

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

BRUNO DA SILVA OLIVEIRA

**REVISÃO TÉCNICA E BIBLIOGRÁFICA PARA O ESTUDO E O
DIMENSIONAMENTO DE RECURSOS ENERGÉTICOS SOLARES, EÓLICOS E
DE BIOGÁS PARA APLICAÇÕES EM MICRO E MINIGERAÇÕES**

CAMPO GRANDE
Novembro de 2014

BRUNO DA SILVA OLIVEIRA

**REVISÃO TÉCNICA E BIBLIOGRÁFICA PARA O ESTUDO E O
DIMENSIONAMENTO DE RECURSOS ENERGÉTICOS SOLARES, EÓLICOS E
DE BIOGÁS PARA APLICAÇÕES EM MICRO E MINIGERAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada
como exigência para obtenção do grau de
Bacharelado em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
– UFMS.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luigi Galotto Junior

CAMPO GRANDE

Novembro de 2014

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
COMISSÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 1 E 2

CERTIFICADO DE AUTENTICIDADE DE MONOGRAFIA

Eu, BRUNO DA SILVA OLIVEIRA acadêmico (a) do curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da UFMS, portador (a) do RGA Nº **2010.2103.284-0** certifico que a presente monografia e TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO com o título: “**REVISÃO TÉCNICA E BIBLIOGRÁFICA PARA O ESTUDO E O DIMENSIONAMENTO DE RECURSOS ENERGÉTICOS SOLARES, EÓLICOS E DE BIOGÁS PARA APLICAÇÕES EM MICRO E MINIGERAÇÕES**” é de minha exclusiva autoria, com a orientação do Prof. Dr. **Luigi Galotto Junior.**

Outrossim, declaro que estou ciente das sanções na esfera civil, penal e ética, sujeitas, caso seja comprovado o plágio e/ou aquisição do trabalho e/ou realização por outra pessoa.

Declaro também que estou ciente das medidas de caráter pedagógico, como a reprovação na disciplina de TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 1 e 2, podendo acarretar impedimento da conclusão do curso.

CAMPO GRANDE-MS, _____ DE _____ DE 2014.

Assinatura do acadêmico

BRUNO DA SILVA OLIVEIRA

A Deus, que me forneceu o conhecimento e a persistência necessária para que eu pudesse completar esta importante etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Iliana Maria Sardinha da Silva, ao meu pai Sidney de Oliveira e meus irmãos Matheus e Lívia pelo apoio, incentivo e amor incondicional, que são base para o meu futuro.

A minha namorada Giovana Emília que esteve ao meu lado apoiando e me incentivando, sendo essencial para esta conquista.

Aos meus sogros Giselda Tedesco, José Francisco Ferrari, Rubens Aquino e família pelo auxílio e positividade para a minha formação.

Aos meus amigos e novos irmãos Alexandre Fazolli, André Weck, Emanuel Oliveira, Marcelo Rossignolo, Marcelo Cavalcante, Márcio Grassi, Neilton José, Pedro Fidalgo, Pedro Carvalhal, Vagner Batista, que ao longo desta jornada foram um grande apoio e que com certeza estarão presentes em minha vida.

Ao meu professor orientador, Prof. Dr. Luigi Galotto Júnior, pelo auxílio, disponibilidade de tempo e material, que com sabedoria e dedicação soube dirigir-me os passos e os pensamentos para alcançar os meus objetivos.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

Com o crescimento da demanda de energia as fontes de geração operam cada vez mais no limite de capacidade, principalmente em casos de risco hidrológico, quando são despachadas outras fontes de energia, elevando o custo de geração e o impacto ambiental. As fontes renováveis de energia na geração distribuída são alternativas para estes problemas mundiais, pois trabalham com elementos naturais como vento, sol ou matéria orgânica em decomposição que podem ser encontrados em abundância e reduzem a emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa. Com esta motivação, este trabalho objetivou reunir informações teóricas e práticas de três recursos renováveis potenciais (solar, eólico e biogás) para o uso em gerações distribuídas no Brasil, a fim de subsidiar estudos e aplicações futuras. Portanto, no início é apresentada uma ampla pesquisa bibliográfica, sendo resumidas diversas fontes como dissertações, livros, artigos científicos e internet, de modo a possibilitar a análise dos assuntos abordados, dando um aspecto inicialmente teórico e posteriormente prático. São abordadas as características básicas e os métodos de análise da geração por fontes de energia fotovoltaica, eólica e biogás, trazendo dois casos de estudo práticos para demonstração de projetos de geração das três fontes. Nestes estudos também foram realizadas uma análise econômica básica de comparação entre diferentes fontes no sistema de compensação de energia e outra análise com o cálculo da viabilidade de um projeto de geração para a venda no mercado livre de energia. Os resultados apresentados neste trabalho demonstram a possibilidade da utilização destas novas formas de geração, contrastantes com o atual cenário de geração centralizada em um gerador de grande potência, com demonstração de custos iniciais básicos para cada fonte. Com este conteúdo, este trabalho poderá ser uma referência de consulta prática e de valor para técnicos e acadêmicos que desejam iniciar no entendimento ou na atuação em geração distribuída.

Palavras-chave: Biogás, Fotovoltaica, Eólica, Fontes Alternativas de Energia, Sustentabilidade, Meio Ambiente, Geração alternativa, Micro geração, Mini Geração, Geração Distribuída, Redução de Consumo, Geração de Energia.

ABSTRACT

With the increase of the energy demand, generation sources are increasingly operating at capacity limit, especially in cases of hydrological risk, when other energy sources are dispatched, raising the cost of generation and environmental impact. Renewable energy sources in distributed generation are alternatives to these global problems, because they work with natural elements such as wind, sun or decaying organic matter that can be found in abundance and reduce the emission of gases responsible for the greenhouse effect. With this motivation, this study aimed to gather theoretical and practical information of three potential renewable resources (solar, wind and biogas) for use in distributed generation in Brazil, in order to support studies and future applications. Therefore, at the beginning is presented a wide literature, where several sources are summarized as essays, books, scientific articles and internet, to enable the examination of the subjects, initially giving a theoretical aspect and then practical. The basic characteristics and methods of analysis of generation by sources of photovoltaics, wind and biogas are addressed, showing two practical case studies to demonstrate generation projects of the three sources. In these studies were also performed, a basic economic analysis comparing different sources in power compensation system and another analysis with the calculation of the feasibility of a generation project for sale on the free energy market. The results presented in this study demonstrate the possibility of using these new forms of generation, contrasting with the current scenario of centralized generation in a large power generator, with demonstrations of initial costs for each source. With this content, this work can be a practical arrangement of reference and value for technicians and academics who want to start in understanding or performance in distributed generation.

Keywords: Biogas, Photovoltaic, Eolic, Alternativa Energy Sources, Sustainability, Environment, Alternative Generation, Micro Generation, Mini Generation, Distributed Generation, Consumption Reduce, Energy Generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do efeito fotovoltaico.....	18
Figura 2–Curva de um carregador de bateria.....	21
Figura 3–Elementos internos de um aerogerador horizontal de grande porte.....	29
Figura 4– Exemplo de histograma relacionando horas por ano com velocidade do vento.....	31
Figura 5– Exemplo de histograma gráficos de distribuição de Weibull e Rayleigh.....	32
Figura 6– Distribuição de Weibull variando o fator de escala	33
Figura 7– Escoamento em uma montanha	34
Figura 8– Turbina Eólica modelo de Darrieus	41
Figura 9– Turbina Eólica modelo de Savonius	41
Figura 10 – Curva de carga de um aerogerador	41
Figura 11– Processo de digestão anaeróbia.....	45
Figura 12 - Etapas de funcionamento de um biodigestor.	51
Figura 13 - Representação em corte de um biodigestor modelo Canadense.....	52
Figura 14 – Algoritmo de cálculo da geração eólica.....	58
Figura 15 – Algoritmo de cálculo da geração solar.	59
Figura 16 – Potência gerada para cada valor de irradiação solar.	62
Figura 17 – Espectro de potências em relação à entrada.....	63
Figura 18 – Gráfico Vento (m/s) x Potência (W) gerada.....	65
Figura 19 – Potência eólica (W) por amostra de entrada.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1–Exemplo de listagem de potências para equipamentos de uma residência.	25
Tabela 2–Classificação da rugosidade da superfície de alguns tipos de terreno.	35
Tabela 3–Coeficiente de atrito para vários tipos de terrenos.....	36
Tabela 4–Coeficiente de atrito para vários tipos de terrenos.....	37
Tabela 5–Produção de biogás por resíduos agropecuários.....	46
Tabela 6–Principais variáveis relacionadas à biomassa residual.....	47
Tabela 7–Poder calorífico inferior de combustíveis gasosos.	48
Tabela 8 - Equivalência energética do biogás (1 m³) comparada a outras fontes de energia.	49
Tabela 9 – Planilha de cálculo do volume de carga.....	53
Tabela 10 – Equação para o cálculo das dimensões do biodigestor.....	53
Tabela 11 – Dados do consumidor de redução de consumo.	55
Tabela 12 – Custo de energia elétrica por número de suínos.	57
Tabela 13 – Relação de consumo de energia mensal e anual.....	61
Tabela 14 – Relação de materiais - Solar.	62
Tabela 15 – Relação da geração de energia mensal.....	63
Tabela 16 – Comparativo entre valores.....	64
Tabela 17 – Relação de materiais - Eólico.....	65
Tabela 18 – Relação da geração de energia - aerogerador 1.	66
Tabela 19 – Relação da geração de energia -aerogerador 2.	67

Tabela 20 – Comparativo entre valores.....	67
Tabela 21 – Valor médio de PLD do mês de Novembro.	69
Tabela 22 – Volume de carga diária para suinocultura.....	69
Tabela 23 – Dimensões do biodigestor.....	70
Tabela 24 – Características do grupo gerador.....	70
Tabela 25 – Valores referentes aos fatores analisados (PLD = 822,83).	71
Tabela 26 – Valores referentes aos fatores analisados (PLD = 160,00).	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Objetivos.....	14
1.1.1	Objetivo Geral.....	14
1.1.2	Objetivo Específico	15
1.2	Justificativa	15
1.3	Metodologia	15
1.4	Divisão do Trabalho	16
2	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	17
2.1	Aspectos teóricos fundamentais.....	17
2.1.1	Histórico.....	17
2.1.2	Funcionamento.....	17
2.1.3	Elementos do Sistema	18
2.2	Aspectos de cálculo	21
2.2.1	Variáveis relacionadas ao módulo.....	21
2.2.2	Variáveis relacionadas ao inversor	22
2.2.3	Compatibilidade do sistema.....	22
2.2.4	Potência do Painel Solar Fotovoltaico.....	23
2.2.5	Energia gerada	24
2.3	Aspectos de análise para projeto	25
2.3.1	Características Elétricas	25
	Consumo:.....	25
	Demandas:	25
2.3.2	Características Físicas e de Operação.....	26
	Espaço disponível.....	26
	Direção do painel	26
	Horário de Trabalho	26
3	ENERGIA EÓLICA	27
3.1	Aspectos Teóricos Básicos	27
3.1.1	História da energia eólica.....	27

3.1.2	Funcionamento.....	28
3.1.3	Fatores relacionados à energia do vento.....	30
3.1.4	Função de Distribuição de Weibull	31
3.1.5	Análise do solo.....	34
3.1.6	Os aerogeradores	38
3.1.6.1	Turbinas com Eixo Horizontal	39
3.1.6.2	Turbinas com eixo vertical.....	40
4	BIOGÁS.....	43
4.1	Histórico.....	43
4.2	Biogás - Definição	43
4.3	Obtenção do biogás.....	44
4.3.1	Biogás na suinocultura	45
4.4	Fatores que influem na produção do biogás.....	46
4.5	Poder calorífico	48
4.6	Utilização do biogás	49
4.6.1	Geração de energia elétrica a partir do biogás	50
4.7	Biodigestor	50
4.8	Modelos de biodigestor	51
4.8.1	Biodigestor modelo Canadense.....	52
4.8.2	Grupo Gerador	54
5	ANÁLISE PRÁTICA	54
5.1	Características dos objetos de análise.....	55
5.1.1	Características do caso de redução de consumo	55
5.1.2	Características do caso de geração de energia	56
5.2	Simulação de geração	57
5.3	Análise tarifária e normativa.....	60
5.3.1	Tarifas de baixa tensão.....	60
5.3.2	Tarifas de alta tensão.....	60
5.3.3	Bandeiras tarifárias	60
5.4	Estudo de caso	60
5.4.1	Caso 1	61
5.4.1.1	Compensação Fotovoltaica	61
5.4.1.2	Compensação Eólica	65

5.4.2 Caso 2.....	68
6 CONCLUSÃO.....	72
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

A demanda por energia elétrica atualmente se encontra em crescente processo de crescimento, fator este relacionado com o aumento populacional e tecnológico atual. Este consumo é sustentado grandemente por fontes não renováveis e poluentes.

No setor elétrico, as fontes de geração básicas como termoelétricas ou até mesmo nucleares operam por todo o mundo, devido a sua confiabilidade e grande capacidade de geração. Porém estas fontes possuem impactos ambientais e econômicos que reduzem a atratividade das mesmas.

Outra importante forma de geração utilizada é a hidrelétrica, a qual possui um custo de geração reduzido se comparado com as supracitadas. Há divergências sobre o impacto ambiental produzido pela mesma, pois ela utiliza uma fonte renovável de energia (energia potencial da água), porém inutiliza uma grande área, a qual é alagada para que ocorra o acúmulo da sua fonte primária de energia além de emitir gases poluentes advindos da decomposição dos restos orgânicos existentes nas áreas alagadas.

Além destes fatores, estas fontes tradicionais de energia elétrica operam de maneira centralizada, com grandes geradores que distribuem a energia por todo o território, havendo perdas de energia na transmissão da mesma.

Devido a estes fatores, as fontes de energia renováveis tais como: Fotovoltaica, Eólica e por Biogás se tornam de grande valia para reduzir os impactos das fontes de geração de energia elétrica tradicionais, possibilitando a entrada da geração distribuída no sistema elétrico de potência. Com isso é possível obter redução das perdas na transmissão e distribuição de energia, além de dar maior confiabilidade ao Sistema Interligado Nacional.

Estas fontes de geração devido a suas características de operação não liberam gases poluentes, contribuindo assim para a redução do efeito estufa.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo Geral*

O objetivo geral deste trabalho é abordar sobre as três fontes de energia renovável que possuem o maior potencial de utilização na geração distribuída, divulgando suas características físicas e de projeto, além de incentivar sua utilização como forma de obtenção de energia.

1.1.2 *Objetivo Específico*

Realizar um estudo sobre a teoria que rege as fontes de energia solar, eólica e biogás por meio de estudos bibliográficos e fontes diversas de estudo, casos publicados em dissertações, artigos científicos, livros e páginas da rede mundial de computadores (internet).

Obter informações dos fatores externos que influenciam na disponibilidade da produção das fontes estudadas, como por exemplo, tipos de culturas para o biogás, os fatores climáticos para a produção eólica e a irradiação e temperatura para a solar. Consequentemente, utilizar estas informações para realizar o correto dimensionamento de cada sistema de geração.

Utilizar as informações básicas dos materiais estudados e a partir disto fazer simulações de casos reais para diferentes situações com as fontes de geração abordadas no trabalho.

Apresentar os passos para o dimensionamento básico e para a avaliação da viabilidade de cada uma das fontes em estudo.

1.2 **Justificativa**

A geração distribuída vem tomando espaço no desenvolvimento do país, tornando-se uma das maneiras de redução do impacto do risco hidrológico na matriz elétrica brasileira. As fontes de geração de energia renovável, aliadas ao seu baixo impacto ambiental e possibilidade de trabalhar com gerações em pequeno porte distribuídas nos consumidores se torna atrativo para o Sistema Interligado Nacional (SIN), aliviando o mesmo.

