétrica da planta de geração (kVA);

$PTCE$ potencial técnico de geração de eletricidade (kWh/dia);

HO número de horas diárias de operação do motor ($horas$);

$\cos\phi$ fator de potência($adimensional$).

4.2.3.13 Motor ciclo otto

O motor deverá fornecer potência líquida de saída suficiente para acionar continuamente o gerador a 90% (noventa por cento) de plena carga. A plena carga depende da porcentagem de metano no biogás - o mínimo exigido é 40%, velocidade síncrona, sem indícios de sobreaquecimento para as condições climáticas locais, e sua construção deverá efetuar-se em multicilindros, tipo estacionário com alimentação do combustível via aspiração na admissão ou injeção do gás, além de apresentar os seguintes acessórios:

- ☐ filtros de óleo lubrificante;
- ☐ filtro de ar, com elemento seco recambiável;
- ☐ filtro de biogás com limanha de ferro ou equivalente para retirada de H_2S ;
- ☐ bateria e alternador para recarga da mesma ambas de marca nacional e tensão de 12 Vcc de operação;
- ☐ sistema de arrefecimento completo(radiador, hélice, mangueira e etc.);
- ☐ silenciador de escape do tipo hospitalar;
- ☐ o grupo será equipado com um sistema de partida elétrica, dotado de baterias, com capacidade de acionar o conjunto a uma velocidade que permita a partida do motor. Deverá também ter sistema de ignição eletrônica de alta confiabilidade;
- ☐ o regulador automático de velocidade será eletrônico, tipo isócrono com entrada analógica de controle de + ou - 3 V;
- ☐ o sistema de controle de queima do combustível do motor através de sonda lambda para garantir queima adequada e minimizar as emissões de gases poluentes;
- ☐ o motor deverá conter sistema de proteção contra alta temperatura de água e baixa pressão do óleo;
- ☐ o motor deverá operar em regime estacionário de 1800 RPM (rotações por minuto).

4.2.4 Composição de matérias orgânicos nos dejetos

Durante a decomposição da matéria orgânica num processo de biogás são liberados vários tipos de minerais. Nos biofertilizantes, os nutrientes (o nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e magnésio (Mg)) estão no solo e há disponibilidade destes para as plantas de maneira direta, além de conter diferentes tipos de oligoelementos, também essenciais para o crescimento. O valor nutritivo do biofertilizante, ou seja, a concentração de diferentes produtos finais depende do substrato utilizado no processo de biogás e como este será executado. Uma vantagem disso é que nesse biofertilizante há uma grande quantidade de amônio, o qual é absorvido diretamente pelas plantas. A grande quantidade de água contida nos resíduos (93% - 98%) faz com que o transporte se torne caro e, ainda, que haja um risco de compactação do solo.

O biofertilizante deve conter pelo menos 2 Kg/tonelada de nitrogênio de amônio e 3-4 Kg/tonelada de nitrogênio total. O conteúdo de nitrogênio pode ser aumentado com a adição de proteína ao substrato durante a geração de biogás. É importante considerar que grandes quantidades de proteínas podem resultar em problemas relacionados à inibição do amoníaco pelos microrganismos metanogênicos. O teor de nutrientes contido no biofertilizante depende da composição do material que entra no biodigestor. Uma maneira de reduzir o volume de biofertilizantes é a partir da desidratação do lodo, já que resulta em uma fase líquida rica em nitrogênio e uma fase sólida com alto teor de fósforo. Um dos problemas na liberação de água é que podem ocorrer perdas de nitrogênio na forma de amoníaco (até 90%) (KARLSSON T.; KONRAD, 2014).

4.2.4.1 Biofertilizantes

De acordo com (EMBRAPA-DID, 1980), depois passarem no digestor, os resíduos sobranes apresentam alta qualidade para uso como fertilizante agrícola, devido, principalmente, aos seguintes aspectos:

- ❑ diminuição no teor de carbono do material, pois a matéria orgânica ao ser digerida perde exclusivamente carbono na forma de CH_4 e CO_2 ;
- ❑ aumento no teor de nitrogênio e demais nutrientes em consequências da perda de carbono;
- ❑ diminuição na relação C(carbono)/N(nitrogênio) da matéria orgânica, o que melhora as condições do material para fins agrícolas;
- ❑ maior facilidade de imobilização do biofertilizante pelos microrganismos do solo, devido ao material já se encontrar em grau avançado de decomposição o que vem aumentar a eficiência do biofertilizante;
- ❑ solubilização parcial de alguns nutrientes.

De acordo com a Companhia Auxiliar de Empresas Elétricas Brasileiras (CAEEB,1981), o resíduo decorrente da decomposição da matéria orgânica, por processo anaeróbico, apresenta as seguintes vantagens:

- ❑ o conteúdo de matéria orgânica do resíduo resulta em uma capacidade de retenção de umidade pelo solo, evitando demora no crescimento das plantas durante o tempo seco;
- ❑ um melhoramento na estrutura do solo, especialmente em argilas, permitindo maior penetração de ar e, conseqüentemente, um estímulo de oxidação da matéria orgânica pelos organismos do solo;
- ❑ introdução de certos minerais necessários ao crescimento das plantas.

4.2.5 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaica

O dimensionamento do sistema fotovoltaica é importante para evitar desperdícios e o superdimensionamento de um sistema, assim faz com que o projeto produza a real necessidade da unidade consumidora, com isso, o mesmo seja viável economicamente e não traga problemas futuros com manutenção e falhas de sistemas.

4.2.5.1 Irradiação Solar

Foi feito um levantamento dos valores de irradiação solar incidente medida e estimada no plano dos módulos, sendo que, foram realizadas simulações através de software para estimar a produção mensal da usina fotovoltaica. Para isso, um levantamento dos valores da radiação média da região do município de Monte Carmelo-MG é em torno de 5,22 $kWh/m^2.dia$, sendo esses dados retirados do site *SWERA*, Figura 4.9, que faz a verificação da radiação ao longo do território nacional.

4.2.5.2 Dimensionamento dos componentes do sistema

Para dimensionamento do sistema fotovoltaico é necessário utilizar a equação 4.14, que utiliza o nível de irradiação do mapa da Figura 4.9, energia desejada que é a média anual em $kWh/mês$ da unidade consumidora em estudo, constante G_{stc} , que é igual a um e a taxa de desempenho T_d , que é igual a 0,80.

$$P_{fv} = \frac{E \cdot G_{stc}}{H_{tot} \cdot T_d} \quad (4.14)$$

Onde:

E energia desejada ($kWh/mês$);

G_{stc} constante($1kWh/m^2$);