Há também a questão da redução de perdas no transporte de energia para geradores próximos ao consumidor, que é o caso de compra de energia no mercado livre intermediado pela CCEE, podendo essa geração também ser de baixo impacto pela utilização de fontes de energia alternativa, além da possibilidade de aproximar a mesma da carga em questão.

Visando estas questões, o trabalho será desenvolvido para demonstrar algumas soluções para os mesmos, abordando características teóricas e técnicas das fontes de energia renovável existentes.

1.3 **Metodologia**

A metodologia utilizada neste trabalho foi a de realizar uma extensa pesquisa bibliográfica, buscando informações técnicas e de utilização praticados três sistemas de geração

(solar, eólica e biogás). Com o conhecimento das necessidades para o projeto, foi realizado então o estudo de um caso real e outro fictício levando em consideração as características próprias de cada um.

1.4 Divisão do Trabalho

O presente trabalho se divide em 5 capítulos. No primeiro capítulo foram descritos a contextualização do assunto, o objetivo geral e específico, a justificativa e a divisão do trabalho.

Os capítulos 2, 3 e 4 apresentam os fundamentos teóricos à realização deste estudo. São abordados os conceitos básicos sobre a geração fotovoltaica, eólica e por biogás, necessários para o dimensionamento da geração de energia.

No capítulo 5 haverá o estudo de casos com exemplos de projetos de geração para redução de consumo e geração para o mercado livre.

No capítulo 6 estão as conclusões do trabalho.

2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

2.1 Aspectos teóricos fundamentais

2.1.1 *Histórico*

O efeito fotovoltaico teve seu início em 1839 pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel que ao conduzir experiências eletroquímicas, por acaso, reparou que a exposição à luz de eletrodos de platina ou de prata dava origem ao efeito fotovoltaico.

Já em 1873, Willoughby Smith descobriu o efeito fotovoltaico no selênio através de um acidente inesperado.

Entre 1880 e 1900, o efeito fotovoltaico foi então trabalhado para produzir células fotovoltaicas de selênio, descoberta essa atribuída à Fritts e Uljanin.

Com o decorrer do desenvolvimento da tecnologia, várias conquistas foram obtidas no segmento de energia solar, sendo destacáveis: a criação da teoria da junção P-N (entre 1950 e 1954 por Shockley), o desenvolvimento da célula solar de silício (em 1954 por Pearson, Fuller e Chapin) e a difusão de teorias de células solares (entre 1960 e 1962 por Piann e Roosbroeck).

A partir destas ocorrências históricas, muitas outras conquistas puderam ser obtidas, como a criação das células de silício amorfo (1976) e ampliação do rendimento das células solares, como a obtenção de células de silício monocristalino com eficiência de 24,7% (1998).

“Em 1998, a produção mundial de células fotovoltaicas atingiu a marca de 150MWp, sendo o silício quase absoluto dentre os materiais utilizados. O grande salto no desenvolvimento do mercado fotovoltaico resultou do rápido aumento da produção chinesa, observado desde 2006.” (CRESESB, 2014).

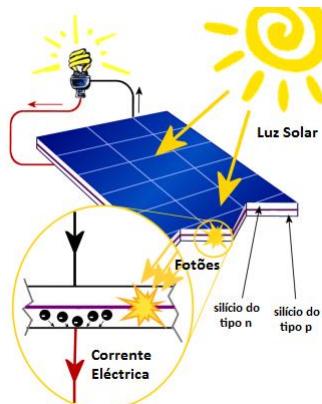
2.1.2 *Funcionamento*

De acordo com (NASCIMENTO, 2004), a obtenção de energia a partir da radiação solar se dá pelo efeito fotovoltaico que pode ser visualizado na Figura 1. Este efeito é obtido a partir da dopagem de silício, alterando assim sua característica básica e formando duas camadas de material, uma de silício tipo N (com portadores de carga negativa) e outra de silício tipo P (com

portadores de carga positiva). Estas duas camadas são unidas de modo a formar uma junção P-N, que forma um campo elétrico entre o silício tipo N e o tipo P.

Ao excitar o material com a incidência de fôtons, os íons entram em movimento e seguem o fluxo da camada “P” para a camada “N” (orientados pelo campo elétrico da camada P-N), produzindo assim corrente elétrica no material.

Figura 1 - Esquema do efeito fotovoltaico.



Fonte: Google.

2.1.3 *Elementos do Sistema*

O sistema fotovoltaico é composto por um conjunto de equipamentos que possam auxiliar o mesmo para que faça sua devida operação, os quais serão explicados a seguir:

- **Painel Solar Fotovoltaico**

Principal componente do sistema é o responsável pela transformação da energia solar em elétrica. O painel é composto por um conjunto de módulos, os quais contêm grupos de células fotovoltaicas ligadas em série e/ou paralelo (VILLALVA, 2013).

- **Inversor de Frequência**

A corrente produzida pelo painel solar não pode ser conectada diretamente à carga (ou rede), devido à sua variação de magnitude conforme a variação da radiação solar e a forma de onda na saída (contínua). Devido a isso, são utilizados os conversores de frequência, estes que tem a função de transformar a onda de frequência nula em uma compatível com a rede, além de controlar os níveis de corrente e tensão para o melhor rendimento do sistema

Existem diversas topologias para este componente, de modo a buscar a melhor eficiência do mesmo e também algumas características interessantes para maior robustez e controle, como por exemplo: Isolação galvânica, controle de elevação e redução de tensão e sistema de controle para a busca do melhor ponto de potência para o painel (MPPT – Maximum Power Point Tracker) (VILLALVA, 2013).

• Bateria

Devido a sua capacidade de armazenagem, as baterias têm bastante utilidade em sistemas nos quais a ausência da geração pode causar algum prejuízo devido ao fato de a fonte primária dos painéis solares fotovoltaicos, ser de natureza estocástica, diferente de sistemas com geração termelétrica por exemplo.

Há vários tipos de baterias no mercado, sendo necessária a utilização de baterias com alta capacidade de descarga sem comprometer sua vida útil. Para isso, existem algumas baterias especiais que suprem essas necessidades, tais como:

- Bateria de chumbo ácido estacionária com eletrólito líquido:

Muito difundido no mercado devido a sua utilização em veículos automotivos, foi adaptada para sistemas de geração fotovoltaica, tendo sua área de superfície aumentada para não danificar a bateria.

Foram desenvolvidas para a utilização por longo tempo e podem ser descarregadas até atingir uma porcentagem menor de sua carga máxima sem haver danos (VILLALVA, 2013).

- Bateria de chumbo ácido com eletrólito em gel

Suas características são semelhantes à de chumbo ácido com eletrólito líquido, porém é considerada uma versão melhorada, pois possui maior vida útil, com um maior número de ciclos de carga e descarga e a possibilidade de ser usada em locais de pouca ventilação, devido ao fato de não liberar gases durante seu funcionamento.

Algumas desvantagens desse tipo de bateria é sua alta sensibilidade a sobrecargas e devido a sua selagem, não é possível verificar seu nível de carga através da medição da concentração do ácido, apenas pela tensão nos terminais (VILLALVA, 2013).

- Baterias de NiCd (Níquel-Cádmio) e NiMH (Níquel-Metal-Hidreto)

Estas tecnologias são mais caras do que as de chumbo ácido, porém possuem baixo coeficiente de auto descarga, suportam variações de temperatura elevadas e permitem cargas mais profundas, cerca de 90%.

Geralmente, não são utilizadas em sistemas fotovoltaicos devido ao seu alto custo, exceto em locais com pouco espaço e que necessite de alta confiabilidade com pouca manutenção (VILLALVA, 2013).

- Bateria AGM (Absorbed Glass Mat)

Possui características semelhantes a de chumbo ácido com eletrólito em gel, com a vantagem de permitir ciclos de descarga mais profundos. Sua desvantagem é o alto custo sendo pouco encontrada no mercado, em comparação com as de chumbo ácido (VILLALVA, 2013).

- **Controlador de carga**

Diretamente responsável pela vida útil das baterias, evita que a bateria seja sobrecarregada ou descarregada excessivamente. Alguns possuem também o mecanismo de rastreamento do ponto de máxima potência, aumentando assim a eficiência do mesmo.

As funções do controlador de carga são:

- Proteção de sobrecarga:

Responsável por monitorar o valor da tensão nos terminais da bateria, impedindo o carregamento caso a tensão de carga seja atingida desconectando o painel solar do sistema ao atingir o nível máximo (VILLALVA, 2013).

- Proteção de descarga excessiva

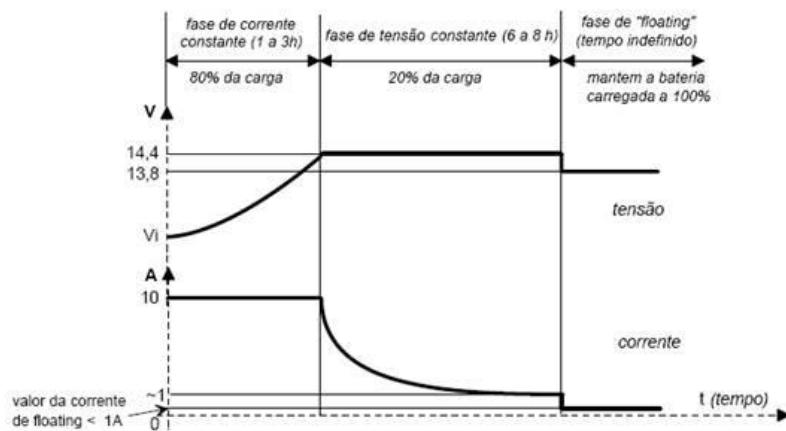
Também conhecida por função de desconexão com baixa tensão, é o recurso realizado pelo controlador de carga a bateria atinge o nível crítico de carga, ou seja, quando a tensão está abaixo do nível crítico permitido. Nesse caso o consumo de energia é interrompido para a proteção da bateria (VILLALVA, 2013).

- Gerenciamento da carga da bateria

Método de controle do carregamento da bateria respeitando o perfil natural de carga.

Este sistema é disponibilizado apenas em controladores de carga mais sofisticados, devido à complexidade necessária para a realização do mesmo, sendo necessária a utilização de algoritmos de carga com múltiplos estágios. Um exemplo de perfil de carga para uma bateria estacionária é apresentado na Figura (2).

Figura 2–Curva de um carregador de bateria.



Fonte: http://www.ragio.com.br/images/baterias_21.jpg

2.2 Aspectos de cálculo

Conhecidas as tecnologias e a teoria acerca do sistema fotovoltaico, é necessário que se tenha um conhecimento dos aspectos para o cálculo de suas necessidades adequando assim o sistema de maneira segura e confiável, com o melhor proveito do mesmo. Para isso, vê-se necessário o conhecimento dos aspectos de cada elemento individualmente.

2.2.1 Variáveis relacionadas ao módulo

Conforme (CRESESB, 2014), devido à variedade de tamanhos e tecnologias de painéis solares, algumas das características básicas para análise são visualizadas abaixo:

- **Tensão de circuito aberto**

Quando não há carga conectada ao circuito, de modo a existir um valor de resistência muito elevado (abertura do circuito) é considerado que o mesmo encontra-se “aberto”, tendo

assim corrente nula e o valor de tensão tende a se elevar de modo a obter o máximo do gerador (VOC).

- **Corrente de curto circuito**

Quando há uma queda de tensão muito pequena no circuito (baixa resistência elétrica), o valor da corrente tende a se elevar grandemente (corrente de curto-circuito – ISC), obtendo um valor alto relacionado à disponibilidade do gerador.

- **Ponto de máxima potência**

O valor de máxima potência é obtido a partir da relação $P=VMP*IMP$. Idealmente este valor seria facilmente obtido, porém com as variações de temperatura e carga, os valores de corrente e tensão também variam, fazendo com que o valor de máxima potência não seja mais possível de se obter sem um sistema de controle adequado.

Para existir segurança no sistema fotovoltaico (painei-inversor), é necessário que sejam conhecidos esses valores máximos de corrente e tensão, para que seja analisada a disponibilidade do mecanismo eletrônico para suportar essas grandezas.

2.2.2 *Variáveis relacionadas ao inversor*

Para as diversas topologias de inversor e de acordo com o fabricante, são exigidos valores máximos de corrente e tensão para que o equipamento não seja danificado. Estes são:

- Corrente de entrada;
- Tensão de entrada;

2.2.3 *Compatibilidade do sistema*

Para que o sistema opere com confiabilidade e eficiência, é necessário que se faça o cálculo de compatibilidade entre Painel Solar Fotovoltaico e Conversor, levando em conta as variáveis dos mesmos.

Para isso são realizados os seguintes cálculos:

- Calcular V_{oc} na máxima temperatura ($T_{max, cell}$) de modo a não ultrapassar a mínima tensão de entrada.

$$V_{oc_{tmax,cell}} = \left[V_{oc_{cell}} + V_{oc_{cell}} * (tmax - tSTC) * \left(\frac{\text{Temperatura coeficiente\%}}{100} \right) \right] > MinVin$$

- Calcular V_{oc} na menor temperatura ($T_{min,cell}$) de modo a não ultrapassar a máxima tensão de entrada.

$$V_{oc_{tmin,cell}} = \left[V_{oc_{cell}} + V_{oc_{cell}} * (tmin - tSTC) * \left(\frac{\text{Temperatura coeficiente\%}}{100} \right) \right] > MaxVin$$

- Calcular o V_{mp} no $t_{max,cel}$ para verificar que V_{mp} se vai encontrar com a mínima tensão para rastreamento de MPP.

$$V_{mp_{tmax,cell}} = \left[V_{mp_{cell}} + V_{mp_{cell}} * (tmax - TSTC) * \left(\frac{\text{Temperatura coeficiente\%}}{100} \right) \right] > MinVmp$$

- Calcular V_{mp} para $t_{min,cell}$ para verificar que V_{mp} não vai ultrapassar a máxima tensão do MPP.

$$V_{mp_{tmin,cell}} = \left[V_{mp_{cell}} + V_{mp_{cell}} * (tmin - TSTC) * \left(\frac{\text{Temperatura coeficiente\%}}{100} \right) \right] > MaxVmp$$

- Calcular I_{sc} para $t_{max,cell}$ para verificar se não vai ultrapassar a corrente máxima do MPP.

$$V_{mp_{tmin,cell}} = \left[I_{sc_{cell}} + I_{sc_{cell}} * (tmax - TSTC) * \left(\frac{\text{Temperatura coeficiente\%}}{100} \right) \right] > MaxVmp$$

Observa-se que, para arranjos de módulos é necessário calcular a tensão do mesmo multiplicando a magnitude da grandeza de um módulo para o arranjo (encontrar a tensão resultante do ramo em série e a corrente resultante do ramo em paralelo) (CARNEIRO, 2009).

2.2.4 Potência do Painel Solar Fotovoltaico

Cada fabricante indica o valor de potência obtido por testes nas condições STC e/ou NOCT, indicando o mesmo pela potência de pico (unidade - Wp), que é a potência para as condições do STC. É importante salientar que STC é referente a 1000 w/m² de irradiação com 1,5 AM e NOCT com características especificadas no teste.

Com os dados dos fabricantes em mãos é necessário saber qual potência deve ser entregue ao consumidor de modo a suprir a energia demandada pelo mesmo. Para isso é utilizado o cálculo abaixo, levando em consideração a consumo, horas de sol e perdas.

$$P_m = \frac{L}{HSP \times Red1 \times Red2} [2.2.4.1]$$

Onde:

P_m (Wp) - Potência do painel fotovoltaico

L (Wh/dia) - Quantidade de energia consumida diariamente no mês

HSP (h/dia) – Horas de sol pleno no plano do painel fotovoltaico no mês

Red1 (%) – Fator de redução (derating) da potência dos módulos fotovoltaicos, em relação ao seu valor nominal, englobando os efeitos de: i) um eventual acúmulo de sujeira na superfície ao longo do tempo de uso; ii) degradação física permanente ao longo do tempo; iii) tolerância de fabricação para menos, em relação ao valor nominal; iv) perdas devido à temperatura. Este fator tem por padrão o valor de 0,75 para módulos fotovoltaicos de c-Si (CRESESB, 2014);

Red2 (%) – Fator de redução da potência devido a perdas no sistema, incluindo fiação, controlador, diodos etc. A este fator é recomendado utilizar o valor de 0,9 (CRESESB, 2014).

Porém, para maior praticidade na análise de um projeto utiliza-se o valor de energia gerada por painel, fazendo assim sua subtração para com o consumo analisado.

2.2.5 *Energia gerada*

De acordo com (CRESESB, 2014) o resultado obtido da equação [2.2.4.1], a energia gerada por cada painel é obtido pela equação:

$$E_{pv} = P_m * HSP * Red1 * Red2 [2.2.5.1]$$

Observando que esta energia é relacionada à radiação de 1000W/m², sendo necessária em muitos casos analisar a hora de radiação máxima do local, que pode ser menor do que o valor em sol pleno. Assim a fórmula é substituída por:

$$E_{pv} = I * HS * \eta_{pv} * Red1 * Red2 [2.2.5.2]$$

Sendo:

I (W/m²) – Irradiação solar (mínima)

HS (h/dia) – Horas de sol

2.3 Aspectos de análise para projeto

2.3.1 Características Elétricas

Consumo:

Quantidade de energia consumida pelos aparelhos elétricos durante um determinado período de tempo. Sua unidade de medida é o kWh (Quilowatt-hora, unidade mais utilizada) ou MJ (Megajoule), sendo analisado para um determinado período de tempo (dia, mês, ano). A Tabela (1) mostra um exemplo de cálculo de consumo por aparelho.

Tabela 1–Exemplo de listagem de potências para equipamentos de uma residência.

Equipamento	Potência (kW)	Tempo de uso (horas/dia)	Consumo (kWh/dia)
Lâmpada	40W	10	40*10=400
Computador	200W	5	200*5=1000
Televisão	250W	6	250*6=1500
Total	490W		2900

Fonte: Elaborado pelo autor.

Geralmente, o consumo é obtido pelos medidores de energia que a distribuidora utiliza, sendo explicitado na conta de energia elétrica do consumidor o valor mensal e a média diária do mesmo. Com isso, esse cálculo é utilizado para casos isolados da rede de energia.

Demandas:

Potência demandada do consumidor pela rede para o funcionamento dos equipamentos elétricos de maneira que o sistema elétrico esteja adequado ao mesmo, dando segurança e confiabilidade para a operação de conexão do consumidor. A demanda é a quantidade de potência real que poderá ser utilizada instantaneamente, ou seja, quantos aparelhos elétricos serão conectados e utilizados simultaneamente em um instante de tempo.

Com relação à leitura desse valor pelas distribuidoras, é analisado a cada quinze minutos o valor de consumo e a partir dele calcula-se a demanda da seguinte maneira:

$$Demand\alpha = \frac{Consumo(kWh)}{\frac{1}{4}(h)} [2.3.1.1]$$

2.3.2 *Características Físicas e de Operação*

A seguir serão apresentadas as análises básicas para a disponibilidade de utilização do sistema de geração fotovoltaica no local desejado:

Espaço disponível

Os módulos solares possuem dimensões que precisam ser analisadas, pois em alguns casos devido à necessidade de um elevado número de painéis o espaço pode não ser suficiente para a implantação dos mesmos.

Direção do painel

Um fator muito importante para o funcionamento eficiente do sistema é a necessidade de ele estar direcionado para a região com maior incidência de radiação solar, pois assim é possível obter dele o máximo de potência.

Horário de Trabalho

Para o setor comercial e industrial alimentado em média tensão o horário de funcionamento (período de maior utilização dos equipamentos elétricos) é um fator importante, pois pode ser que não coincida com o período de maior incidência de radiação solar e para casos onde se deseja reduzir a demanda contratada, o sistema fotovoltaico poderá não surtir o efeito desejado.

Nesses casos, uma possibilidade é a utilização de um sistema de baterias para aproveitar a energia captada durante o tempo complementar ao de operação.

3 ENERGIA EÓLICA

3.1 Aspectos Teóricos Básicos

3.1.1 *História da energia eólica*

A origem de algum dispositivo chamado eólico não é clara, havendo especulações contraditórias sobre a origem dos moinhos de vento. É sabido que a primeira menção ao uso de energia a partir do vento possui origem no Oriente: Afeganistão, Índia, Tibete e Pérsia. Há também autores que citam a descoberta de restos de um moinho de vento no Egito próximo a Alexandria com suposta idade de 3000 anos. Também aponta-se a máquina pneumática e o órgão acionado pelo vento de Heron de Alexandria, há cerca de 2000 anos.

Contudo, com estas e outras estórias, a utilização de moinhos de vento foi aperfeiçoada e colocada em princípios científicos por Poul La Cour, professor de ciências naturais e matemática em Askov, Dinamarca. Ele a partir de diversos experimentos e com a evolução da eletricidade na época foi o pioneiro a fazer uso da geração de eletricidade em corrente contínua (CC) por meio do vento, isso no século XIX.

Devido aos estudos desenvolvidos por La Cour, foram criadas várias turmas que trabalhavam com o sistema de geração eólica. Dentre seus alunos, houve destaque no trabalho do engenheiro dinamarquês Johannes Juul, que em 1957 construiu a turbina de três pás com potência de 200kW fornecendo corrente alternada para a companhia dinamarquesa SEAS, entre 1958 e 1967, atingindo um fator de 20% de capacidade em alguns anos. Esta foi a primeira turbina em corrente alternada do mundo.

Outro país com forte tradição no uso de energia eólica é a Alemanha, com o desenvolvimento científico da tecnologia a partir de nomes como Albert Betz, que formulou uma base teórica para o formato aerodinâmico das pás do rotor eólico que é válida até hoje.

Outro avanço obtido no setor eólico foi introduzido por Hermann Honnef em 1932 com a proposta da geração eólica offshore.

Entre 1930 e 1940 houve muita atividade teórica pela Alemanha na área eólica, em grande parte devido à busca do Reich pela autossuficiência no fornecimento de combustível e energia.

Nos Estados Unidos, a partir do desenvolvimento das turbinas de Marcellus Jacobs e Joseph Jacobs, nasceu um dos expoentes na geração de energia eólica, uma pequena turbina com um rotor de três pás (semelhantes às pás de avião) que acionava diretamente um gerador

CC de baixa velocidade. Na década de 1950, a empresa dos irmãos pode ter construído aproximadamente 50.000 máquinas eólicas.

Posteriormente, os avanços foram sendo obtidos por vários pesquisadores, sendo também pesquisadas pela NASA.

Com esses acontecimentos históricos, foram dados grandes passos para a geração atual de energia eólica.

3.1.2 *Funcionamento*

Um sistema de geração é considerado eólico quando ocorre a transferência de energia cinética em energia mecânica (obtida pela rotação das pás) e posteriormente elétrica (BURTON, 2001).

O movimento do ar, originado a partir de variações de pressão ao longo da superfície terrestre, produz energia sendo a energia cinética desse movimento considerada energia eólica. Sua equação pode ser representada por:

$$E_c = \frac{1}{2} * m * v^2 [3.1.2.1]$$

Onde: m = Massa de ar

v = Velocidade do ar

Com a relação de energia, é possível conhecer a potência disponível do vento derivando a energia cinética um determinado intervalo de tempo. Assim obtém-se:

$$P = \left(\frac{\partial E_c}{\partial t} \right) = (m * v^2) / 2 [3.1.2.2]$$

Substituindo “m” por “ ρAv ”, tem-se:

$$P = (1/2)\rho Av^3 [3.1.2.3]$$

Onde: P = Potência disponível do vento (W)

ρ = massa específica do ar (kg/m^3)

Equação esta utilizada para demonstrar a potência disponível do vento. Porém nem toda potência existente pode ser transformada em energia elétrica, pois parte da energia é transformada em calor e ruído, havendo assim perda na transferência de energia e consequentemente na potência do sistema.

Essa transferência de energia é relacionada ao impacto do vento nas turbinas e a área do rotor para captar a mesma.

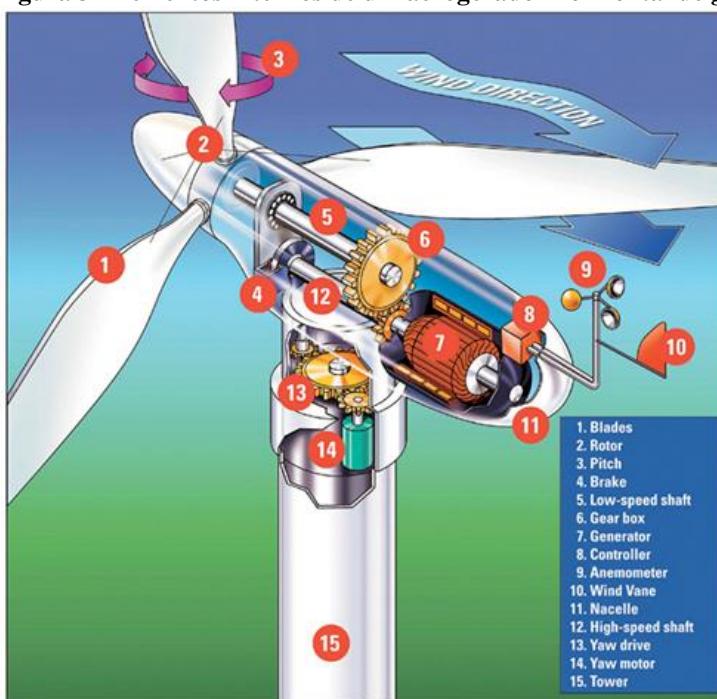
O limite de Lanchester-Betz-Joukowsky representa a quantidade máxima de potência que pode ser absorvida dos ventos, com a seguinte equação:

$$P_{max} = \frac{16}{27} * \left[\left(\frac{1}{2} \right) \rho * A * v^3 \right] = 0,592593 * P = 59,3\% * P [3.1.2.4]$$

Existem outras teorias de eficiência, sendo algumas de suas principais: Modelo GGS e Limite de Sabinin. Tais teorias divergem do valor de 59,3% considerado pela lei de Betz, porém a maioria dos projetistas de geradores eólicos considera o limite de Betz o correto.

Com a energia obtida pelos aerogeradores, estes transformam a mesma em energia mecânica que, ao rotacionar um eixo conectado a um gerador, produz eletricidade.

Figura 3–Elementos internos de um aerogerador horizontal de grande porte.



Fonte: <http://procobre.org/pt/media-center/imagens/energia/#!prettyPhoto>

A partir desse conhecimento, são analisados outros fatores para o projeto adequado do sistema, tais como: Características dos ventos, análise do solo, características dos aerogeradores e suas tecnologias.

3.1.3 Fatores relacionados à energia do vento

O vento atende às leis dos gases perfeitos dadas pela equação de Clayperon, devido a sua característica de fluído, representada por:

$$PV = n * R * T [3.1.3.1]$$

Onde: n=número de mol do gás (ar)

R = Constante do ar (287J/kg*K)

T = temperatura (K)

Como pode ser visto pela equação (3.1.3.1) há uma relação direta entre a massa específica do ar e o potencial disponível do vento. Em contrapartida, há uma dependência da massa específica do ar com a temperatura e pressão atmosférica, conforme mostra a seguinte equação:

$$\rho = P_a / (R * T) [3.1.3.2]$$

Sendo, P_a a pressão atmosférica. A massa específica do ar (ρ) possui relação com a temperatura do ambiente e altitude, relação está especificada por:

$$\rho = \left[353,4 * \left(1 - \frac{z}{45271} \right) * 5,2624 \right] / (273,15 + T) [3.1.3.3]$$

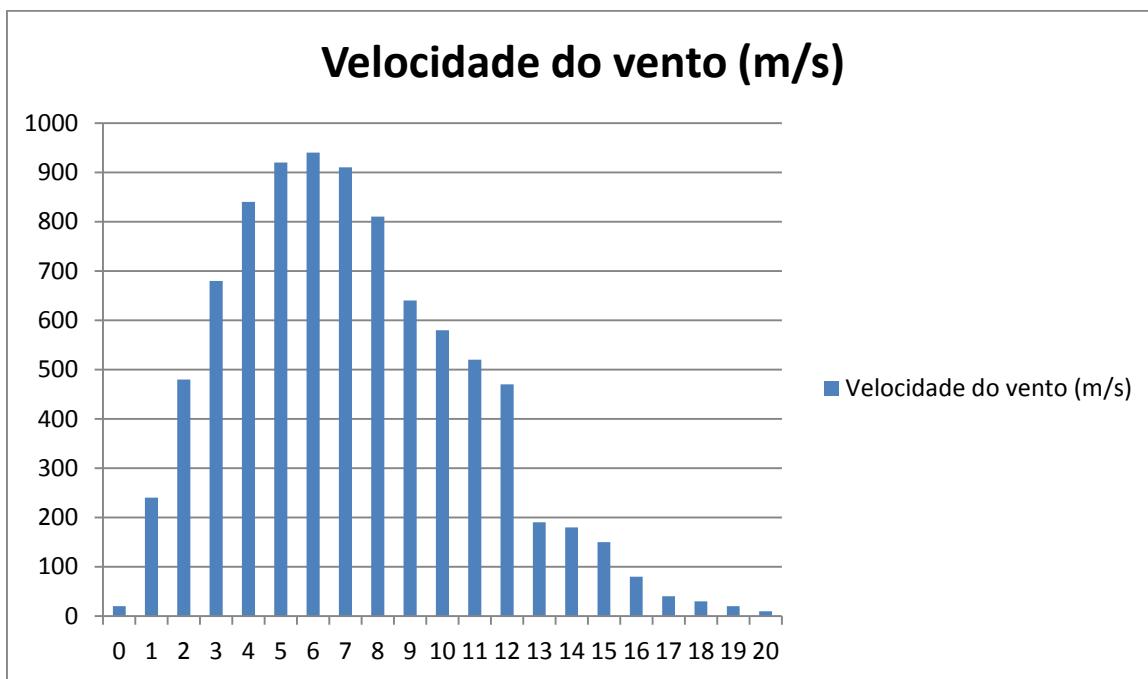
De modo que: T= temperatura do ambiente (°C)

z = altitude do local (m)

Contudo, é possível visualizar que a potência do vento é de natureza estocástica devido a aleatoriedade da mesma. “O vento, por exemplo, tem características estocásticas e sua velocidade é uma variável aleatória contínua” (MILTON, 2011). Devido a isso, para se conhecer melhor o comportamento do vento de modo a aproveitar de maneira correta sua

disponibilidade, é necessário discretizar os dados, que podem ser visualizados na forma de histogramas conforme pode ser visto na Figura (4).

Figura 4– Exemplo de histograma relacionando horas por ano com velocidade do vento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição da velocidade do vento pode ser representada por uma função de densidade de probabilidade, dada por:

$$V = \int_0^{\infty} f(v)dv [3.1.3.4]$$

“Em estatística, há dois tipos de distribuição de probabilidade: distribuição contínua e distribuição discreta. A função de densidade de probabilidade que mais se ajusta à distribuição do vento é chamada de distribuição de Weibull, que estudaremos mais adiante.” (MILTON, 2011).