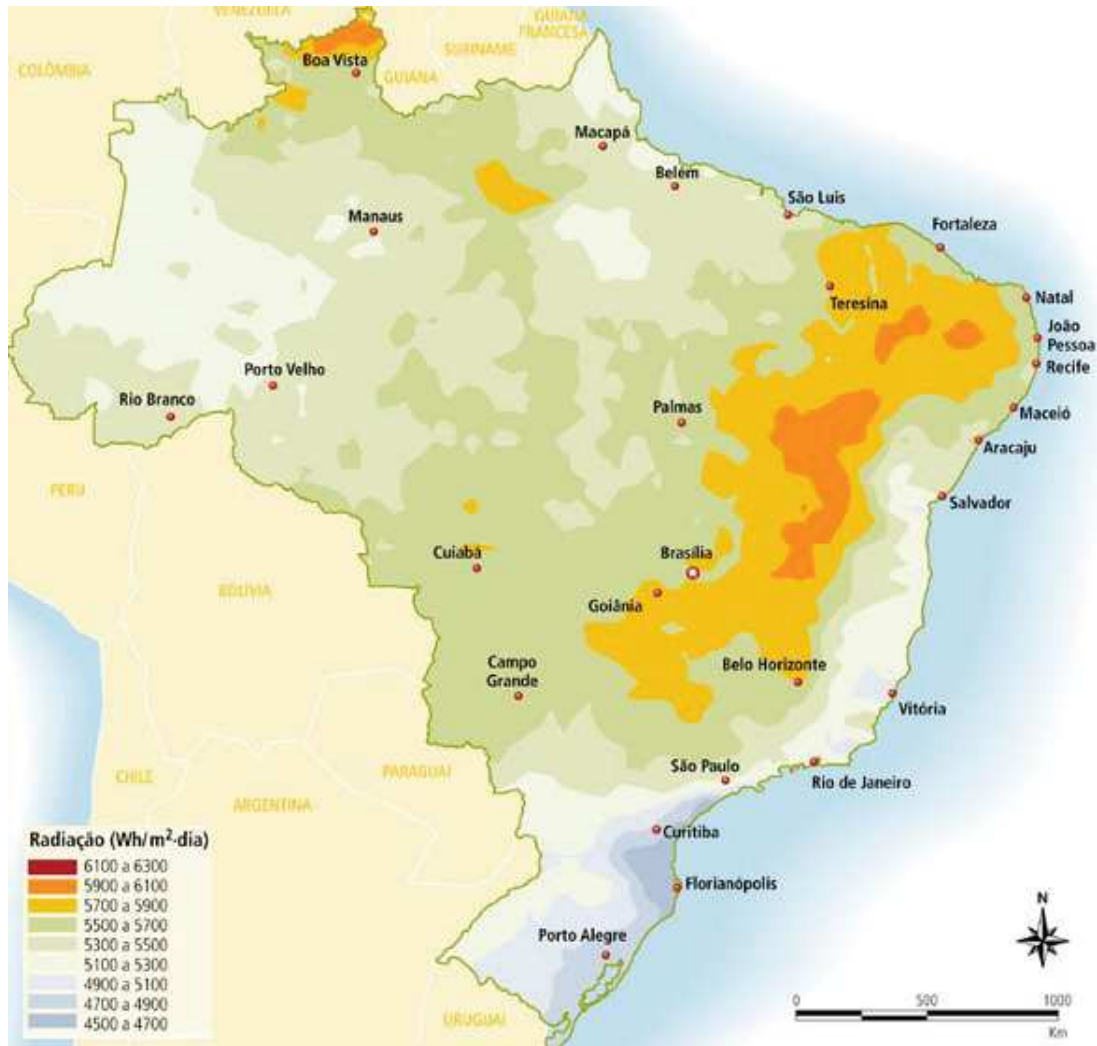


Figura 4.9: Níveis de irradiação no território brasileiro.(fonte:SWERA)

H_{tot} irradiação($kWh/m^2/dia \times 30 dias$);

T_d taxa de desempenho(está entre 0,75 e 0,85).

Para calcular o número dos módulos utiliza-se o cálculo da equação 4.14, assim faz-se a divisão entre potência do sistema fotovoltaico em kWp e a potência do módulos em wp(individual), assim e possível através da equação 4.15 saber a quantidade de módulos necessário para utilizar na unidade consumidora:

$$N_{mod} = \frac{P_{fv}}{P_{mod}} \quad (4.15)$$

Onde:

N_{mod} Número de módulos (n);

P_{fv} Potência do sistema(kWp);

P_{mod} Potência do módulo(Wp).

4.2.6 Custos Associados aos Sistemas Híbridos

Os custos associados a sistema híbridos podem ser divididos em dois grupos, que são os custos de despesa e os custos de receita. Os custos de receita estão normalmente associados ao lucro obtido com a venda de energia gerada, ou a uma eventual economia resultante da redução no consumo de combustível ou de outras taxas. Já os custo de despesa podem ser relacionados ao custos de investimentos inicial, custos de operação e manutenção (OM) e custos de reposição de equipamentos. Os custos de despesa estão assim divididos:

- ❑ Custo de investimento inicial - compreendem custo de projeto, de aquisição e transporte de materiais e equipamentos e de instalação;
- ❑ Custos de OM - compreendem normalmente custos fixos anuais, relacionados ao pagamento de operadores, aos gastos com combustível, com as leituras e envio de faturas, aos procedimentos periódicos de manutenção preventiva e corretiva, dentre outros. Não devem ser confundidos com os custos de reposição, que se dão pela compra de equipamentos específicos para reposição. Frequentemente, considera-se que os custos de OM são proporcionais ao investimento inicial, à potência nominal ou à energia elétrica anualmente gerada. A soma dos valores gastos anualmente é representada pelo conceito de anuidade;
- ❑ Custos de reposição de equipamentos -referem-se às substituições dos componentes principais do sistema, devido ao fim de suas vidas úteis. Pelo fato das vidas úteis possuírem caráter aleatório intrínseco, determina-se, na prática, um tempo de vida útil contábil para cada equipamento, de acordo com médias conhecidas. Assim, se o equipamento durar tempo menor do que o contábil, arca-se com prejuízo. Por outro lado, se tiver boa sobrevida além da vida contábil, aufere-se lucro. A escolha da vida útil contábil depende do risco que o investidor deseja assumir. Certamente, vidas úteis contábeis longas reduzem o custo da energia(ENERGIA, 2008).

4.3 Conclusão

Neste capítulo apresentou o dimensionamento da planta de geração híbrida, para isso, foi preciso saber o nível de radiação da região onde esta situada a Fazenda Sabiá, além do números de animais necessários para atender a demanda do gerador biogás. Outro ponto discutido nesse capítulo foram os tipos de motores para geração de energia elétrica, os inversores e módulos do sistema fotovoltaico, sendo importante a escolha do mesmos para saber a taxa de compressão necessária para que o motor a biogás possa trabalhar da melhor maneira possível, com a máxima eficiência. Por outro lado, os módulos foram selecionados de acordo com a demanda exigida na conta de energia da fazenda. Outro

fator levado em consideração nesse capítulo foram os biofertilizantes e seus benefícios para solo, sendo estes o resultado do processo para geração de energia através do biogás, assim, ao passar pelo processo de separação entre sólido e líquido o mesmo é reutilizado na adubação das terras.

Metodologia da Geração Distribuída Isolada com Biogás e Fotovoltaica

Para o desenvolvimento deste trabalho, realizou-se um estudo de caso nas áreas de tratamento de biogás mais utilizadas atualmente e sua viabilidade de aplicação. A abordagem dos motores de combustão interna sucedeu-se com o objetivo de identificar os tipos de motores, as possíveis modificações necessárias para utilização com este combustível, bem como abordar as vantagens e desvantagens de cada aplicação. Por outro lado, para sistema fotovoltaico também foi analisado e aplicado materiais em meio rural, com isso foi possível coletar dados empiricamente e verificar a sua viabilidade econômica.

5.1 Introdução

Para realizar o estudo de caso, foram necessário as seguintes informações sobre a geração distribuída isolada, potência instalada, coordenadas, orientação e inclinação do módulos FV, acúmulo da matéria orgânica proveniente dos dejetos dos animais confinados e níveis de irradiação (mensal e anual). Com essas informações, foram então calculadas grandezas de desempenhos de cada sistema nas bases anual e mensal. A partir dos resultados obtidos, foram então feitas análises comparativas. Abaixo, a Figura 5.1 representa a Fazenda Sábia, onde foi implantado um sistema fotovoltaica de potência de 72,6 kWp, sendo esse, utilizado como base de cálculo para dimensionamento e simulação da energia solar do estudo de caso.

5.2 Consumo Mensal

Fez-se o levantamento da unidade consumidora ao longo de um ano, assim, através do consumo mensal ($kWh/mês$) foi realizado o estudo de como abastecer a mesma com fontes alternativas de energia em um sistema isolado. Para isso, o estudo foi baseado na



Figura 5.1: Fazenda Sabiá no município de Monte Alegre-MG(Fonte:googlemaps.com)

conta mensal de energia da rede de concessionária CEMIG-D, demonstrativo do histórico de consumo na Figura 5.2, com isso, fazendo a média do consumo mensal será necessário uma geração de 13.793,33 kWh/mês.

Histórico de Consumo			
MÊS/ANO	CONSUMO kWh	MÉDIA kWh/Dia	Dias
MAI/18	21.880	729,33	30
ABR/18	9.400	313,33	30
MAR/18	54.200	1.935,71	28
FEV/18	7.560	236,25	32
JAN/18	8.040	277,24	29
DEZ/17	24.320	838,62	29
NOV/17	6.080	184,24	33
OUT/17	12.760	440,00	29
SET/17	2.000	58,82	34
AGO/17	17.360	560,00	31
JUL/17	14.920	481,29	31
JUN/17	5.280	170,32	31
MAI/17	1.080	38,57	28

Figura 5.2: Consumo da Fazenda Sabiá em Monte Alegre-MG.(Fonte:CEMIG)

5.3 Material Orgânico

Para o cálculo do material orgânico considerou-se a tabela 4.1, assim, levando em conta suas variáveis e a quantidade de animais, tamanho e peso, fez-se necessário dividir em grupos de animais, conforme tabelas 5.1 vacas leiteiras, tabela 5.2 bezerros e tabela 5.3 bois, com isso, e possível saber a quantidade esterco que cada classe irá gerar. Na tabela 5.4, e feito o somatório de todas as classes de animais confinadas, o volume de carga

e o total de esterco que todos os animais confinados irá gerar, lembrando que o tipo de confinamento do estudo de caso e do tipo *Composto Barn*, fazendo com que a produtiva seja elevada, além de possibilitar maior conforto e higiene para o rebanho, contribuindo para a redução de problemas de perna e casco, diminuindo a quantidade de bactérias e aumentando a produção de leite.

Tabela 5.1: Dimensionamento para Vaca Leiteira.

Materia Prima	Vaca Leiteira
Esterco por animal (Kg)	25
Quantidade de animais	100
Total de Esterco (Kg)	2500
Relação esterco:água	1:1
Volume de agua(m^3) ¹	2500
Volume de carga (m^3)	5000

(Fonte:adaptado pelo próprio autor)

Tabela 5.2: Dimensionamento para Bezerro.

Materia Prima	Bezerro
Esterco por animal (Kg)	2
Quantidade de animais	50
Total de Esterco (Kg)	100
Relação esterco:água	1:1
Volume de agua(m^3) ¹	100
Volume de carga (m^3)	200

(Fonte:adaptado pelo próprio autor)

Tabela 5.3: Dimensionamento para Bois.

Matéria Prima	Bois
Esterco por animal (Kg)	15
Quantidade de animais	2
Total de Esterco (Kg)	30
Relação esterco:água	1:1
Volume de agua(m^3) ¹	30
Volume de carga (m^3)	60

(Fonte:adaptado pelo próprio autor)

Tabela 5.4: Dimensionamento Total.

Matéria Prima	Total
Esterco por animal (Kg)	-
Quantidade de animais	152
Total de Esterco (Kg)	2630
Relação esterco:água	-
Volume de água(m^3) ¹	2630
Volume de carga (m^3)	5260

(Fonte:adaptado pelo próprio autor)

5.4 Dimensionamento Biodigestor

Uma das primeiras etapas do projeto consistiu na escolha do Biodigestor. Atráves de estudos chegou-se a conclusão que seria melhor o Biodigestor Canadense, pela facilidade de manutenção e custo. Os valores encontrado para às dimensões do biodigestor estão apresentados na tabela 5.5. Utiliza-se às equações 2.1 à 2.10, capítulo estado da arte, e o programa de Excel como ferramenta de cálculo, calcula-se as dimensões que melhor se encaixam a fim de obter um volume próximo ao encontrado acima. Para início dos cálculos, adota-se os valores para o raio da bolsa plástica (r), a proporção de fase gasosa desejada (p) e o comprimento do biodigestor (L), indicados abaixo:

$$r = 2,00m$$

$$p = 0,40m$$

$$L = 10,00m$$

O raio (r), escolhe-se assim para que não ultrapassasse a altura da fossa, a proporção (p) é selecionada conforme o máximo valor admitido para manter a campana cheia de gás e o comprimento (L) que seleciona-se interativamente, assim, otimiza-se as dimensões do biodigestor. A caixa de entrada dever ter um volume pelo menos igual ao da carga diária, portanto faz-se a caixa com um volume um pouco maior que, igual a $4,00 m^3$. A caixa de saída deve ter um volume igual a três vezes o volume da caixa de entrada, a fim de conseguir conter os possíveis acúmulos de biofertilizantes, então terá $12,00 m^3$.

Ao demarcar a localização de um biodigestor, durante seu dimensionamento, deve-se observar alguns fatores:

- ☐ Facilidade de transporte da biomassa a ser carregada diariamente;
- ☐ Facilidade de remoção e transporte para utilização do biofertilizante produzido;
- ☐ Distância para utilização do biogás.

Tabela 5.5: Equações para cálculo dimensionamento do biodigestor.

Fórmula	Descrição	Valores
p	p=perímetro total	12,57 (m)
A	A%- Porcentagem do perímetro transversal destinado ao arco	43%
b	b - Lateral, base ou largura menor da fossa	2,37(m)
a	a - Lateral maior da fossa	3,83(m)
h	h - Profundidade da fossa	(2,25m)
Af	Af - Área transversal da fossa	(6,98m ²)
At	At - Área total transversal ou área transversal da fossa mais área transversal da campana	11,64 (m ²)
Ag	Ag - Área total transversal da campana ou área transversal destinada para o gás	4,66(m ²)
Vt	Vt - Volume total do biodigestor (campana mais gás)	93,11(m ³)
Vf	Vf - Volume total da fossa	55,87 (m ³)
Vg	Vg - Volume total do gás	37,25(m ³)

(Fonte:adaptado pelo próprio autor)

O biodigestor não pode ficar em um local de difícil acesso, nem muito distante, pois isso implicaria em uma grande dificuldade para operação do mesmo. O sistema de geração de energia deve ficar protegido, e mantendo distâncias seguras em relação ao biodigestor. Em biodigestores modelo canadense, constituídos basicamente de mantas plásticas, o biogás tem pouca pressão e devido a isso pode ser transportado por, no máximo, 50m.

A instalação de um biodigestor modelo canadense é bastante simples e os materiais necessários são:

- ❑ Caixa de alvenaria ou fibra para caixa de entrada;
- ❑ Manta de cobertura de PVC flexível de 1,0 mm;
- ❑ Tubulação de PVC de 150 mm para esgoto (branca), para entrada de dejetos e saída de biofertilizante;
- ❑ Tubulação e conexões de PVC de 1" para água (marrom) para condução do biogás;
- ❑ Caixa de alvenaria ou fibra para o armazenamento do biofertilizante.

5.4.0.1 Especificação Técnica Motor Gerador

Para o cálculo anual do valor de material orgânico aplica-se o valor calculado na equação 4.2 e multiplica-se pelos meses do ano (12 meses), considerando-se assim um valor de 2520 (Nm^3/d) anual, de produção anual de dejetos bovinos (PADB). A tabela 5.6 exemplifica os valores de dejetos, e a quantidade de kWh estimada para trabalho(EMBRAPA-DID, 1980).

Para isso utiliza-se um gerador de 108 kVA limitado para 75 kW, assim, o mesmo gera um valor correspondente de 20.640 kWh/mês. Como a intenção é a geração de energia elétrica objetivando a independência energética da fazenda, é necessário que todo o biogás produzido seja utilizado na geração de energia para que o projeto tenha êxito. Conforme

Tabela 5.6: Dados do material orgânico.

Biogás	Quantidade de biogás
Produção biogás/Animal/Dia	$2,1Nm^3/d$
Produção biogás Total Dia	$210Nm^3/d$
Consumo do grupo gerador 80 kVa	$35Nm^3/h$
Geração KWh estimada Gerador 80 kVa	$55kWh$
Horas trabalhas estimadas	$6Hrs/dia$
Total gerado estimado dia	$330kWh/dia$
Custo estimado kWh	$0,53 R\$/h$
Total gerado estimado dia/R\$	$174,90 R\$/dia$
Total gerador estimado mês/R\$	$5.247,00 R\$/mês$

(Fonte:adaptado pelo próprio autor)



Figura 5.3: Motor Biogás 150 kVA (FONTE: Próprio Autor)

Figura 5.3, o modelo apresentado na metodologia utiliza-se um motor para uso do biogás, sendo que esse será da fabricante MWM modelo MWM 6.12 T, abaixo a especificação técnica do mesmo:

- ❑ Modelo: até (completar com a altitude desejável)m;
- ❑ Cilindros: 55°C;
- ❑ Estacionário;
- ❑ Rotação: 1800 rpm;
- ❑ Operação: Injeção Direta;
- ❑ Cilindrada Total: 7,12 L;
- ❑ Sist. Elétrico: 24Vcc;

- ☐ Consumo de Combustível Biogás 75%: 40 Nm^3/h ;
- ☐ Sist.Refrigeração: Água;
- ☐ Alimentação de ar: Turboalimentado;
- ☐ Sist. de Arrefecimento: Ventilador e Radiador;
- ☐ Filtros: Combustível, Lubrificante e Ar;
- ☐ Aspiração da máquina: Natural;
- ☐ Capacid. Total de líquido refrigerante: 16 L;
- ☐ Capacid. Total de lubrificante incluindo tubos refrigerante: 20 L.