3.1.4 Função de Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é utilizada para fazer a representação da probabilidade de ocorrência da velocidade média do vento, podendo ser calculada pela expressão:

$$f(V) = \left(\frac{k}{A}\right) * \left(\frac{V}{A}\right)^{(k-1)} * e^{-(V/A)^k} [3.1.4.1]$$

Onde:

A = fator de escala (adimensional)

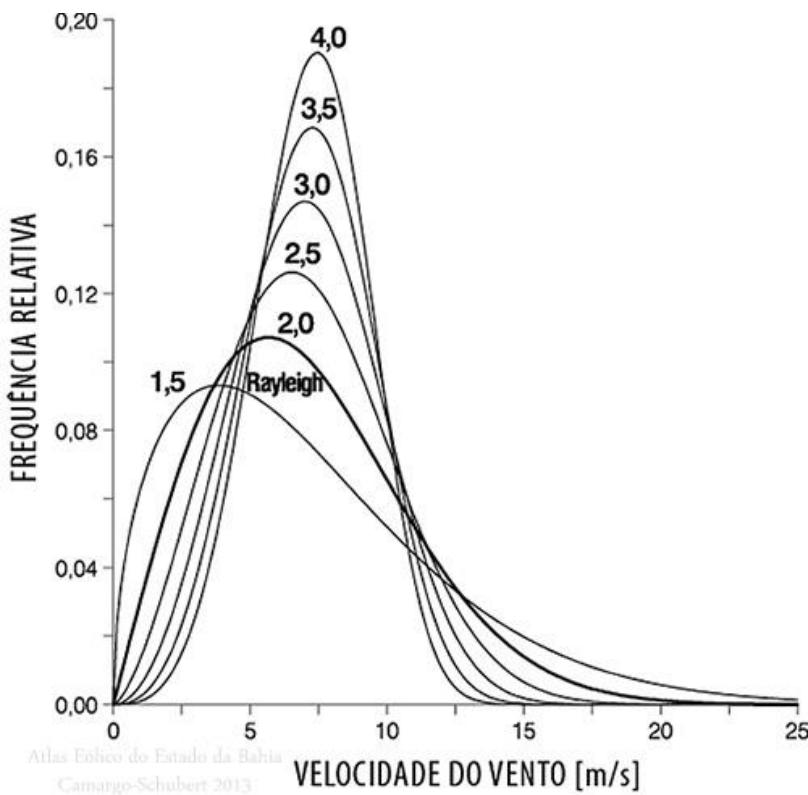
K = fator de forma (m/s)

V = velocidade do vento (m/s)

O fator de forma é então utilizado para alterar a função, para um fator de escala fixado.

Da Figura (5) é possível observar que, considerando que há pouca informação sobre o regime de ventos, utilizar k=2 é um bom ponto de partida devido a sua menor acentuação e probabilidade de ventos de intensidade moderada, se assemelhando ao regime padrão de ventos.

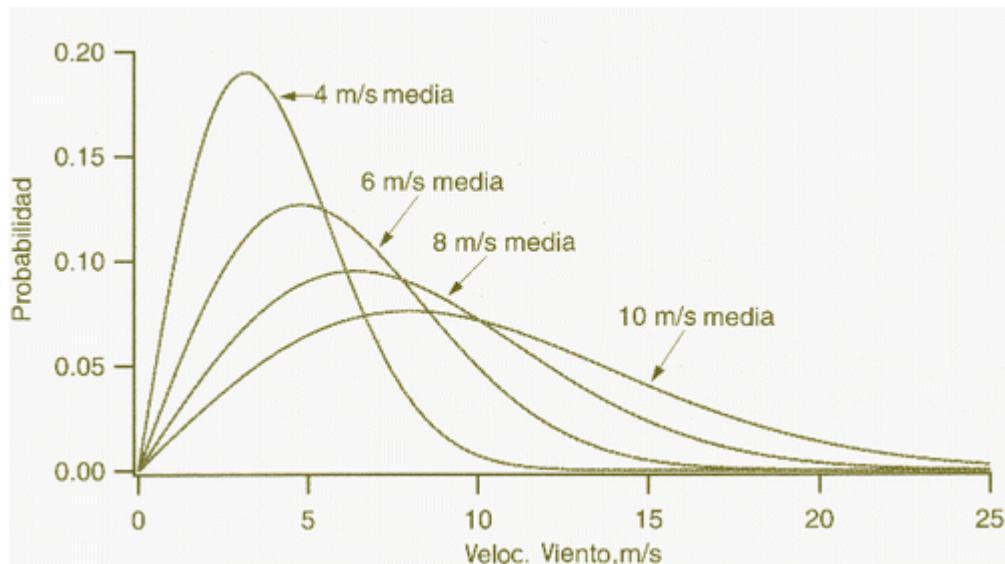
Figura 5– Exemplo de histograma gráficos de distribuição de Weibull e Rayleigh.



Fonte: http://www.secti.ba.gov.br/atlasWEB/apendice_p3.html

Também se vê necessário a análise do fator de escala, pois ao elevar esta grandeza a curva sofre alteração, caracterizando probabilidade de ocorrência de ventos com maior intensidade (aumenta a velocidade média), conforme pode ser visto na Figura (6).

Figura 6– Distribuição de Weibull variando o fator de escala



Fonte: <http://www.monografias.com/trabajos55/tren-de-fuerza-con-multiplicador/tren-de-fuerza-con-multiplicador2.shtml>

Portanto, a partir da equação [3.1.3.4] é obtida a velocidade média, que pode ser representada pela função densidade de probabilidade $f(v)$ devido a sua característica de distribuição de velocidade de vento (JERVELL, 2008). Substituindo-a na função de distribuição de Weibull, é obtido e com o auxílio de uma tabela de integrais chega-se a:

$$\bar{v} = \int v * f(v) dv = \int \frac{2*v^2}{A^2} * \exp \left[-\left(\frac{v}{A} \right)^2 \right] = \frac{\sqrt{\pi}}{2} * A \cong 0,886 * A [3.1.4.2]$$

Rearranjando,

$$A = \frac{2}{\sqrt{\pi}} * \bar{v} \cong 1,128 \bar{v} [3.1.4.3]$$

Fazendo uma substituição de equações, é obtida a distribuição de Rayleigh em termos da média da velocidade média:

$$f(v) = \frac{\pi * v}{2 * \bar{v}^2} * \exp \left[\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{\bar{v}} \right)^2 \right) \right] [3.1.4.4]$$

Em que:

\bar{v} = velocidade média do vento (m/s)

v = velocidade do vento (m/s)

“Embora a distribuição de Weibull resulte em uma boa representação do regime do vento em muitos locais, nem sempre isso acontece. Alguns locais que mostram um comportamento eólico

distinto no verão e no inverno podem ser representados por uma dupla distribuição de pico duplo de Weibull, com diferentes fatores de forma e escala.” (MILTON, 2011).

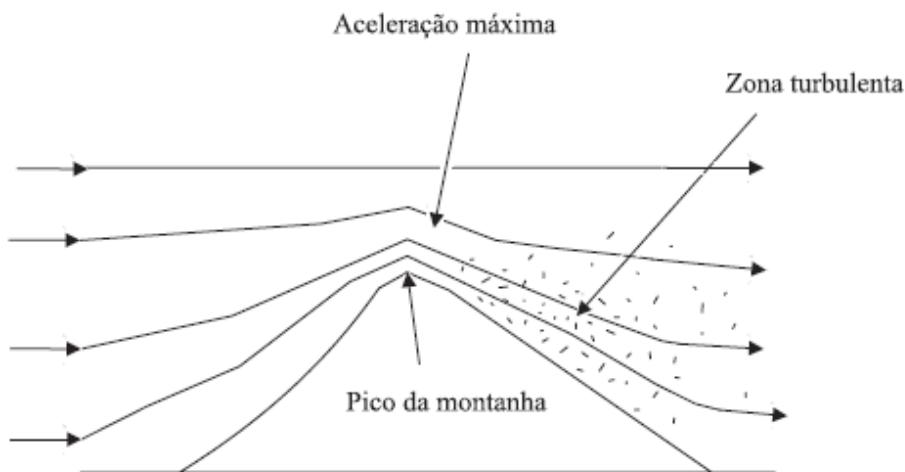
3.1.5 *Analise do solo*

“A orografia constitui um dos elementos mais importantes na caracterização do escoamento atmosférico de um dado local, dada a sua elevada dependência da complexidade do terreno em análise (terreno plano, elevações de declive suave ou terreno montanhoso).” (JERVELL, 2008).

As variações do solo percorridas pelo vento (montanhas, depressões, vales e “gargantas”) durante sua trajetória podem alterar as características do escoamento atmosférico de diferentes formas. A variação de temperatura também é um fator a se analisar, pois devido à relação entre diferença de pressão criada, o local pode sofrer influência de ventos em um sentido no período diurno e no sentido oposto ao anoitecer (JERVELL, 2008).

Um exemplo de interferência no escoamento do vento pode ser visto na figura (7):

Figura 7– Escoamento em uma montanha



Fonte: Estudo e influência das características do vento no desempenho de aerogeradores

Vê-se que ao subir a elevação da montanha, o vento é forçado a aumentar sua inclinação e considerando que os aerogeradores são projetados para receberem ventos horizontais até uma inclinação máxima sem ter o seu aproveitamento e segurança ameaçados (a partir do limite de segurança proposto pela norma IEC-61400-1) vê-se a necessidade de sua análise.

Outra necessidade de análise é a turbulência visualizada após o pico da montanha, quando o vento sofre um declive em sua inclinação. Esta região também não é proveitosa para os geradores eólicos pois a ocorrência de turbulência pode vir a reduzir sua produção de energia e trazer riscos à segurança do equipamento.

“Existem critérios gerais para a seleção de terrenos planos, tais estes satisfazendo as seguintes condições:

1 – A diferença de alturas entre o local da turbina e a sua envolvente não seja superior a 60m em toda sua extensão, num raio de 5,75km em torno da turbina.

2 – Nenhuma colina tenha um razão altura/largura superior a 1/50, numa distância de 4km a montante e a jusante da turbina”. (JERVELL, 2008).

O conjunto de elementos (árvores, arbustos, vegetação rasteira e pequenas construções) que causam resistência na superfície terrestre à passagem do escoamento, podendo originar mudança na direção e pequenas turbulências na superfície, é denominado rugosidade do solo.

A Tabela (2), de Troen e Petersen classifica a superfície quanto à rugosidade, dividindo-a em quatro partes. A coluna “I (10m)” representa a intensidade de turbulência a 10 metros de altura Z_0 para a classe analisada.

Tabela 2–Classificação da rugosidade da superfície de alguns tipos de terreno.

Classe	Descrição	Z_0 (m)	I (10 m)
0	Água (lagos e mares), areia suave ou neve	0,0001-0,001	0,08-1,10
1	Grama, fazenda com algumas construções ou árvores	0,01-0,03	0,14-0,17
2	Fazendas em terrenos mais abertos	0,05-0,10	0,18-0,21
3	Arbustos, árvores, subúrbios e pequenas cidades	0,20-0,40	0,25-0,30

Fonte: Troen (1989).

A rugosidade é medida em função do tamanho e de como ela está distribuída. Há uma relação empírica que determina o comprimento da rugosidade, sendo tal qual igual a:

$$Z_0 = 0,5 * (hS/A)[3.1.5.1]$$

Em que S é a seção transversal do elemento de rugosidade (m), h é a altura da rugosidade (m) e A é a área média da rugosidade (m^2). A variável Z_0 corresponde ao ponto-altura que o vento possui velocidade nula.

Caso haja um obstáculo de comprimento L, e com uma distância I entre um obstáculo e outro, a equação é representada por:

$$Z_0 = 0,5 * (h^2/I)[3.1.5.2]$$

Segundo, (MILTON, 2011) para que essa equação seja válida é necessário que duas condições sejam estabelecidas:

- 1 – o produto $h * L$ seja aproximadamente igual a S.
- 2 – o produto $I * L$ seja aproximadamente igual a A.

“A classificação de Troen e Petersen é apenas um indicativo da rugosidade. Nem sempre o terreno atende a tal classificação, podendo ocorrer situações intermediárias, em que acontece uma subdivisão em mais setores” (MILTON, 2011).

Existem dois modelos de análise do comportamento do vento dentro da camada-limite atmosférica: modelo exponencial e logarítmico. A primeira é a expressão conhecida por lei de potência ou fórmula a altitude de Helmann, dada por:

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha [3.1.5.3]$$

Sendo, V a velocidade do vento na altura H (m/s), V_0 a velocidade do vento na altura de referência H_0 e α o coeficiente de atrito (ou coeficiente de Helmann). Este último se relaciona com o terreno percorrido pelo vento. A Tabela (3) são mostrados alguns valores para o coeficiente de Helmann de acordo com as características do terreno.

Tabela 3–Coeficiente de atrito para vários tipos de terrenos.

Características do terreno	Coeficiente de atrito (α)
Calma superfície aquática ou solo suave	0,10
Grama alta ao nível do solo	0,15
Arbustos e cercas	0,20
Áreas rurais com muitas árvores	0,25
Pequenas cidades com árvores e arbustos	0,30
Grandes cidades com prédios elevados	0,40

Fonte: Rohatgi (1994).

“Na prática, o expoente α é altamente variável com a elevação, altura do dia, estação do ano, velocidade do vento, natureza do terreno, temperatura e muitos outros mecanismos mais ou menos complexos.” (JERVELL, 2008).

Outra equação, também difundida na bibliografia referente aos sistemas eólicos é dada por:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\ln(H/Z)}{\ln(H_0/Z)} [3.1.5.4]$$

Sendo Z denominado comprimento de rugosidade. “A validade dessa fórmula logarítmica é restrita à altura referente a camada de Prandtl próxima ao solo.” (MILTON, 2011).

Existem também duas coisas que devem ser levadas em consideração, sendo:

1 – Obstáculos: Obstáculos naturais e construções que encontram-se no caminho, reduzindo o espaço livre visto pela turbina. Devido a isso, o decréscimo da velocidade do vento é obtido com o seguinte cálculo:

$$P = \frac{[\text{área em espaço livre}]}{[\text{total da área vista pela turbina}]} = 1 - S [3.1.5.5]$$

Sendo P a porosidade e S a solidez do obstáculo.

2 – Indicadores biológicos: As deformações de árvores e arbustos da região podem servir como indicativos da intensidade do deslocamento do vento, assim como a direção para onde o mesmo sopra.

Como base científica dessa análise de deformidade e levando em consideração a deformidade de árvores coníferas, estabeleceu-se o índice de deformidade de Griggs-Putnam, conforme pode ser visto na Tabela (4):

Tabela 4–Coeficiente de atrito para vários tipos de terrenos.

Velocidade média do vento	I	II	III	IV	V	VI	VII
m/s	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	10+
km/h	11-14	14-18	18-21	21-25	25-29	29-32	36+
mph	7-9	9-11	11-13	13-16	15-18	16-21	22+

Fonte: Gipe (2004).

Essas são as bases de análise para uma região de modo que se possa estimar como se comportará o vento na região analisada. É necessário salientar que é possível fazer medições

das grandezas relacionadas ao vento, de modo a reduzir a quantidade de análises como as supracitadas, possibilitando assim uma maior eficiência e confiabilidade do projeto.

3.1.6 *Os aerogeradores*

Responsável pela conversão da energia cinética existente na circulação de vento em energia elétrica possui dentre seus componentes:

- Torre: Estrutura de sustentação, havendo dois tipos: tubular cônica (feitas em aço ou concreto) e treliçadas (construídas em aço);

- Nacele: Estrutura localizada em cima da torre, na qual se encontra a caixa de acoplamento e o gerador;

- Caixa de engrenagens: Localizado dentro da nacele, é utilizado para trabalhar a baixa velocidade da turbina em sintonia com a alta rotação do gerador. “Muitos fabricantes incluem a caixa de transmissão em seus aerogeradores; outros, porém, não o fazem. Há vantagens e desvantagens em ambas as configurações.” (MILTON, 2011).

- Cubo: Estrutura onde são fixadas as pás da turbina, podendo ser em aço ou liga metálica de alta resistência.