Seguindo as normas da CEMIG para microgeração distribuída ND 5.30 para baixa tensão, os motores geradores deverão ser adequados para operar nas seguintes condições ambientais:

- ☐ Altitude: até (completar com a altitude desejável)m;
- ☐ Temperatura máxima anual: 55°C;
- ☐ Temperatura mínima anual: 0°C;
- ☐ Temperatura ambiente média em 24h: (completar com o valor desejável)°C;
- ☐ Umidade relativa: até 95%, sem condensação;
- ☐ Considerar o clima, quanto ao favorecimento na formação de corrosão e fungos.

Os motores geradores são equipamentos destinados a suprir com energia elétrica as instalações, utilizando como combustível o biogás com 75% de concentração de metano. São compostos basicamente de um motor ciclo otto e um alternador síncrono-trifásico, acoplados por um sistema monobloco e um sistema de monitoramento, controle e proteção (SMCP).

Deverão ser montados sobre uma única base de aço com apoio tipo 'vibra-stop' e ser previstas partidas manual e automática sem necessidade de preaquecimento.

5.4.0.2 Gerador e/ou alternador

O gerador deverá atender perfeitamente às condições de frequência, potência e temperatura do local das instalações. Deverá ser trifásico, com quatro polos girantes do tipo sem escovas (*brushless*), com excitatriz e ponte retificadora trifásica de onda completa,

montadas no mesmo eixo do alternador. A regulação de tensão deverá ser feita por regulador eletrônico de tensão para + ou - 2 % em toda faixa de carga. Será construído auto-ventilado horizontal, com grau de proteção IP-21, mancais de rolamento lubrificados a graxa, enrolamentos amortecedores para serviço paralelo e isolamento classe F, conforme ABNT NBR-5117, o modelo do alternador é exemplificado na Figura 5.4.

Possuirá ainda as seguintes características:

- ❑ Potência nominal: 75 kVA;
- ❑ fator de potência indutivo mínimo: $FP=0,8$;
- ❑ tensão nominal: 127/220/380 V, em estrela com neutro acessível;
- ❑ regime de funcionamento: contínuo;
- ❑ sobrevelocidade: 20% durante 2 minutos;
- ❑ rigidez dielétrica: 1880 VCA durante 1 minuto;
- ❑ distorção harmônica: $<3\%$ entre fases e $<5\%$ entre fase e neutro, com $FP=0,8$ indutivo e carga linear;
- ❑ resistência de isolamento: $> 4,0$ MOhms a 40°C ;
- ❑ regulação: $\pm 2\%$ em relação à nominal, para qualquer valor estável de carga linear de 0 a 100% da potência nominal e valores de FP entre 0,8 e 1,0 indutivo;
- ❑ queda de tensão instantânea: $\leq 10\%$, com tempo máximo de recuperação de 2 segundos na aplicação brusca de 100% da potência nominal;
- ❑ reatância subtransitória: $X_d \leq 10\%$;
- ❑ balanceamento: estática e dinamicamente para o rotor, assegurando funcionamento livre de vibrações, devendo suportar sobrevelocidade de 25%, em caso de emergência, sem danos mecânicos, permanecendo em equilíbrio mecânico e elétrico para todas as velocidades até 125% da rotação nominal;
- ❑ excitatriz: tipo "brushless"(sem escovas), com corrente alternada com retificador composto de diodos girantes, acoplada diretamente ao eixo do gerador, construção totalmente fechada com ventilação externa, isolamento classe F, regulador estático de tensão.

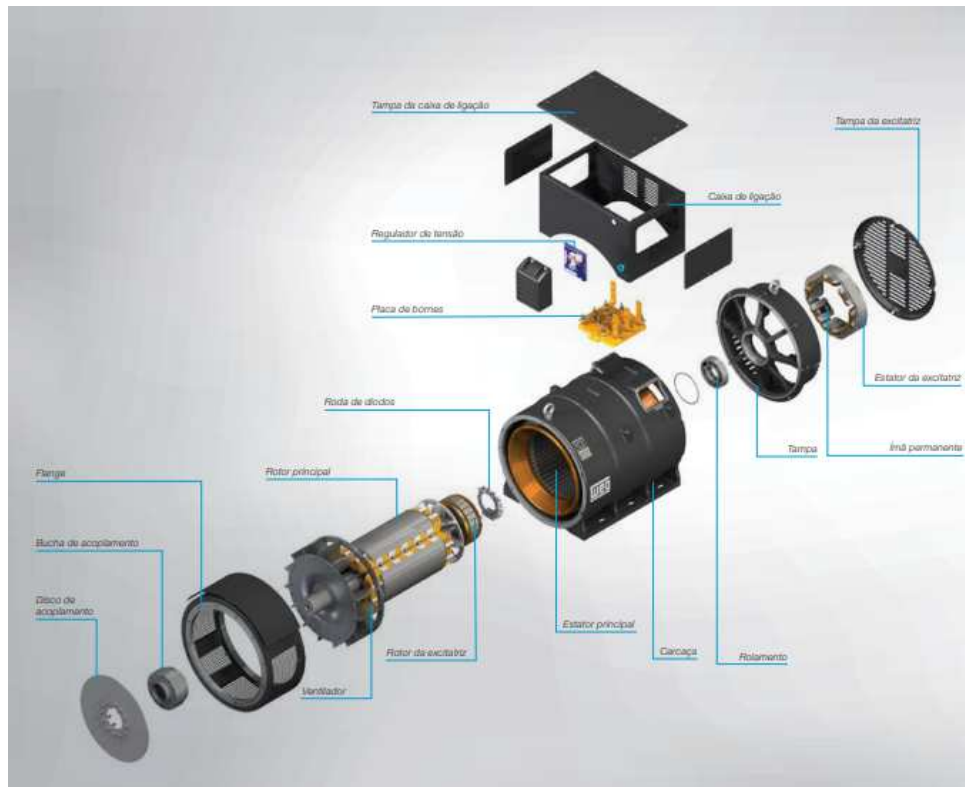


Figura 5.4: Detalhes do alternador de energia (FONTE: WEG)

5.4.0.3 Separador de Sólidos e Líquidos

No estudo de caso foi utilizado o separador de sólidos e líquidos da fabricante WAM, denominado de SEPCOM, o separador é composto por uma seção de alimentação fornecida com depósito compensador e tremonha de transbordo, conforme figura 5.5. A carcaça em aço inoxidável inclui um parafuso transportador (dentro do recipiente do crivo cilíndrico) para transporte do material para saída. O crivo fornece a separação do sólido da fase líquida fluindo empurrando os sólidos no sentido da saída onde os dois diagramas de contrapressão geram um plugue material. Isto permite a operação automática do separador e evita lavagem através da fase líquida. A unidade de acionamento é composta por um motor elétrico e um redutor equipados com um eixo de saída ranhurado que está acoplado diretamente ao parafuso transportador. Na tabela 5.7 e fornecido a quantidade de material orgânico que cada animal produz, além disso, e valorado o mesmo para aplicação como biofertilizantes.

5.5 Sistema Fotovoltaico

A figura 5.6, exibe a Fazenda Sabiá, com classe rural trifásico, com tensão de 380V/220V, com subestação do tipo posto 1, com transformador de 112,5kVA. Neste estabelecimento o consumo mensal é de 16.359,75 kWh/mês ao longo do ano, sendo que, a mesma consiste



Figura 5.5: Separador de Sólidos e Líquidos(FONTE: wamgroup.com.br)

Tabela 5.7: Dados do Biogás Informações.

Matéria Orgânica	Quantidade de Matéria
Produção Dejeito/Animal/Dia	200L
Produção Dejeito Total Dia	20000L
Total em tratamento mês	800m ³
Produção composto/animal/dia	30Kg/d
Produção composto estimado/dia	1650Kg/d
Produção composto estimado/mês	49.500kg/mês
Produção biofertilizante/animal/dia	120Lt/d
Produção biofertilizante estimado/dia	12.000Lt/d
Produção biofertilizante estimado/mês	360.000Lt/mês
Potencial em receita - composto	3.960,00R\$/mês
Potencial em receita - Biofertilizante	3.960,00R\$/mês

(Fonte:adaptado pelo próprio autor)

em uma granja de frangos para exportação com utilização de refrigeração para os animais e alimentação constante para engorda dos mesmos. Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico, foi levando em conta alguns fatores, primeiramente, deve-se utilizar algumas fórmulas para calcular a potência do projeto a ser instalado, para isso, um dos fatores principais a serem calculados é a irradiação da região o qual foi instalado o projeto.

Segundo os dados retirados do Software Radiasol 2 (irradiação de regiões), figura 5.7, a região de Monte Carmelo-MG, tem uma irradiação de $5,24kWh/m^2/dia \times 30dias$. Sendo assim, para suprir a demanda de 16.359,75 kWh/mês da unidade consumidora com o sistema fotovoltaica, e necessário através dessa demanda, um sistema com potência de 131 kWp, sendo assim, será instalado um sistema de 72,6 kWp para o sistema de energia solar e os outros 60 kW necessários para suprir a demanda será completado pelo sistema de biogás. A especificação técnica dos módulos fotovoltaicos utilizados no estudo de caso e apresentado na tabela 5.8.

Para calcular o inversor foi dimensionado de acordo com a potência calculada pelas placas, sendo assim, considerando que o valor da potência nominal do mesmo, pode ser 33% menor do que valor calculado dos módulos fotovoltaicos, a potência do inversor escolhido foi determinada conforme tabela 5.9.



Figura 5.6: Usina de 72,6 kWp em Monte Alegre-MG (Fonte:Próprio Autor)

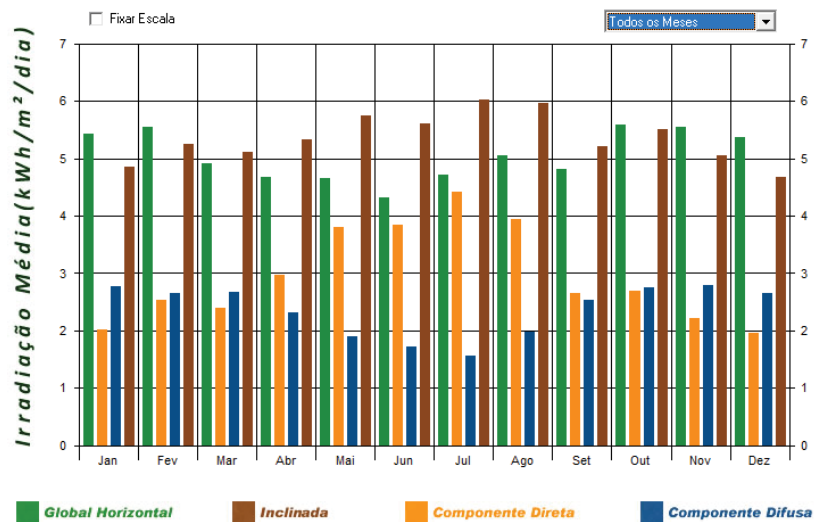


Figura 5.7: Radiação Solar em Monte Alegre-MG.(Fonte:Software Radasol 2)

O posicionamento dos painéis ficou direcionado para norte geográfico com objetivo de captar a trajetória do sol ao longo do dia, pois o mesmo nasce no leste e se põe no oeste. Foram utilizados 220 painéis com a configuração da tabela 5.8. A Figura 5.6 demonstra a instalação dos módulos, foi necessário fazer duas estruturas longas com 110 metro de comprimento para à acomodações dos painéis fotovoltaicos.

5.6 Conclusão

O estudo de caso mostrou-se eficaz e eficiente para análise e comparações entre outras tecnologias de geração de energia. O sistema de biogás precisa de grandes quantidades

Tabela 5.8: Dados técnicos dos módulos fotovoltaicos

Dados Técnico	Especificações Técnica
Modelo	CS6U-330P
Nominal Max. power (Pmax)	330W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	37,2 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.88 A
Open Circuit Voltage (Voc)	45.6
Short Circuit Current (Isc)	9.45 A
Module Efficiency	16.97%

(Fonte:adaptado pelo próprio autor)

Tabela 5.9: Dados técnico do Inversor.

Dados Técnico	Especificações Técnica
Modelo	TRIO-27.6-TL-OUTD
Rated AC power	27600W
AC Voltage Range	320-480 V
MPPT	2
Maximum AC Output Current	45.0 A
Short Circuit Current (Isc)	9.45 A
Rated Output Frequency	50Hz/60Hz

(Fonte:adaptado pelo próprio autor)

de matéria orgânica para alimentar o motor, com isso, e necessário fazer um estudo bem detalhado de substrato necessário para que possa manter o mesmo suportando a carga. Por outro lado, o sistema fotovoltaico necessita da energia solar para transformar energia química e energia elétrica, para isso é necessário fazer um estudo da região para saber o nível de irradiação, posicionamento e inclinação dos módulos, assim, sabe-se o melhor local para instalar os mesmo. Portanto, o sistema híbrido, com biogás e fotovoltaica revelaram-se úteis e de grande utilidade para unidades consumidoras rurais, trazendo benefícios e utilizando da própria matéria prima que o meio produz.

Análises dos resultados dos Projetos de Geração Híbrida

Nesse capítulo são explanados os resultados do dimensionamento dos projetos fotovoltaico e biogás. Para o sistema fotovoltaico foi utilizado o software PVsyst de modo a avaliar o potencial energético solar do local do projeto, figura 6.1 e 6.2, assim, pode ser verificada a energia gerada ao longo do ano e seus meses de maiores produção. Foram utilizados no total 220 módulos com potência 330Wp, juntos formaram um sistema de 72,6 kWp, conforme figura 5.6. Na figura 6.1, a parte das colunas que possui zona de cor roxa, demonstra a perda de absorção ao longo do meses do ano, referente a perdas de energia das placas, a parte verde é a perda de energia do sistema ao longo do ano em kWh/KWp/dia e a cor vinho representa a energia produzida que será útil para exercer o trabalhos do equipamentos, ou seja, energia que será útil para o funcionamento dos equipamentos.

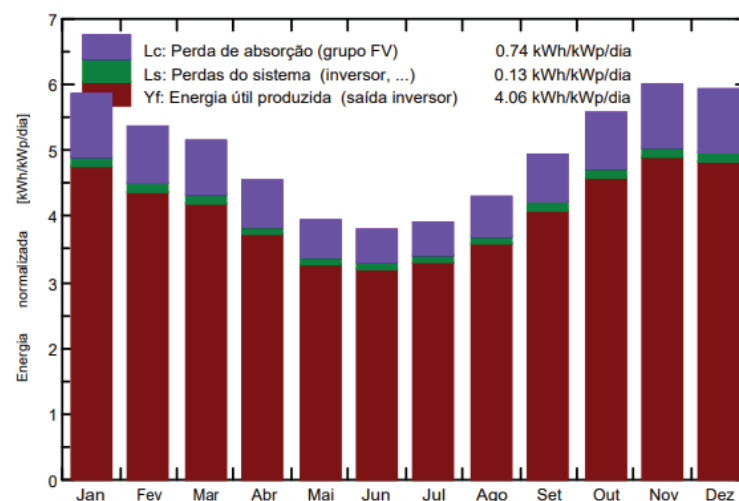


Figura 6.1: Níveis de radiação ao longo do ano, software PVsyst(Fonte: Software PVsyst)

A Figura 6.2 contém os dados da simulação no software PVsyst, ao longo do ano, como

forma de demonstrar a variação da radiação e condições climáticas:

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
Janeiro	167.9	88.63	27.63	181.7	178.2	11.45	11.09	0.811
Fevereiro	148.6	85.18	27.97	150.1	147.0	9.51	9.21	0.816
Março	170.8	92.72	28.17	159.0	155.3	10.11	9.79	0.818
Abril	163.7	77.95	27.43	135.8	131.9	8.69	8.41	0.824
Maio	163.4	80.45	27.40	122.4	118.1	7.88	7.63	0.828
Junho	162.6	73.18	25.58	114.3	109.7	7.42	7.19	0.836
Julho	169.2	73.43	24.93	121.6	117.0	7.93	7.67	0.839
Agosto	167.3	82.78	25.33	132.8	128.7	8.65	8.38	0.839
Setembro	167.2	75.96	25.76	148.0	144.2	9.53	9.23	0.829
Outubro	174.6	85.71	26.50	172.3	168.6	10.99	10.65	0.821
Novembro	167.0	81.36	26.33	179.3	175.9	11.37	11.02	0.817
Dezembro	165.6	82.20	27.20	184.1	180.8	11.60	11.23	0.811
Ano	1988.0	979.55	26.68	1801.5	1755.4	115.13	111.50	0.823