- Pá: Componente responsável pela transformação da energia cinética presente no deslocamento do vento em energia mecânica que fará a rotação do eixo.

- Gerador: Faz a conversão da energia mecânica disponibilizada no eixo em energia elétrica, podendo ser síncrona ou assíncrona. No acoplamento da turbina com o gerador usa-se uma caixa multiplicadora, a qual tem a função de fazer a mudança da velocidade da turbina (baixa velocidade) para o gerador (alta velocidade).

- Inversor de Frequência: Devido à variação de velocidade do vento, a rotação do gerador pode sofrer alterações que influem diretamente na frequência de saída da geração, a qual deve ser compatível com a da rede (60Hz no Brasil). Por isso, utiliza-se um inversor de frequência para manter a mesma no nível da rede da região.

Estes equipamentos são requisitos básicos para que haja geração de energia elétrica a partir da energia eólica. Porém, para se analisar a potência de saída vê-se necessário conhecer o coeficiente de potência (MILTON, 2011). Para isso, é feito o uso da seguinte equação:

$$C_p = (P_{ext}) / [(1/2) * \rho * A * v^3] [3.1.6.1]$$

Que representa a potência extraída pelo vento (P_{ext}) pela potência extraída pelo vento.

Conhecida a capacidade do vento e algumas características de fabricação que acabam influindo na potência de saída, são elaboradas as curvas de potência de uma turbina eólica, estas disponibilizadas pelos fabricantes.

Nas curvas de potência é possível perceber que existem limites de geração da mesma, sendo estas visualizadas na velocidade do vento mínima de operação (velocidade de partida) e na máxima, onde a energia eólica já é prejudicial à turbina (velocidade de corte) (MILTON, 2011).

Conforme a tecnologia do aerogerador há variações na curva de potência. Portanto, conhecer as opções de geradores eólicos existentes é de grande importância para um projeto bem planejado, por isso serão comentadas a seguir as tecnologias de aerogeradores horizontais e verticais:

3.1.6.1 Turbinas com Eixo Horizontal

Tecnologia mais comumente conhecida, onde a turbina encontra-se na direção horizontal ao plano terrestre. Suas pás utilizam seu design baseado em conceitos de hélices. Este tipo de turbina possui algumas características que fazem com que a mesma seja dominante no mercado atual, sendo estas:

- A velocidade do rotor, como também a saída de potência podem ter seu controle a partir do ângulo das pás, sendo este controle a proteção mais eficiente para casos de excesso de velocidade do vento.
- O formato das pás além de ter a liderança tecnológica no desenvolvimento dos projetos de hélices, podem ser otimizados aerodinamicamente, obtendo assim maior eficiência ao melhorar a sustentação aerodinâmica da mesma.

Algumas de suas vantagens:

- Devido à elevada altura da torre, pode obter ventos de intensidade mais elevada.
- Controle mais robusto, com a tecnologia de ajuste do ângulo de passo.
- Melhor eficiência, pois o vento incide diretamente na direção da turbina.

Algumas de suas desvantagens:

- Dificuldade na instalação de torres de grande porte.
- Exigência de controle para manter as pás na direção do vento.

- Complexidade da construção da torre para apoiar o peso das pás e do cubo.

Há dois tipos de máquinas de eixo horizontal, downwind e upwind, sendo a incidência do vento na turbina a diferença entre elas. A turbina com máquina upwind recebe incidência de vento na parte frontal das pás, enquanto que a downwind opera com ventos na direção oposta das pás (MILTON, 2011).

3.1.6.2 Turbinas com eixo vertical

Compostos de um eixo em sentido vertical ao do solo, possuem vários modelos que foram desenvolvidos com o passar do tempo para melhorar a sua funcionalidade. Possuem algumas vantagens com relação às de eixo horizontal, tais como:

Vantagens:

- Não necessitam de controle para manter a turbina na direção do vento.
- O material pesado contido na nacelle pode ser levado ao solo, facilitando assim a manutenção e montagem.

Desvantagens:

- Como as pás ficam relativamente próximas ao solo, são mais suscetíveis a turbulências (aumentando a tensão nas pás).
- Outro fato relacionado à proximidade do solo é a redução na velocidade de vento recebida, devido ao fato de o vento em regiões mais elevadas ser mais intenso.

Existem vários modelos de máquinas de eixo vertical, sendo alguns destes: Rotor de Darrieus, Savonius, Solarwind, Helicoidal, Noguchi, Maglev, Cochrane.

Dentre estes, os mais utilizados são Darrieus e Savonius, sendo o primeiro o com maior sucesso comercial, tendo sido até fabricado um modelo em grande escala, com potência nominal de 230kW, enquanto que o modelo Savonius é utilizado em casos de menor potência, devido a seu máximo coeficiente de torque. “O máximo coeficiente de torque do rotor é geralmente desenvolvido a uma TSR dentro da faixa de $0,3 \leq \lambda \leq 0,6$ [...]”, a máquina Savonius só é útil e econômica para sistemas de pouca potência, como o bombeamento de água ou ventilação.” (MILTON, 2011). Modelos de Darrieus e Savonius podem ser vistos nas Figuras (8) e (9).

Figura 8– Turbina Eólica modelo de Darrieus



Fonte: Google.

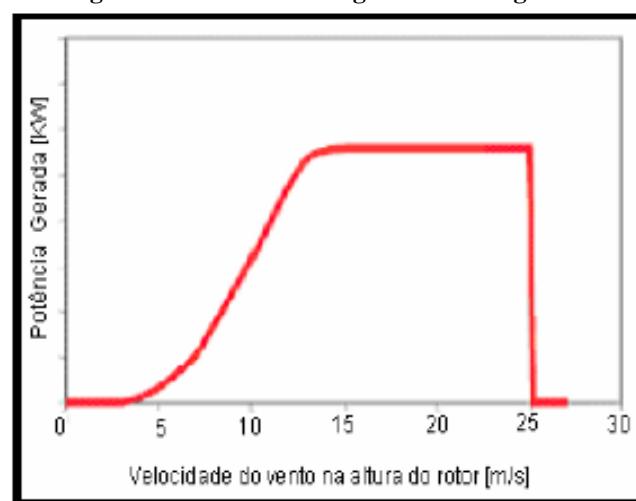
Figura 9– Turbina Eólica modelo de Savonius



Fonte: Google.

Cada modelo de aerogerador possui sua curva de carga própria assemelhando-se ao que pode ser visto na Figura (10).

Figura 10 – Curva de carga de um aerogerador



Fonte: Google.

Desta são retiradas as informações básicas para calcular a energia gerada pelo gerador eólico, por meio das análises do terreno, do vento e dos equipamentos do sistema. Neste trabalho o cálculo da geração será realizado por meio da integração dos valores de potência obtidos da equivalência do vento circulante na curva de carga.

4 BIOGÁS

4.1 Histórico

Segundo (CLASSEN *et al.*, 1999) e (CECCHINI & PELOSI, 1992), a história do biogás se inicia pela descoberta do mesmo, atribuída a Shirley em 1667, porém apenas em 1776 foi reconhecida a presença do gás metano pelo físico italiano Alessandro Volta.

O primeiro país a utilizar o metano produzido a partir da digestão anaeróbia foi a Índia, onde foi construída uma instalação para produção de gás combustível em 1859. Neste mesmo período, as bases teóricas e experimentais da digestão anaeróbia foram estabelecidas por Ulysses Grayon, Fisher e Schrader.

Anos depois, em 1884 foi realizada a fermentação anaeróbia a partir da mistura do estrume e da água, sob a temperatura de 35°C, obtendo assim 100 litros de biogás por m³ de matéria (NOGUEIRA, 1986).

Em 1950 o indiano Patel instalou, ainda na Índia, o primeiro biodigestor contínuo. A Índia trouxe grande contribuição para no estudo do biogás, motivando outros países, como a China a adotar a tecnologia. Esta inserção tecnológica ocorreu a partir de 1958, tendo instalado 7,2 milhões de biodigestores até o ano de 1979.

“Hoje, as melhores tecnologias de utilização de biodigestores são dominadas pela Índia e China. Os chineses buscam nessa tecnologia o biofertilizante, indispensável para a produção de alimentos necessários de sua população, e os indianos necessitam dos biodigestores para suprir o seu imenso déficit de energia.” (IGOR, 2014)

4.2 Biogás - Definição

O biogás é uma fonte de energia renovável que pode ser obtido artificialmente ou naturalmente. Sua forma gasosa é principalmente composta por uma mistura de hidrocarbonetos como o gás Metano (CH₄) e Dióxido de Carbono (CO₂), resultantes da fermentação anaeróbica realizada por microrganismos da matéria orgânica existente, como por exemplo: resíduos vegetais, dejetos animais, restos de abatedouros e frigoríficos, fábricas de alimentos, lodo de esgoto entre outros. Esta mistura gasosa possui uma relação direta na quantidade de gás metano com o poder calorífico pertencente ao mesmo. “Para cada tonelada

de resíduos dispostos em um aterro sanitário, são gerados em média 200Nm³ de biogás.” (MONTILHA, 2005).

O biogás pode ser usado para gerar energia térmica, mecânica e elétrica e o seu aproveitamento ótimo é possível com um estudo de características gerais que podem alterar sua composição e poder calorífico. “A obtenção do biogás é feita obedecendo a critérios de fermentação, temperatura, umidade, acidez e com a ausência de oxigênio.” (ROYA *et al.*, 2011).

Para algumas das opções de matéria orgânica existentes, é feito o uso de biodigestores, ampliando assim a disponibilidade desse recurso na geração de energia. A matéria a ser digerida ou o tipo de biodigestor utilizado podem alterar a porcentagem de cada gás presente, alterando assim as características energéticas do sistema.

4.3 Obtenção do biogás

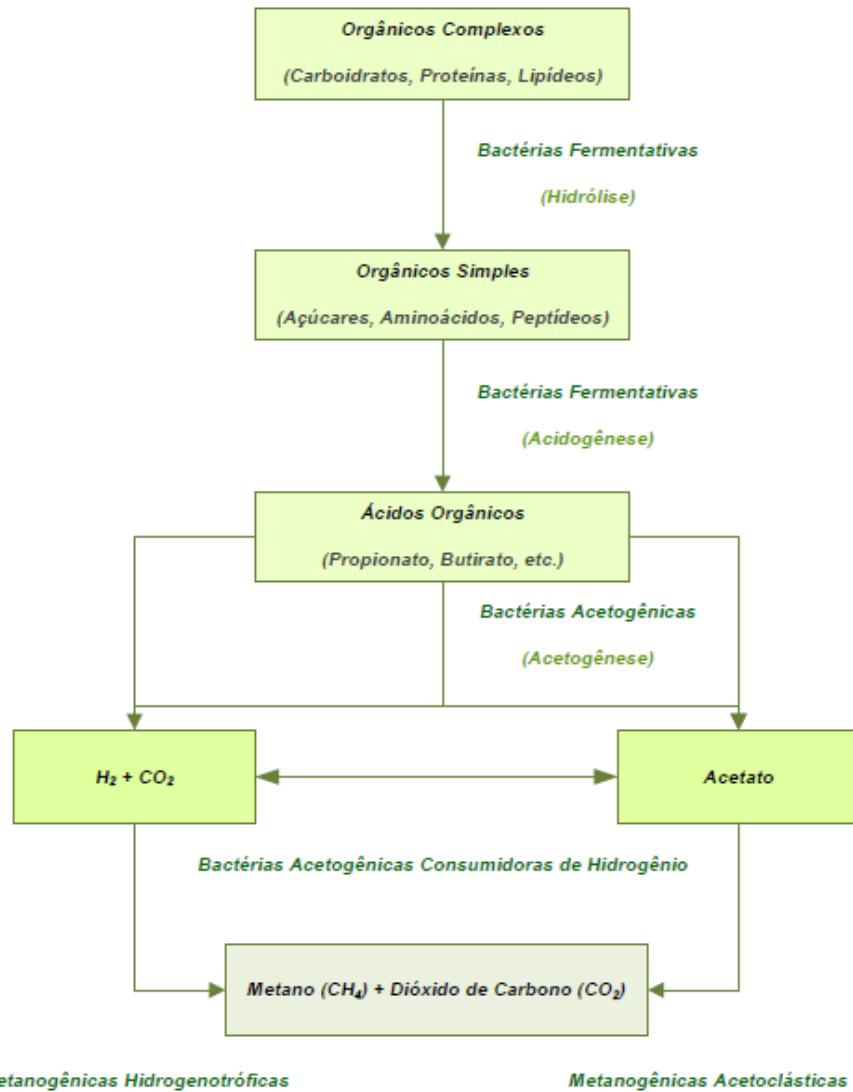
Nesta seção será abordado sobre aspectos gerais da obtenção do biogás. Esta mistura gasosa advém da decomposição da biomassa residual, produzida por bactérias anaeróbias.

De acordo com (DANGELA, 2012), a geração de biogás apresenta quatro etapas em seu processo de digestão anaeróbia, sendo estes:

- Hidrólise: Os polímeros (materiais particulados complexos) são convertidos em materiais dissolvidos simples por meio de ação de exoenzimas liberadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas, sendo reduzidos em moléculas menores que são capazes de atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas.
- Acidogênese: Os compostos formados na hidrólise são então convertidos em compostos mais simples, como álcool, ácido lático, gás carbônico, hidrogênio, amônia entre outros por ação de bactérias fermentativas acidogênicas.
- Acetogênese: As bactérias acetogênicas fazem a oxidação dos produtos obtidos na etapa de acidogênese, transformando em substrato apropriado para as bactérias metanogênicas. São então resultados dessa fase o hidrogênio, o acetato e o dióxido de carbono.
- Metanogênese: Etapa que finaliza o processo de degradação do material orgânico, convertendo o mesmo, por meio de bactérias metanogênicas, em dióxido de carbono e metano.

A figura (11) demonstra o fluxograma destas etapas:

Figura 11– Processo de digestão anaeróbia.



Fonte: Dangela(2012).

Existem diversas formas de obtenção de energia a partir do biogás, porém neste trabalho será abordado o uso de biogás a partir de resíduos advindos da suinocultura.

4.3.1 Biogás na suinocultura

Os resíduos agropecuários são obtidos a partir de restos de vegetais não aproveitáveis ou por animais, sendo estes classificados como biomassa residual. Sua composição é variada conforme o elemento orgânico proeminente da localização em questão. Dentre estes, uma das fontes de biomassa que está sendo difundida para a transformação em biogás e posteriormente

em energia elétrica é a da suinocultura. A Tabela (5) demonstra a possibilidade de utilização dessa biomassa:

Tabela 5–Produção de biogás por resíduos agropecuários.

Material	Rendimento (m ³) de biogás por kg de material orgânico
Esterco fresco bovino	0,04
Esterco seco de galinha	0,43
Esterco seco de suíno	0,35

Fonte: Nogueira (1986). Adaptado por Colatto e Langer (2011)

Os resíduos liberados por suínos liberam gases do efeito estufa para a atmosfera, onde uma tonelada de dióxido de carbono (CO₂) equivale a um crédito de carbono. Créditos de carbono podem ser negociados permitindo a emissão de gases de efeito estufa para empresas interessadas, além de ser um benefício ao meio ambiente.

Segundo (COLATTO e LANGER, 2011) o cálculo para conhecer a quantidade por mês de metano em m³ se dá por:

$$CH_4 = 30 \text{ dias} * n * Et * Pb * Conc. CH_4 * VE^{-1} [4.3.1.1]$$

Onde,

n= Quantidade de suínos;

Et = Esterco total [kg esterco t (dia.unidade geradora)⁻¹];

Pb = Produção de biogás [kg biogás kg esterco⁻¹];

Conc. CH₄ = Concentração de metano no biogás [%];

VE⁻¹ = Volume específico do metano [kgCH₄⁻¹m⁻³CH₄⁻¹], sendo este igual a 0,67;

4.4 Fatores que influem na produção do biogás

A produção de biogás é realizada por bactérias. Devido a esse fato, alguns fatores podem interferir no metabolismo e sobrevivência destes agentes decompositores, afetando diretamente o processo. Fatores estes podem ser visualizados na tabela (6):

Tabela 6–Principais variáveis relacionadas à biomassa residual.