Legendas: GlobHor Irradiação global horizontal GlobEff Global efetivo, corrigido para IAM e sombras
 DiffHor Irradiação difusa horizontal EArray Energia efetiva à saída do grupo
 T_Amb Temperatura ambiente E_Grid Energia injetada na rede
 GlobInc Incidência global no plano dos sensores PR Performance Ratio (Quociente de performance)

Figura 6.2: Resultado da produção de energia ao longo do ano PVsyst(Fonte: Software PVsyst)

Na mesma, a segunda coluna é referente à irradiação global horizontal representado em kWh/m^2 , na terceira é a irradiação difusa horizontal em kWh/m^2 , a quarta demonstra a temperatura ambiente média em C° , na quinta, a incidência global plana em kWh/m^2 , a sexta representa o efeito global proveniente de sombreamento em kWh/m^2 , na sétima é a energia gerada na saída do sistema em MWh , oitava, a energia injetada na rede em MWh , e por último a nona coluna mostra a eficiência do sistema em cada mês.

6.1 Análise através do software Homer Pro

Para cada fonte de energia foi inserido o valor do custo para cada 1kW produzido, assim, foi simulado no software Homer Pro, para saber o valor da energia ao longo de um ano. Na tabela 6.1, está o custo de 1 kW para fonte de energia através do biogás. Por outro lado, na tabela 6.2, consta o valor de 1 painel com capacidade de 0,330 kW para fonte de energia fotovoltaica.

Tabela 6.1: Dados de entrada software Homer Pro fonte biogas.(Fonte: adaptado Software Homer Pro)

Capacidade (kW)	Capital (\$)	Substituição (\$)	O&M(\$op.hr)	Tamanho(Kw)
1	R\$3.000,00	R\$0,00	R\$0,53	0-95

Tabela 6.2: Dados de entrada Software Homer Pro fonte fotovoltaica.(Fonte: adaptado Software Homer Pro)

Capacidade (kW)	Capital (\$)	Substituição (\$)	O&M(\$op.hr)	Tamanho(Kw)
0,330	R\$1.062,50	R\$0,00	R\$10,00	0-72

O gráfico seguinte da Figura 6.3 representa a simulação das fontes de energia ao longo de um ano, isto é, fazendo um comparativo entre a produção anual e o custo da energia, utilizando os dados das tabelas 6.1 e 6.2, os dados de entrada são referencias ao custo do kW, investimento do mesmo e a manutenção ao longo de 25 anos.

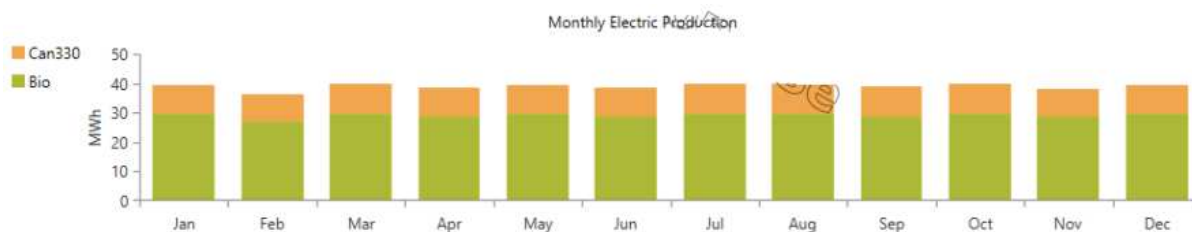


Figura 6.3: Resultado da simulação no software Homer Pro para duas fontes de energia (fonte: homer pro)

6.2 Resultados da Viabilidade Econômica

Os custos associados a sistemas híbridos podem ser divididos em dois grupos, que são os custos de despesa e os custos de receita. Os custos de receita estão normalmente associados ao lucro obtido com a venda da energia gerada, ou a uma eventual economia resultante da redução no consumo de combustível ou de outras taxas. Já os custos de despesas podem ser relacionados aos custos de investimento inicial, custos de operação e manutenção (OM) e custos de reposição de equipamentos.

Os custos de investimento inicial em tais sistemas estão concentrados principalmente nos módulos fotovoltaicos. De acordo com dados do mercado nacional, estima-se que o custo dos módulos varie entre 50 % a 65 % do investimento inicial total do sistema fotovoltaico, dependendo basicamente da finalidade e do porte do mesmo. Esses valores são coerentes com pesquisas de mercado internacionais, que apontam para uma participação do custo dos módulos entre 45% e 55% do custo inicial total (SOLARBUZZ, 2008).

A figura 6.4, mostra um gráfico representado ao longo de 25 anos, o retorno do investimento em comparativo com o custo de implantação tanto de biogás, quanto de fotovoltaico. Na coluna de custo demonstra o valor do projeto para implantação tanto de biogás que é de R\$ 500.000,00, quanto fotovoltaico que é R\$ 350.000,00. Em outra coluna retorno, refere-se ao retorno do investimento ao longo de 25 anos de funcionamento.

Segundo (BERNARDES R.L.M.; GIAROLA, 2019) que realizou uma análise de investimento com base nos dados do estudo de caso aqui aprofundado, e ressalta que o prazo de 25 anos foi considerado para o retorno, dado que é o tempo de garantia do funcionamento pleno do sistema. O retorno, demonstrado na figura 6.4 foi calculado considerando o valor economizado com a geração de energia, anualmente, levando-se em conta uma taxa de inflação energética média anual de 10,80%. Além disso, a autora adicionou outros dados

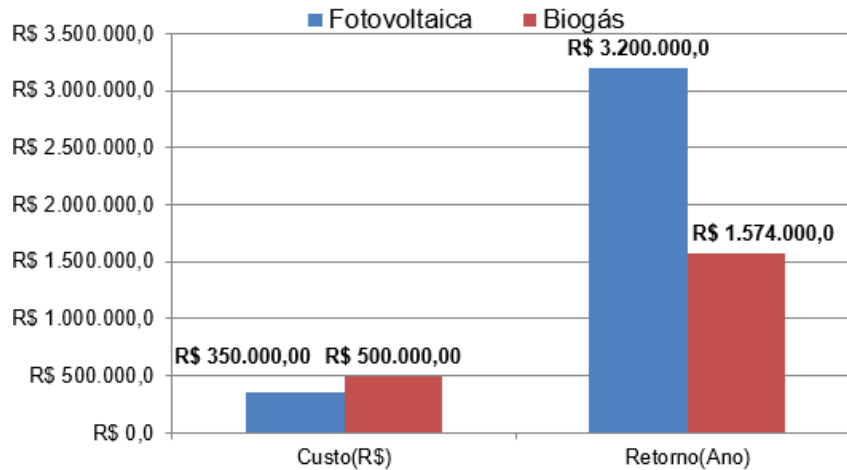


Figura 6.4: Resultado do payback ao longo de 25 anos entre as duas fontes de energia(Fonte: Próprio Autor)

para fazer os cálculos dos indicadores que ela analisou, que foram: TMA (Taxa Mínima de Atratividade) de 15,94% ao ano e um dispêndio com manutenção anual de R\$ 2.000 para o projeto fotovoltaica e de R\$ 3.000 para o biogás. Sendo assim, os resultados que ela chegou podem ser observados na tabela 6.3.

Tabela 6.3: Resultados dos indicadores de retorno sobre o investimento.

Indicadores	Fotovoltaica	Biogás
VPL (R\$)	82.271,26	-260.303,74
TIR(%)	18,40	9,18
VPLa(R\$)	13.447,36	-42.546,89
TIRm(%)	17,17	13,02
IBC(R\$)	1,75	0,71
PB(período)	7,38	13,29
PBd (período)	17,35	acima de 25 anos

Adaptado pelo próprio autor Fonte:(BERNARDES R.L.M.;GIAROLA, 2019)

Tem-se que, para o investimento em energia fotovoltaica, tanto o VPL (valor presente líquido) como o VPLa (valor presente líquido anualizado) demonstraram resultados positivos. A TIR (taxa interna de retorno) e TIRm (taxa interna de retorno modificada) apresentaram resultados maiores que a TMA considerada (15,95%), ao passo que o IBC (índice benefício e custo) revelou que para cada R\$ 1 real investido, tem-se um retorno de R\$0,75 centavos. Por fim, o período de recuperação do investimento calculado pelo PB (tempo de retorno para pagamento) e pelo PBd (tempo de retorno para pagamento descontado) foram bastante razoáveis, indicando que esta é uma opção viável para o investimento ser efetivado. Por outro lado, os indicadores para o investimento em Biogás não demonstraram tanta vantagem assim para ser levado em consideração. O VPL e o VLPa deram resultados negativos indicando retorno maiores que a TMA. A TIR e TIRm

também foram inferiores à TMA utilizada, o IBC revelou-se menor que 1, e, apesar do período de PB ter sido razoável, o PBd, ficou acima do período de análise (25 anos). Levando-se em conta apenas esses resultados o investimento não é rentável financeiramente (BERNARDES R.L.M.;GIAROLA, 2019).

Segundo Silva (2009), "a Taxa interna de Retorno (TIR) é a taxa de juros com a qual o valor presente de um fluxo de caixa futuro analisado se iguala ao valor presente do investimento". Ainda segundo o mesmo autor, "a taxa de retorno permite descobrir e comparar o rendimento de uma aplicação com uma outra taxa para se saber se é ou não vantajoso". Segundo Marquezan (2006), o valor presente líquido é "o valor das somas algébricas de fluxos de caixas futuros, descontados a uma taxa de juros compostos, em uma determinada data". Já o *PayBack* se refere ao período de tempo necessário para recuperar o investimento inicial.

Tabela 6.4: Levantamento do Consumo Anual da Fazenda Sabiá.

Mês/Ano	Consumo (kWh)	Média (Kwh/dia)	Dias
MAR/18	54.200	1.935,71	28
FEV/18	7.560	236,25	32
JAN/18	8.040	277,24	29
DEZ/17	24.320	838,62	29
NOV/17	6.080	184,24	33
OUT/17	12.760	440,00	29
SET/17	2.000	58,82	34
AGO/17	17.360	560,00	31
JUL/17	14.920	481,29	31
JUN/17	5.280	170,32	31
MAI/17	1.080	38,57	28
ABR/17	1.080	32,72	33
MAR/17	11.880	383,22	31
Total	13.875	469,68	33,25

(Fonte:feito pelo próprio autor)

Conforme tabela 6.4, em média devemos ter uma geração mensal de 13.875 kwh/mês, assim, dividimos em diferentes fontes de energia uma para biogás que terá uma capacidade 80 kVA que então gerará um média de 9.900 kWh/mês, assim, os outros 72,6 kWp de energia fotovoltaica gerará outros 9.075 kWh/mês. Abaixo, discriminado a geração de cada fonte de energia e a econômica gerada pelas mesmas ao longo de um ano.

Conforme a tabela 6.5 foi considerado uma taxa de R\$0,4602 kWh conforme conta de energia junto a concessionária de energia, CEMIG-D. Cada fonte de energia em média gerará uma economia de R\$ 50.000,00/ano juntas, podendo chegar ao valor de R\$ 100.000,00/ano, assim, será desconsiderado manutenção e financiamento para instalação

Tabela 6.5: Energia gerada pelas diferente fontes de energia Biogás/Fotovoltaica

Fonte	Mês(kWh/mês)	Ano(kWh/ano)	Valor(R\$/ano)
Fotovoltaica	9.075	108.900	50.115,78
Biogás	9.900	118.800	54.671,76

(Fonte:feito pelo próprio autor)

dos sistemas, apenas valor bruto de economia. Contudo, o tempo de retorno para pagamento de todo o sistema seria em média de 10 anos, considerando apenas valores mensais descontando o valor investido que seria em torno de R\$750.000,00.

6.3 Efeitos sobre o solo

A qualidade de um solo é determinada por parâmetros físicos (porosidade, textura, teor de umidade), químicos (teor de umidade, pH) e biológicos (tipo, quantidade de microrganismos e sua atividade). A qualidade do solo é afetada pela composição do biofertilizante, no caso de poluentes químicos, os quais são tóxicos para os organismos presente no solo. O material orgânico a partir de biofertilizante aumenta a capacidade de tamponamento do solo, da água e do ar no perfil do solo, além de afetar positivamente os microrganismos do solo. A maioria dos microrganismos presentes no solo são heterotróficos, o que significa que usam compostos orgânicos de carbono como uma fonte de carbono e energia durante o crescimento.

A adição de matéria orgânica ao biofertilizante conduz a uma estimulação generalizada do crescimento microbiano. Microrganismos desempenham um papel-chave na fertilidade do solo, à medida que a matéria orgânica mineraliza e libera vários nutrientes. Os microrganismos facilitam a nutrição das plantas formando polissacarídeos que estimulam a formação de agregados estáveis e também os protege contra o ataque de doenças. Além disso, o teor de nitrogênio mineral (amônio) presente no biofertilizante faz com que as plantas se desenvolvam bem, conduzindo a um aumento de proporção de carbono no solo pela secreção de raiz. O uso de adubos orgânicos pode levar à emissão de amônia (NH_3) e gases de efeito estufa, como o óxido nitroso (N_2O) e o metano (CH_4) (KARLSSON T.; KONRAD, 2014).

A amônia é liberada principalmente a partir do biofertilizante, enquanto o óxido nitroso e o metano são resultado do aumento da atividade microbiana no solo. A amônia pode fixar-se no biofertilizante tanto durante o armazenamento quanto durante a aplicação. O método de distribuição tem grande importância para essas emissões, pois a dispersão na superfície leva a maiores perdas de nitrogênio do que a injeção superficial. Os microrganismos transformam a amônia presente no solo em óxido nitroso. A degradação microbiana da matéria orgânica também pode levar a emissões de metano. A injeção

superficial reduz essas emissões, pois, além da técnica de dispersão, o tipo de solo exerce grande influência no que se refere à magnitude das emissões.

Conclusões

Com a escassez de recurso naturais, as gerações atuais de energia se tornaram inviáveis, por isso, o conceito de sistema híbrido tendo em vista a descentralização e diversificação da matriz energética, apresenta-se como uma oportunidade, tanto de fornecimento de energia quanto para mitigação dos impactos ambientais associados. Visando o melhoramento na qualidade da energia elétrica nas áreas rurais, as fontes alternativas surgiram como solução para os problemas encontrados (como redes de distribuições instáveis e quedas de tensões). Sendo assim, este estudo objetivava demonstrar o retorno de investimento econômico de sistemas híbridos isolados com biogás e fotovoltaica.

Através de cálculos e simulações foi demonstrado a funcionalidade do sistema, bem como suas viabilidades e rentabilidades através da geração distribuída isolada, podendo observar através desse estudo de caso que, ao aplicar um investimento inicial de R\$ 500.000,00 para biogás e R\$ 350.000,00 para o fotovoltaico e ter ao longo de 25 anos, um retorno de R\$ 3.200.000,00 para a energia solar e R\$ 1.574.100,00 para o biogás, em termos de economia de energia. Portanto, evitaria gastos em melhoramento de redes de distribuição, causaria menores impactos ambientais de fontes de energia atuais e a qualidade da energia aumentaria significativamente, além disso o retorno do investimento seria rápido e seguro.

Conforme apresentado no Capítulo 6, a simulação nos softwares apresenta valores relevantes para uma análise econômica de tempo de retorno. Os experimentos mostraram quanto mais matéria orgânica e a irradiância da região onde está implantado o sistema, maior será sua produção de energia. Conforme o capítulo 3, o dimensionamento de um sistema de biogás em uma rede isolada para estabelecimentos rurais, precisa levar em consideração a quantidade matéria orgânica e animais confinados para geração de energia elétrica, por outro lado, o fotovoltaico é baseado em posicionamento da região ao longo do globo terrestre, para isso, leva-se em consideração a latitude da edificação e o nível de irradiância.