Variável	Definição/Importância	Método de Determinação
Aspectos Físicos	Temperatura	O aumento da temperatura provoca o aumento das velocidades de reações.
	Sólidos Totais	Determinar a quantidade total de sólidos no sistema.
	Sólidos Suspensos	Determinar o acúmulo de sólidos suspensos e sedimentáveis no sistema de tratamento.
	Sólidos Voláteis	Determinar a quantidade total de sólidos compostos com material carbonáceo no sistema passíveis de transformação biológica.
	Sólidos Fixos	Determinar a quantidade total de sólidos que podem acumular no sistema de tratamento.
Aspectos Químicos	pH	Influi nos equilíbrios químicos e na formação de ecossistemas biológicos devido ao caráter ácido-básico dos sistemas.
	Alcalinidade	Determina a capacidade tampão do sistema de tratamento.
	DQO	Quantidade de oxigênio requerida por oxidação química para estabilizar compostos orgânicos.
	Nitrogênio	Fonte de nutriente para sistemas biológicos aquáticos e pode estar na forma de nitrogênio orgânico, amônia, nitrito e nitrato. Pode acarretar em eutrofização de ambientes hídricos.
	Fósforo	Fonte de nutriente para sistemas biológicos aquáticos e pode estar na forma orgânica ou de ortofosfatos. Pode acarretar em eutrofização de ambientes aquáticos.
	Sulfeto	Pode causar corrosão em equipamentos e unidades na forma de gás sulfídrico (H_2S), bem como precipitação e inibição biológica em determinadas concentrações e condições ambientais.
Aspecto Biológico	Óleos e Graxas	São substâncias solúveis em n-hexano (gorduras animais, ácidos graxos, óleos vegetais) que interferem nos sistemas de tratamento com acúmulo na superfície. Podem obstruir canalizações e o transporte da biomassa.
	DBO	Fração biodegradável dos compostos orgânicos. Determina o potencial de conversão bioquímica de carbono orgânico para metano e dióxido de carbono em processos anaeróbios.

Fonte: Dangela(2012).

4.5 Poder calorífico

A combustão completa de uma unidade de massa ou volume de gases libera uma quantidade de energia, esta que é uma das principais características de um gás, denominada de poder calorífico. (COSTA, 2006).

Pode-se medir o poder calorífico utilizando volume ou pressão constante, sendo utilizados para as medições uma bomba calorimétrica e um calorímetro de gás respectivamente.

Dentro da definição de poder calorífico há o conceito de poder calorífico superior e inferior. “Define-se poder calorífico superior o poder calórico da combustão que resulta água na fase de vapor e poder calorífico inferior que resulta em água na fase líquida.” (SANTOS, 2009). A tabela (7) apresenta os valores de poder calorífico para diversos combustíveis.

Tabela 7–Poder calorífico inferior de combustíveis gasosos.

Gás	PCI (kcal/m ³)
Metano	8.500
Propano	22.000
Butano	28.000
Gás de Coqueria	4.400
Gás de Cidade	4.000
Gás Natural	8.554
Biogás	5.500

Fonte: Iannicelli (2000) e Alves (2000).

Segundo (AZEVEDO, 2000), a faixa de variação do poder calorífico superior do biogás é de 17 a 37 MJ/kg enquanto que o calorífico inferior encontra-se entre 15 e 34 MJ/kg. Deste modo, é possível observar que o biogás in natura possui um poder calorífico menor do que o metano. “Caso aplicado um processo de depuração para a separação do metano existente em 55% a 75% no biogás [...] é possível obter um poder energético maior podendo superar o gás natural, gasolina e diesel.” (SANTOS, 2009). A Tabela (8) apresenta a equivalência de 1 m³ de biogás com outras fontes de energia.

Tabela 8 - Equivalência energética do biogás (1 m³) comparada a outras fontes de energia.

Energético (l)	Ferraz e Mariel (1980)	Sganzerla (1983)	Nogueira (1986)	Barrera (2003)
Gasolina (l)	0,61	0,61	0,61	0,61
Querosene (l)	0,58	0,58	0,62	0,58
Diesel (l)	0,55	0,55	0,55	0,55
GLP (kg)	0,45	0,45	0,43	0,45
Álcool (l)	-	0,79	0,80	0,79
Carvão mineral	-	0,74	0,74	-
Lenha	-	1,52	3,50	1,54
Eletricidade (kWh)	1,43	1,43	-	1,43

Fonte: Ferraz e Maciel (1980), Sganzerla (1983), Nogueira (1986), Barrera (2003).

4.6 Utilização do biogás

Pode-se usar o biogás para gerar energia de diversas formas: energia mecânica, térmica ou luminosa.

A geração de calor é obtida a partir de fogões a gás ou queimadores, precisam adaptar-se ao diâmetro dos orifícios de descarga do gás visto que a pressão pode ser menor.

Na geração de energia mecânica, este gás é utilizado em motores de combustão interna substituindo os convencionais combustíveis.

A energia mecânica produzida pelo biogás também possibilita a geração de energia elétrica ao acoplar um eixo na turbina e em um gerador.

A iluminação se dá pelo uso de lampiões a gás ou sistemas de iluminação que utilizem gás natural.

4.6.1 Geração de energia elétrica a partir do biogás

Na produção de energia elétrica, o biogás serve como fonte de energia mecânica para rotacionar as pás de uma turbina e por meio de um eixo acoplando-a a um gerador produzir energia elétrica.

O componente que faz a função de gerar a energia elétrica é o grupo gerador, sendo a variável de maior interesse para o projeto de geração por biogás, o rendimento do grupo gerador escolhido.

“Sabendo então que 1 MWh (=1000 kWh) equivalem a 94,962 metros cúbicos de Gás natural, assim cada kWh vale $94,962/1000 = 0,094962$ metros cúbicos de Gás. Ou seja, 1 metro cúbico de Gás é igual $1000/94,962 = 10,5305$ kWh.” (COLATTO e LANGER, 2011).

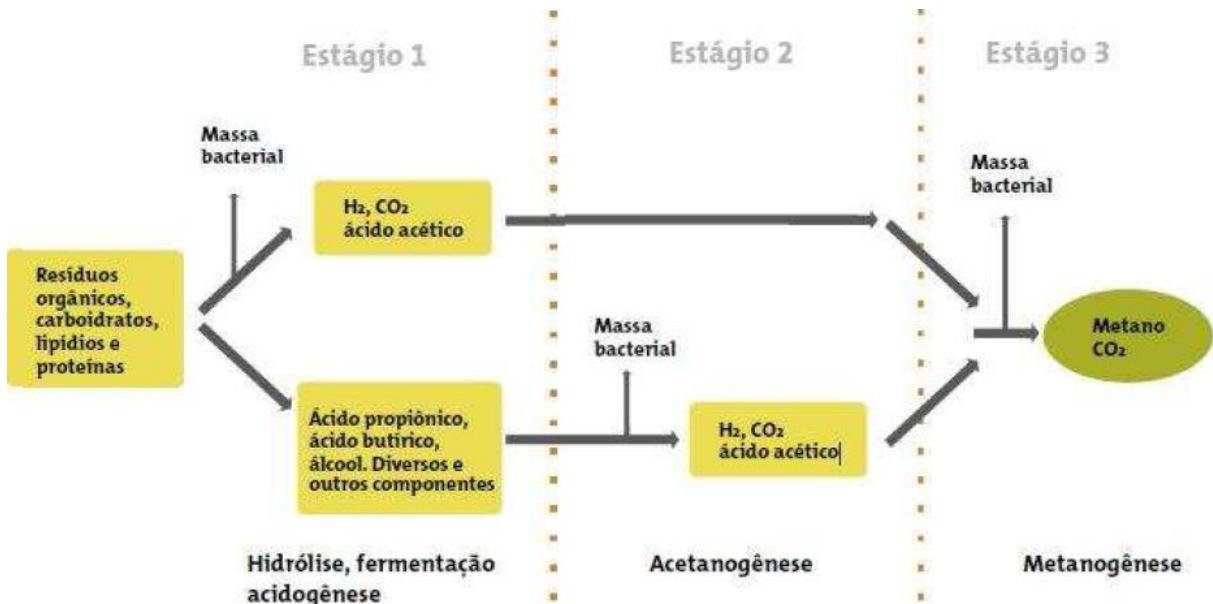
4.7 Biodigestor

Câmara de fermentação fechada, onde por meio da digestão por bactérias anaeróbicas produz biogás.

“Em outras palavras, trata-se de um recipiente completamente fechado e vedado, impedindo qualquer entrada de ar, construído de alvenaria, concreto ou outros materiais, onde é colocado o material a ser degradado para posterior fermentação.” (VITORELLI, 2010).

A figura (12) apresenta um fluxograma do funcionamento de um biodigestor

Figura 12 - Etapas de funcionamento de um biodigestor.



Fonte: Sosa et al., (2004).

4.8 Modelos de biodigestor

Existem dois tipos de biodigestores, com diferença ao tipo de abastecimento, modelo contínuo e descontínuo (batelada).

O biodigestor de modo contínuo possui como característica o fato de ser abastecido diariamente ou periodicamente por resíduos, efluentes. Dentre os principais modelos existentes pode-se citar:

- Biodigestor modelo Indiano;
- Biodigestor modelo Chinês;
- Biodigestor modelo Canadense;

Já o biodigestor de modo descontínuo (batelada) é de uso específico para materiais orgânicos de decomposição lenta, além de utilização em períodos longos de produção como, por exemplo, palha misturada a dejetos animais.

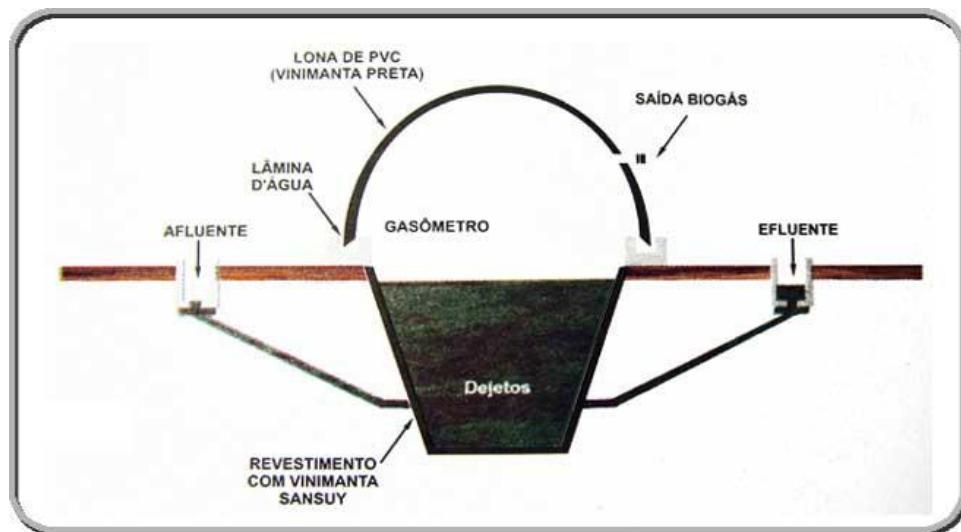
Neste trabalho será abordado mais profundamente apenas o modelo canadense, pois foi tomado como base a escolha vista em (DANGELA, 2012) que opta pela utilização deste biodigestor devido ao menor custo e a difusão do mesmo no Brasil.

4.8.1 Biodigestor modelo Canadense

Apresentando uma tecnologia avançada e moderna, é o modelo de biodigestor mais recente, porém menos complexo. Também conhecido por biodigestor de fluxo tubular, é amplamente difundido na área rural e possui maior uso dentre as outras.

Suas características de largura maior e profundidade menor do que o indiano o torna um modelo do tipo horizontal, sendo sua área de exposição solar maior assim como a produção de biogás. “É um modelo tipo horizontal, apresentando uma caixa de carga em alvenaria e com a largura maior que a profundidade, possuindo, portanto uma área maior de exposição ao sol o que possibilita grande produção de biogás, evitando o entupimento.” (DEUBLEIN, 2008). A representação em corte deste modelo pode ser visto na Figura (13).

Figura 13 - Representação em corte de um biodigestor modelo Canadense.



Fonte: Embrapa (2000).

Segundo (OLIVER *et al*, 2008), o volume da câmara de digestão pode ser calculado pela equação:

$$V_{cd} = V_d * T_r [4.8.1.1]$$

Onde:

V_d = Volume de carga diária (dejetos + água) (m³/dia);

T_r = tempo de retenção hidráulica (20 a 50 dias);

Para o cálculo do volume de carga diária, deve-se conhecer a média produzida de massa de dejetos e somar a quantidade de água que será utilizada. A Tabela (9) aborda sobre esse cálculo, levando em conta a relação esterco/água.

Tabela 9 – Planilha de cálculo do volume de carga.

Espécie Animal	Esterco por animal (kg)	Quantidade de animais	Total de esterco (kg)	Relação esterco:água	Volume de água (m ³) ⁵	Volume da carga (m ³)
	A	B	C = A x B	D	E = C x D	F = C + E
Caprino/ovino**	0,5			1:4 a 5		
Vaca	7			1:1		
Vaca leiteira*	25			1:1		
Bezerro**	2			1:1		
Boi*	15			1:1		
Suíno*	4			1:1,3		
Total						

Fonte: Manual de treinamento em biodigestão (2008). *confinado **preso de noite

Obtido o volume, é calculado então as dimensões do biodigestor, utilizando as equações de (RIBEIRO, 2011) as quais podem ser visualizadas pela Tabela (10).

Tabela 10 – Equação para o cálculo das dimensões do biodigestor.

Fórmula	Descrição
$P = C = 2\pi r$ (Eq. 2)	P = perímetro total transversal (campana mais fossa)
	C = circunferência da bolsa
	r = raio da bolsa plástica
$A\% = 0,621 p^2 - 0,042 p + 0,352$ (Eq. 3)	$A\%$ = porcentagem do perímetro transversal destinado ao arco
	p = proporção da fase gasosa desejada ($p \leq 0,4$)
$b = (-1/3 A\% + 1/3)P$ (Eq. 4)	b = lateral, base ou largura menor da fossa
$a = 1,618b$ (Eq. 5)	a = largura maior da fossa
$h = 0,951b$ (Eq. 6)	h = profundidade da fossa
$A_f = 0,4755(a+b)b$ (Eq. 7)	A_f = área transversal da fossa
$A_t = A_f / (1-p)$ (Eq. 8)	A_t = área total transversal ou área transversal da fossa mais área transversal da campana
$A_g = A_t - A_f$ (Eq. 9)	A_g = área transversal da campana ou área transversal destinada para o gás
$V_t = A_t L$ (Eq. 10)	V_t = volume total do biodigestor (campana mais gás)
	L = comprimento do biodigestor
$V_f = A_f L$ (Eq. 11)	V_f = volume total da fossa
$V_g = A_g L$ (Eq. 12)	V_g = volume total do gás

Fonte: Holos (2011).

4.8.2 *Grupo Gerador*

O grupo gerador é o principal elemento na geração de energia elétrica a partir da biomassa residual, devido a característica de converter a energia mecânica do processo em elétrica.

“No caso do biogás a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica ativa um gerador que a converte em energia elétrica.” (COELHO *et al*, 2006).