Ademais, as fontes alternativas e renováveis de energia elétrica podem contribuir de

forma significativa para o sistema elétrico nacional, operando como Geração Distribuída próximas aos centros/pontos de consumo. Neste contexto, a geração distribuída vem ganhando destaque no cenário da geração convencional de energia elétrica, ampliando sua percentagem na matriz energética dos países, e, deixando de ser conectada somente em elevadas tensões (principalmente subtransmissão), migrando também para a conexão em baixa tensão, nas redes de distribuição convencionais em corrente alternada. Com este estudo de caso, notou-se que com redes isoladas pode-se obter resultados satisfatórios e com uma boa viabilidade econômica, usando tanto a matéria orgânica e irradiação solar para produzir energia para o estabelecimento rural, bem como para produzir biofertilizantes para o solo do mesmo.

7.0.1 Sugestões para trabalhos futuros

- ❑ Construir modelos de geração híbrida em pequena escala e testar os experimentos nos locais mencionados para comparar os resultados.
- ❑ Fazer um levantamento e incluir o retorno financeiro do uso biometano nas frotas de máquinas rurais e urbanos, como frotas de ônibus e tratores, ao invés de combustíveis fósseis.
- ❑ Fazer uma análise econômica mais profunda, isto é, levando em consideração taxa de juros e inflação nos cálculos de tempo de retorno de investimento.
- ❑ Trazer resultados que elimina a necessidade de rede de transmissão para geração de sistemas isolados com fontes de energia alternativas considerado o valor de tempo de retorno de investimento.

Referências

- ALVES, J. *Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbica de resíduos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, Brasil, 2000.
- AMBIENTAL, D. de Engenharia Sanitaria e. *Reatores anaeróbicos*. [S.l.]: UFMG, 2007.
- ANEEL. *Resolução Normativa 482*. [S.l.]: ANEEL, 2012.
- ANEEL. *Resolução Normativa 687*. [S.l.]: ANEEL, 2016.
- BERNARDES R.L.M.;GIAROLA, E. Indicadores de viabilidade na implementacao de um sistema hibrido de energia. *MBA em Financas e Estrategias Empresariais*, 2019. MBA UFU FAGEN, v. 1, n. 1, p. 1–8, 2019.
- CERVI, R. G. *Avaliação econômica do aproveitamento do biogás e biofertilizante produzido por biodigestão anaeròbia:estudo de caso em unidade biointegrada*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp, Brasil, 2009.
- CIDADES, M. das. *Tecnologias de Digestão anaeròbia com Relevância para o Brasil Substratos, Digestores e Uso de Biogás*. [S.l.]: PROBIOGÁS, BRASILIA, 2015.
- COELHO S. T.; VELAZQUEZ, S. M. S. G. S. O. C. V. A. J. P. Geração de energia elétrica a partir do biogas proveniente do tratamento de esgoto. *Universidade de São Paulo*, 2006. Universidade de são paulo, v. 4, n. 6, p. 1–10, dec 2006. Disponível em: <www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n6v1/070.pdf>.
- CRESESB. *Centro de Referências para as Energias Solar e Eólica*. [S.l.]: cresesb, 2014.
- EMBRAPA-DID. *Construção e funcionamento de biodigestores*. [S.l.]: EMBRAPA, 1980.
- ENERGIA, M. de Minas e. *Sistemas Híbridos*. [S.l.]: Ministerio de Minas e Energia, 2008.
- GASPAR, R. M. B. L. *Utilização de Biodigestores em Pequenas e Médias Propriedades Rurais com Ênfase na Agregação de Valor: Um Estudo de Caso na Região de Toledo-PR*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2013.
- HOLANDA, E. P. T. D. *Novas Tecnologias Construtivas para produção de vedações verticais diretrizes para o treinamento da mão-de-obra*. Dissertação (Mestrado) — Universidade São Paulo, Brasil, 2003.

HUANG J.;CROOKES, R. Assessment of simuled biogas as a fuel for the spark ignition engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1995. Transactions of the ASME, v. 117, n. 15, p. 820–825, 1995.

JOSE A. M.; ROSSI, A. R. Projeto de sistemas fotovoltaicos para oferta de energia eletrica a comunidades rurais. *Universidade Estadual de Campinas*, 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 30, n. 6, p. 1–11, 2015.

KARLSSON T.; KONRAD, O. M. P. M. E. F. G. *Manual Basico de Biogas*. [S.l.]: UNIVATES, 2014.

KUNZ A.;HIGARASHIM, M. P. Assessment of simuled biogas as a fuel for the spark ignition engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1995. Transactions of the ASME, v. 117, n. 15, p. 820–825, 1995. Disponível em: <url.org/10.1115/1.2815470>.

LAMBANI N. E.; BUQUE, C. Modelling and cost analysis of hybrid energy system for st. martin island using homer. *2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision*, 2013. ICIEV 2013, v. 4, n. 6, p. 1–60, 2013. Disponível em: <ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf>.

LEONI, P. *Projeto híbrido eólico solar: Uma alternativa para aumentar a competitividade e facilitar a penetração de projetos fotovoltaicos de maior porte no país*. Brasil: [s.n.], 2016.

MACARI N. C., R. R. Operation of a caterpillar 3516 spark-ignited engine engine on low-btu fuel. *2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision*, 1987. v. 109, n. 15, p. 1–60, 1987.

MACEDO, F. J. d. M. *Dimensionamento de Biodigestores para tratamento de dejetos da produção suína*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2013.

MAHMUD N.; HASSAN, A. R. M. S. Modelling and cost analysis of hybrid energy system for st. martin island using homer. *2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision*, 2006. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, v. 4, n. 6, p. 1–60, 2006. Disponível em: <https://url.org/10.1109/ICIEV.2013.6572678>.

METCALF E EDDY, M. *Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse*. [S.l.]: McGraw-Hill, NEW YORK, 1991.

MIHIC, S. Biogas fuel for internal combustion engines. *Faculty Engineering Hunedoara*, 2004. v. 2, n. 3, p. 179–190, 2004. Disponível em: <www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n6v1/070.pdf>.

MITZLAFF, K. *Engines for biogas*. [S.l.]: Viesbaden, Veiweg, 1988.

MURARO, W. *Avaliação do funcionamento de motor ice com gás de baixo poder calorífico proveniente da gaseificação de casca de arroz*. Dissertação (Mestrado) — Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Brasil, 2006.

NILOY C. S.; SHUVAJYOTI, A. Hybrid renewable energy and microgrid research work at NREL. *IEEE School of Electric Power*, 2010. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 30, n. 6, p. 1–6, 2010. Disponível em: <10.1109/PES.2010.5589753>.

- NORTE, I.-R. G. D. *Energia Solar Fotovoltaica: Estado da arte e as contribuições do instuto federal do Rio Grande do Norte*. [S.l.]: IFTM-Rio Grande Do Norte, 2012.
- OLIVER, A. d. P. M. *Manual de treinamento em biodigestão*. [S.l.]: Winrock International Brasil, 2008.
- OZ M;MORENO, F. M.-R. J. J. J. M. Low heating value gas on spark ignition engines. *Biomass e Bioenergy*, 2000. Biomass e Bioenergy, v. 18, n. 1, p. 431–439, 2000. Disponível em: <www.scielo.br/pdf/cagro/v34n1/24.pdf>.
- PARANA, D. de Física Universidade do. *Introdução a Meteorologia*. [S.l.]: UFPR, 2014.
- RUTHER, R. *Edifícios solares fotovoltaicos : o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil*. [S.l.]: LABSOLAR, 2004.
- SASSE, L. Biogas plants. *GTZ*, 1988. v. 34, n. 1, p. 190–195, 1988. Disponível em: <biogas.ifas.ufl.edu/addevelopment/documents/biogasplants.pdf>.
- SILVA, B. J. *A Primeira Conferência Sobre Usos Pacíficos da Energia Atômica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, 2010.
- SOUZA, J. *Desempenho de um motor de combustão interna ciclo otto operando com gás natural e biogás*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, 2012.
- TAYLOR, C. F. *Análise dos motores de combustão interna*. [S.l.]: Edgard Blucher, 1971.
- YANNING, K. L. Z.; BINGGANG, C. Renewable energy distributed power system with wind power and biogas generator. *IEEE School of Electric Power*, 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 30, n. 6, p. 2590–2599, 2015. Disponível em: <[10.1109/tpwr.2015.2443560](https://doi.org/10.1109/tpwr.2015.2443560)>.