De acordo com (SANTANA e COHIM, 2010) o cálculo do potencial elétrico do biogás pode ser feito utilizando a seguinte equação:

$$PE = \frac{Q_{biogás} * PCI_{biogás} * n_{gerador} * F_{conv}}{86400} [4.8.2.1]$$

Onde:

PE = potência elétrica (kW)

Q_{biogás} = vazão (produção média) do biogás (m³/dia)

PCI_{biogás} = poder calorífico do biogás (kcal/m³)

n_{gerador} = rendimento do gerador (em média 30%)

F_{conv} = Fator de conversão de “kcal” (quilo caloria) para “kJ” (quilo joule), onde 1 kJ/s corresponde a 1 MW (valor de 4,1868)

5 ANÁLISE PRÁTICA

Neste capítulo, serão trabalhados alguns projetos de geração por fonte renovável para abatimento da conta de consumidores reais. Para isso, serão inicialmente explicadas as características de cada caso, sendo posteriormente analisadas as variáveis ambientais e as possibilidades disponíveis no mercado, utilizando da teoria conhecida nos capítulos anteriores existente na literatura para o correto dimensionamento, visando eficiência e melhor “custo x benefício”.

5.1 Características dos objetos de análise

Serão abordados dois estudos de caso no trabalho em questão, o primeiro referente à redução de consumo a partir da resolução 482 da ANEEL, utilizando as fontes de energia solar e eólica para o mesmo. Já no segundo caso será apresentada uma análise de geração de energia para venda no MercadoLivre de energia utilizando o biogás produzido pela suinocultura. Deste modo, busca-se abordar de forma diversificada as opções de inserção das fontes alternativas de energia nos sistema elétrico brasileiro.

Levando em consideração o fato de que cada consumidor possui suas características diferenciadas devido a diversos fatores, serão analisados os mesmos para que o projeto esteja de acordo com a realidade da região e do objeto de análise, sendo assim mais confiável.

5.1.1 *Características do caso de redução de consumo*

No caso de redução de consumo, levando em consideração a resolução 482 da ANEEL, as características dos consumidores estão disponibilizadas na Tabela (11):

Tabela 11 – Dados do consumidor de redução de consumo.

Consumidor	Consumo médio	Classe	Localização	Tipo de instalação
1	612	B	Campo Grande/MS	Trifásico

Fonte: Elaborado pelo autor.

O consumo médio será utilizado como variável de análise para que o sistema de compensação não fique subdimensionado ou sobre dimensionado, sendo possível que (de acordo com o sistema de crédito pela resolução 482 da ANEEL) em épocas de baixo consumo, os créditos poderão reduzir o consumo dos períodos de maior utilização dos equipamentos elétricos.

O nível de tensão da instalação também é uma variável importante na análise, pois a conta de energia elétrica depende de fatores diferenciados para consumidores de classe A ou B. Para consumidores tipo “A”, a tarifa de consumo é reduzida e o valor de demanda é levado em consideração para o cálculo da conta de energia. Já no consumidor tipo “B”, a tarifa de consumo é mais elevada e não há análise de demanda.

Outro fator necessário a um projeto é a análise das características ambientais presentes no local que será feita a compensação de energia, pois caso haja a indisponibilidade de recursos (sol, vento, biomassa), a geração será ineficiente.

A fim de sanar esse problema, foram realizados estudos em diversas regiões no intuito de buscar informações sobre a disponibilidade dos recursos por região, conhecidos como: Atlas Solarimétrico, Atlas do Potencial Eólico e Atlas de Biomassa. Estes dados são disponibilizados pela CRESESB.

Seguindo essa linha de análise, também são de grande relevância as medições realizadas pelo Instituto de Nacional de Meteorologia (INMET), do qual são obtidos os dados de velocidade do vento, radiação solar e estimativa de produtividade.

Com isso é possível estimar uma possível geração a partir das curvas características relacionadas aos geradores (solar, eólico, biodigestor) para assim poder obter um resultado mais fiel ao real.

Para grandes centrais geradores, são realizados estudos das características do local, pois devido ao alto valor do investimento, necessita-se de um elevado grau de confiança para a realização do mesmo. Portanto, são utilizados equipamentos de medição de velocidade do vento, radiação solar, temperatura do local e etc.

Também se deve conhecer o impacto de árvores, lagos ou construções próximas para que não haja imprevistos, como sombreamento dos painéis solares fotovoltaicos e perturbações no vento.

Levando esses fatores em consideração, os dados foram elencados de modo a poder ser feita a análise da energia gerada por cada fonte de energia conforme será visto posteriormente neste mesmo trabalho.

5.1.2 *Características do caso de geração de energia*

A matriz energética brasileira possui uma intensa dependência da energia hidráulica, o que não é vantajoso para o sistema devido ao risco hidrológico, reduzindo assim a quantidade de água nos reservatórios das hidrelétricas.

Outro fator importante é a centralização da energia nos grandes centros geradores, aumentando assim a necessidade de linhas de transmissão e perda de energia devido ao transporte da mesma.

A geração distribuída aparece como uma opção para a minimização destes problemas, pois amplia a gama de opções de alimentação do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Além destes fatores, a utilização de fontes renováveis de energia permite o desenvolvimento sustentável.

Estes fatores aliados à possibilidade de lucro com a instalação de um sistema de geração para a venda ao mercado livre, além de a ideia de se comercializar créditos de carbono tornam a produção de biogás por suinocultura um atrativo método de análise.

No caso em questão, será considerada uma unidade de suinocultura na fase de terminação, com capacidade de produção de suínos de até 1000 animais, possuindo no local uma criação de 600 suínos.

Em um levantamento realizado por Pereira, Maia e Camilot (2009), foi elaborada a Tabela (12) com o custo de energia elétrica por quantidade de suínos.

Tabela 12 – Custo de energia elétrica por número de suínos.

Granjas	Número de suínos	Custo da Energia Elétrica (R\$.ano ⁻¹)
1	600	1.920
2	2.400	6.000
3	4.320	5.780
4	30.000	38.039
5	25.794	34.000
6	19.200	25.100
7	16.800	22.100
8	36.000	40.000
9	640	1.800
10	15.600	22.200

Fonte: Pereira, Maia e Camilot (2009).

5.2 Simulação de geração

Cada fonte de energia com sua característica própria gerarão valores diferentes. Estes valores serão calculados a partir da teoria explanada nos capítulos anteriores. Os dados de vento e irradiação solar foram salvos em uma tabela, a qual será utilizada posteriormente para o cálculo da geração utilizando a versão de estudante do software “MATLAB”.

Para isso, foram realizados dois cálculos diferentes conforme os algoritmos das Figuras (14) e (15).

- Eólico

Figura 14 – Algoritmo de cálculo da geração eólica.

```

1 -      EixoX=[];
2 -      EixoY=[];
3 -      vento=[];
4 -      Potencia=kernelreg(EixoX,EixoY,vento,1);
5 -      plot(Potencia);
6 -      Energiaeolica=cumsum(Potencia);
7 -      Plot(Energiaeolica);

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a análise da geração eólica, foi utilizada a função “kernelreg” criada e disponibilizada pelo professor Luigi Galotto Júnior, a qual é utilizada a para a plotagem da curva característica de “Potência x Vento” disponibilizada pelos fabricantes. Os vetores “EixoX” e “EixoY” correspondem respectivamente aos valores de vento e potência retirados da curva disponibilizada pelo fabricante do aerogerador. Vê-se que para poder utilizar essa função, é necessário que se conheça o equipamento que será utilizado e devido à variedade de valores de potência existentes no mercado, deve-se ter conhecimento do valor de potência média que o consumidor costuma utilizar, garantindo assim que a potência nominal do gerador eólico encontra-se no patamar indicado para a compensação energética que será realizada.

A variável “vento” corresponde aos dados retirados do INMET conforme a região do consumidor.

A partir destes dados de entrada, a variável “Potencia” por meio da função “kernelreg” fará o cálculo de potência disponibilizando os valores para cada entrada (variável “vento”) inserida.

Porém como é necessário se obter a energia do sistema, por meio da função “cumsum” (própria do matlab) a variável “Energiaeolica” faz o cálculo da energia que será obtida com os dados de potência obtidos. Foram inseridas algumas funções “Plot” para mostrar de maneira gráfica os valores obtidos nas análises que serão realizadas.

- Solar

Figura 15 – Algoritmo de cálculo da geração solar.

```

1 - Eficiencia=14.92/100;
2 - area =1.655*0.992;
3 - ctepainel=Eficiencia*area;
4 - red1=0.8;
5 - red2=0.9;
6 - irradiacaoJ=[  
7 - ];
8 - irradiacaoN=irradiacaoJ+3.5;
9 - irradiacao=irradiacaoN*0.000278*1000;
10 - potenciaPV=irradiacao*ctepainel*red1*red2;
11 - energiaPV=cumsum(potenciaPV);
12 - subplot(1,2,1)
13 - plot(irradiacao,potenciaPV);
14 - subplot(1,2,2)
15 - plot(energiaPV);

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da teoria de energia solar fotovoltaica, inicialmente são obtidos do fabricante os valores de eficiência e a área do painel (armazenadas nas variáveis de mesmo nome). Estes valores são então utilizados para o cálculo de “ctepainel”, sendo este um valor constante, presente em cada painel devido a suas características físicas. As variáveis red1 e red2 são explicadas em (2.2.4).

Posteriormente são inseridos os valores de irradiação na variável “irradiacaoJ”, observando que os mesmos foram dados em J/m^2 , sendo necessário a conversão para kWh/m^2 (esta realizada pela multiplicação da constante 0,278). Também se deve salientar que devido a valores negativos disponibilizados pelo INMET (considerando que o valor inicial do instrumento de medição não é exatamente nulo), foi usada uma normalização que é representada pela soma do valor 3,5 na variável “irradiacaoJ” resultando em “irradiacaoN”.

Feitas estas considerações, os cálculos de potência e energia podem ser vistos respectivamente pelas variáveis “potenciaPV” e “energiaPV” que basicamente são a multiplicação do vetor irradiação pela constante do painel (obtendo a potência) e posteriormente a integração desses valores obtendo assim a energia gerada pelo painel no período relativo aos valores inseridos na entrada (número de horas de irradiação consideradas).

5.3 Análise tarifária e normativa

5.3.1 Tarifas de baixa tensão

Para os sistemas de baixa tensão, existe atualmente apenas uma modalidade chamada de convencional, a qual destina uma tarifa pelo consumo mensal do cliente.

5.3.2 Tarifas de alta tensão

Para o consumidor conectado à rede operando em alta tensão, as modalidades tarifárias são especificadas como:

- Convencional: Maior demanda, Consumo mensal;
- Azul: Demanda na Ponta e Fora de Ponta, Consumo mensal;
- Verde: Demanda e consumo na Ponta e Fora de Ponta.

5.3.3 Bandeiras tarifárias

Devido ao fato de a maior parte da matriz energética brasileira se basear na geração hidráulica (hidrelétricas), em períodos onde ocorre redução no nível de água dos rios vê-se necessário o despacho de termelétricas para que não haja excesso de demanda comprometendo assim o Sistema Interligado Nacional (SIN). Essa medida acaba encarecendo o preço da energia.

Para evitar que sejam tomadas essas medidas, foram criadas as bandeiras tarifárias, de modo a tentar proteger o sistema, aumentando o preço da conta de energia a partir do nível nos reservatórios das hidrelétricas. Há existência de três bandeiras tarifárias para essa regulação: Verde, Amarelo, Vermelho.

5.4 Estudo de caso

Após conhecidas as características de geração e com a lista de materiais que estão disponíveis para a análise, será realizado um estudo de caso para cada consumidor citado em 5.1.

5.4.1 Caso 1

Conforme abordado em (5.1.1), será considerado um consumidor do tipo B, com consumo médio mensal em torno de 612 kWh, sendo o maior consumo visualizado no mês de Fevereiro, conforme mostra a Tabela (13):

Tabela 13 – Relação de consumo de energia mensal e anual.

Data(Mês/Ano)	Média de Consumo (kWh)
ago/13	549,4527778
set/13	605,8125
out/13	594,8486111
nov/13	634,1013889
dez/13	664,4138889
jan/14	623,8347222
fev/14	672,3986111
mar/14	643,6972222
abr/14	627,0430556
mai/14	557,3902778
jun/14	554,9333333
Média Anual	611,6296717

Fonte: Elaborado pelo autor.

Partindo dessa informação e considerando o fato de que a energia que será gerada deverá ser compensada em créditos, vê-se que a variação da geração para as fontes analisadas não será um empecilho para a redução do consumo e a redução excedente dos meses com consumo abaixo da média ajudarão a reduzir o consumo em meses de maior utilização de energia.

Com isso, foi analisado o cenário de energia gerada por cada fonte na região de Campo Grande partindo dos dados ambientais obtidos.

5.4.1.1 Compensação Fotovoltaica

Inicialmente será feito o cálculo de potência gerada pelo painel solar, lembrando que nessa etapa é necessário considerar as perdas do meio onde o gerador será instalado, além das relacionadas à transmissão da energia. Posteriormente, será calculada a energia gerada para assim analisar a redução do consumo final. Os preços de energia, assim como o tempo de retorno do investimento são apresentados ao final.

Para a compensação de energia por fontes fotovoltaicas, serão considerados os materiais conforme a tabela (14):

Tabela 14 – Relação de materiais - Solar.

Componente	Marca	Preço (R\$)
Placa Solar	Vigest Solar – 245 Wp	800,00
Micro inversor	APS – YC 500 A	1.500,00

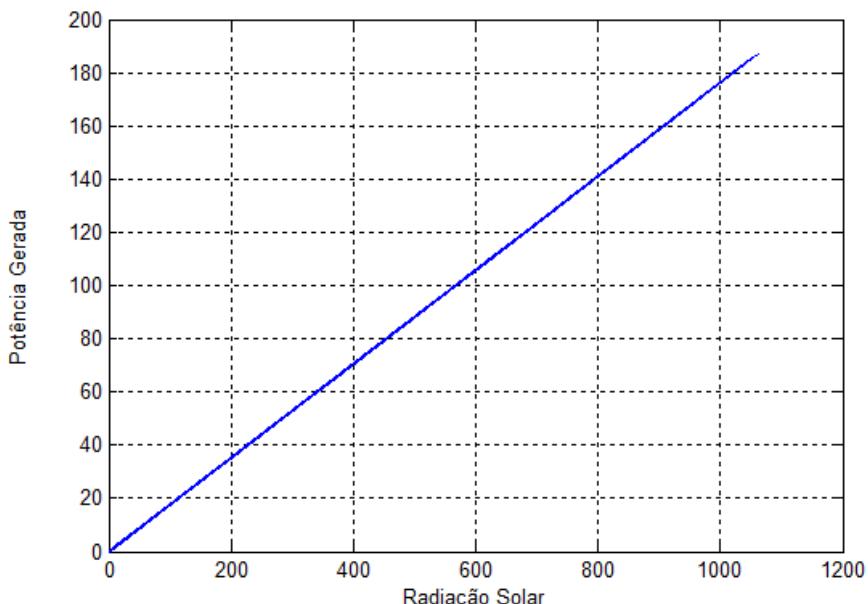
Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram feitos os cálculos de compatibilidade conforme vistos em (2.2.3), sendo possível a utilização de um Micro inversor para cada duas placas fotovoltaicas do modelo citado na tabela (14).

Para a análise da geração, foi utilizado o algoritmo citado em (5.2), sendo as características do painel (eficiência e área) já consideradas na variável “ctepainel” da figura (15).

Deste modo, foram obtidos os dados disponibilizados pelo INMET de irradiação solar e inseridos na variável “irradiaçãoJ”, com dados referentes de Agosto a Novembro do ano de 2014 (22/08/2014 à 22/11/2014). O valor de potência gerada para as irradiações desse período, de acordo com a simulação é mostrado na Figura (16):

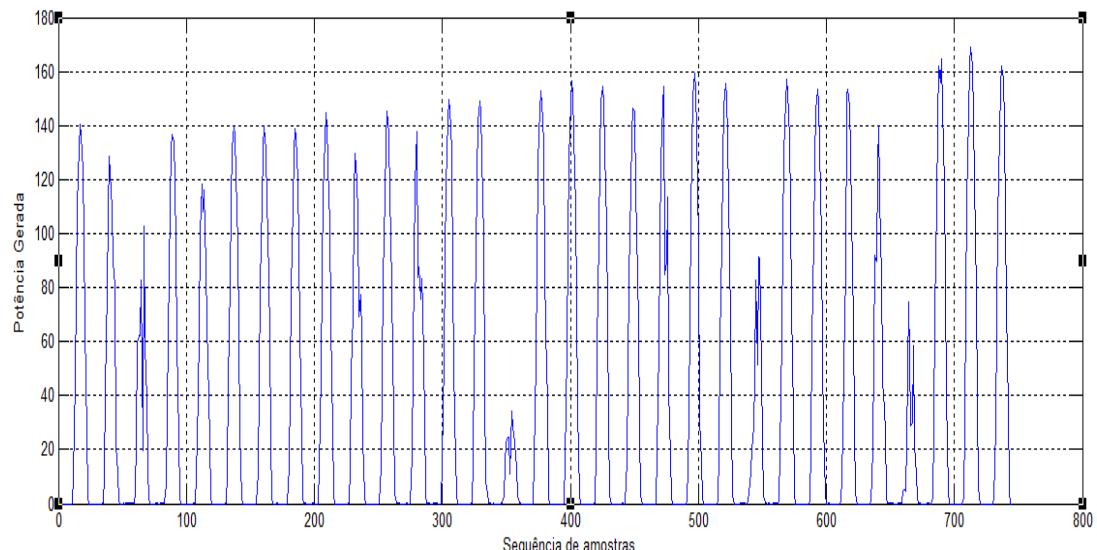
Figura 16 – Potência gerada para cada valor de irradiação solar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na simulação da potência fotovoltaica a curva possui uma atenuação devido aos fatores “red1” e “red2” que são referentes a perdas por cabos e poeira, variáveis estas importantes na análise em questão. O gráfico de potências obtidas para cada hora, a partir da função “potenciaPV”, é visualizada na figura (17).

Figura 17 – Espectro de potências em relação à entrada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para se conhecer o valor da energia gerada nesse período, é feito a integração da função “potenciaPV” (por meio da função “cumsum”), sendo usado como dados de entrada os valores de irradiação disponibilizados pelo INMET da estação automática de dados localizada em Campo Grande, Mato Grosso do Sul. É importante salientar que os dados disponibilizados são de um período de no máximo 90 dias a partir da data de busca, sendo assim, será analisado o período de menor irradiação solar e ele será tomado como base para a geração de energia mensal. Os valores obtidos das simulações podem ser vistos na Tabela (15):

Tabela 15 – Relação da geração de energia mensal.

Período	Energia Gerada
22/08/2014 a 22/09/2014	29,38 kWh
22/09/2014 a 22/10/2014	31,71 kWh
22/10/2014 a 22/11/2014	31,25 kWh
Média	30,78 kWh

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para que se reduza o valor de consumo médio utilizado pelo consumidor, disponibilizado na tabela (13), será necessário fazer o seguinte cálculo:

$$[\text{Nº de painéis}] = \frac{[\text{Consumo médio do consumidor}] - [\text{Consumo mínimo exigido}]}{[\text{Produção de energia por painél}]}$$

Substituindo os valores:

$$[\text{Nº de painéis}] = \frac{[(612 \text{ kWh}) - (100 \text{ kWh})]}{(30,78 \text{ kWh})} = 16,63$$

Logo, serão utilizados 16 painéis solares fotovoltaicos para reduzir o consumo. Dois fatos são importantes de salientar:

- Com a resolução normativa atual é necessário utilizar um consumo mínimo variável para cada tipo de instalação. Como no caso de análise a instalação é trifásica, o valor de consumo mínimo é de 100 kWh.

- O número de painéis foi arredondado para um número par próximo ao calculado, pois o micro inversor será utilizado para cada par de painéis e arredondando para um valor menor para não haver excesso de geração.

Outro fator importante é a forma como a energia é cobrada. O consumidor em questão pelo fato de ser “tipo B” pela classificação de potência tem como fator de cobrança apenas o consumo mensal, indiscriminado o período do dia (pico ou fora-de-pico), desse modo a concessionária cobrará apenas o excedente de energia somado com o consumo mínimo exigido pela mesma.

Os valores de conta de energia, assim como outros fatores relacionados a valores estão representados na Tabela (16).

Tabela 16 – Comparativo entre valores.

Conta de energia sem compensação (R\$)	Conta de energia com compensação (R\$)	Valor do investimento (R\$)	Tempo de retorno (Anos)
354,96	58	24.800,00	7

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.1.2 Compensação Eólica

Na análise de compensação eólica, os dados de potência são obtidos por meio do algoritmo 5.2 pela função “Potencia”, que representa a potência do aerogerador obtida pela curva de carga disponibilizada pelo fabricante. A energia é calculada de maneira análoga à (5.4.3), integrando a curva de potência obtida a partir dos dados de entrada.

Observa-se que nessa etapa é necessário considerar as perdas do meio onde o gerador será instalado, além das relacionadas à transmissão da energia. Os preços de energia, assim como o tempo de retorno do investimento são apresentados ao final.

A Tabela (17) apresenta os equipamentos que serão utilizados para análise do caso em questão.

Tabela 17 – Relação de materiais - Eólico.

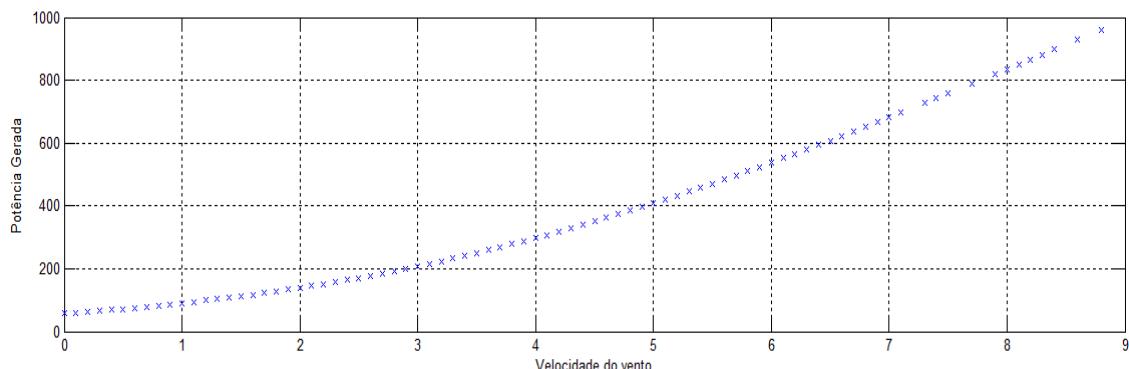
	Componentes	Marca	Preço (R\$)
Aerogerador 1	Aerogerador com inversor	Bornay – 1,5 kW	23.469,26
Aerogerador 2	Aerogerador	Bornay – 3 kW	30.198,80
	Inversor 2	Windy Boy – 3300 W	3.800,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os equipamentos selecionados, é feita a simulação da geração com os dados presentes no site do INMET. Dentre os valores disponíveis para análise encontra-se velocidade média de vento de vento, sendo esta a média dos valores medidos em um período de uma hora.

Inicialmente foram feitos os estudos de geração do aerogerador 1. O gráfico de potência obtido pode ser visualizado na Figura (18).

Figura 18 – Gráfico Vento (m/s) x Potência (W) gerada.

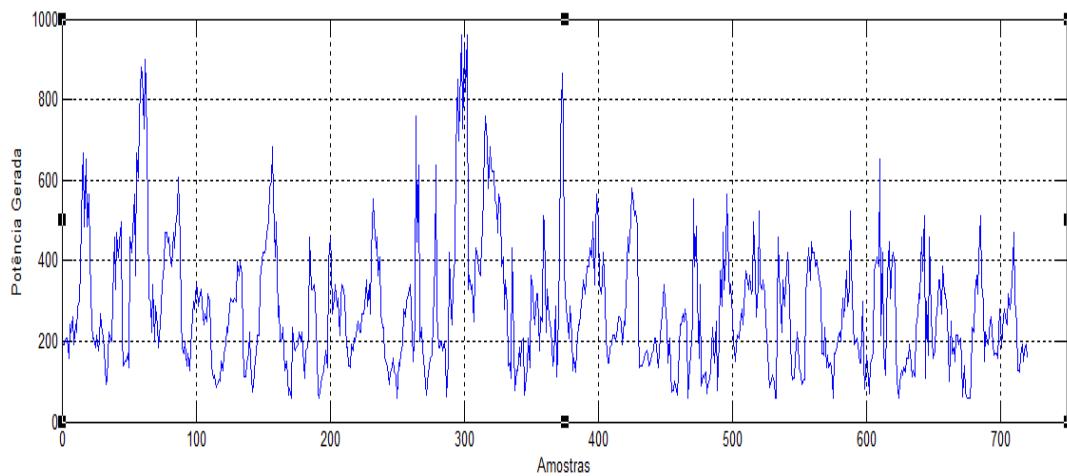


Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que a curva do aerogerador se assemelha à curva de carga teórica, observando que os valores de vento encerram em 9, pois foi o máximo obtido do banco de dados do INMET.

Outro gráfico gerado pelo algoritmo é o da potência gerada ao longo do tempo (para cada amostra sequencialmente), sendo este gráfico a base para o cálculo da energia gerada, por meio da integração da mesma. A Figura (19) apresenta estes valores de potência.

Figura 19 – Potência eólica (W) por amostra de entrada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os gráficos de potência apresentados são referentes apenas ao período entre Agosto e Setembro, variando pros meses subsequentes, porém o desenvolvimento dos cálculos e a forma o gráfico não varia consideravelmente portanto serão apresentados os gráficos apenas para este caso. Já o valor de energia, obtido pela função “cumsum” no algoritmo de (5.2) será representado pela Tabela (18).

Tabela 18 – Relação da geração de energia - aerogerador 1.

Período	Energia Eólica Gerada
Agosto a Setembro	202,47 kWh
Setembro a Outubro	157,53 kWh
Outubro a Novembro	246,04 kWh
Média	202,01 kWh

Fonte: Elaborado pelo autor.

A mesma análise é feita para o aerogerador 2, o qual obtém a energia gerada conforme visualizado na Tabela (19).

Tabela 19 – Relação da geração de energia -aerogerador 2.

Período	Energia Eólica Gerada
Agosto a Setembro	405,85 kWh
Setembro a Outubro	504,17 kWh
Outubro a Novembro	295,56 kWh
Média	401,86 kWh

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, para que se faça a compensação da energia consumida, seria necessário que o aerogerador escolhido produzisse uma média de 512 kWh (612 kWh – 100 kWh devido à instalação ser trifásica). Assim seriam necessárias duas unidades do aerogerador 1 ou uma unidade do aerogerador 2. Também é importante salientar que para a instalação do mesmo, deve-se analisar o comportamento do vento quanto a sua direção, devido à utilização do modelo de aerogerador utilizado. Uma das vantagens do modelo vertical é justamente a facilidade de instalação, pois devido a sua configuração ele transforma a energia advinda de qualquer direção. Para o aerogerador de eixo horizontal utilizado neste trabalho, a direção de instalação é referente aos ventos de sentido noroeste predominantemente.

Os valores relativos ao investimento são apresentados na Tabela (20).

Tabela 20 – Comparativo entre valores.

Equipamento	Conta de energia sem compensação (R\$)	Conta de energia com compensação (R\$)	Valor do investimento (R\$)	Tempo de retorno (Anos)
Aerogerador 1	354,96	58	46.938,00	13
Aerogerador 2	354,96	58	33.998,80	10

Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível então visualizar que a geração utilizando painéis solares fotovoltaicos possui melhor aproveitamento econômico (tempo de retorno de 7 anos), podendo ser instalado na região do consumidor de maneira a atender as demandas da normativa de micro geração da região de Campo Grande/MS.

Deve-se salientar que o estudo analisado teve como parâmetros de entrada dados de apenas três meses, podendo sofrer alterações nos valores da energia gerada e consequentemente o resultado pode ser diferenciado.

5.4.2 Caso 2

De acordo com (5.1.2), a análise será feita para um caso de suinocultura de 600 animais.

“Hoje se sabe que um suíno gera aproximadamente 2,25 kg de resíduos por dia”. (Colatto e Langer, 2011). Com os dados analisados, o valor apresentado na Tabela (5) e, de acordo com (Dangela), considerando que a quantidade de metano presente no biogás é de 50% a 80% calcula-se a quantidade de metano produzida mensalmente o para o caso em questão, por meio da equação em (4.3.1):

$$CH_4 = 30 * 600 * 2,25 * 0,067 * 0,66 * 0,67 = 1110,3642 \frac{m^3}{mês}$$

Portanto, a quantidade de metano produzido mensalmente será de 1110,3642 m³/mês. Outra informação importante para a análise é a de que segundo (KONZEN, 1983), dejetos suíños produzem 0,051 m³ de biogás por quilograma. Calculando a quantidade de biogás produzido no caso em questão e analisando estes valores pelo valor de energia produzido por m³ de gás, apresentado na tabela (8), calcula-se então a energia produzida pela suinocultura do caso em questão:

$$Energia = 2,25 * 600 * 30 * 0,051 * 1,43 = 2.953,00 \frac{kWh}{mês}$$

Pode-se então concluir que a produção energética mensal da unidade seria de aproximadamente 2,953 MWh.

Esta energia gerada pode ser então vendida para o Mercado Livre de energia, coordenado pelo CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica).

“A principal vantagem neste ambiente é a possibilidade do consumidor convencional escolher entre os diversos tipos de contratos, aquele que melhor atenda às suas expectativas de custo e benefício.” (Em: <www.mercadolivredeenergia.com.br>. Acesso em: 22 novembro 2014).

A partir de 1998 foi regulamentado pela Lei nº 9427, parágrafo 5º, art. 26, de 26 de dezembro de 1996 que os consumidores que possuírem demanda mínima de 500 kW podem adquirir energia de qualquer fornecedor, oriundas de fontes de energia renováveis como Eólica, Biomassa, Solar e por Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs). Assim, é possível fazer a venda da energia gerada por contratos de períodos menores do que os consumidores cativos, mas com algumas vantagens.

O PLD (Preço de Liquidação das Diferenças) possui caráter semanal (determinado semanalmente). Seu cálculo tem base ex-ante (analisa a disponibilidade de carga das hidroelétricas), com os preços servindo de liquidação de toda energia não contratada pelos agentes (Em: <www.ccee.org.br>. Acesso em: 22 novembro 2014).).

Os preços de PLD do mês de novembro podem ser vistos na Tabela (21).

Tabela 21 – Valor médio de PLD do mês de Novembro.

Região	PLD médio (R\$/MWh)
Norte	822,83
Nordeste	822,83
Sul	822,83
Sudeste/Centro-Oeste	822,83

Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando esse preço com outros meses como, por exemplo, Agosto e Julho de 2013, quando o valor se mantinha abaixo da faixa de 200 (R\$/MWh). O motivo principal pra esse valor tão elevado é o baixo nível dos reservatórios nas hidrelétricas.

Portanto, considerando o preço atual de PLD será feita a análise de viabilidade do investimento, mas antes é necessário dimensionar e estimar o preço do biodigestor para a decomposição dos dejetos.

Em (4.8.1) pode-se ver o método de cálculo para um Biodigestor Modelo Canadense. O volume de carga diário é obtido a partir da Tabela (22).

Tabela 22 – Volume de carga diária para suinocultura.

Espécie Animal	Esterco por animal (kg)	Quantidade de animais	Total de esterco (kg)	Relação esterco:água	Volume de água (L)	Volume da carga (dm ³ /dia)	Volume de carga (m ³ /dia)
Suíno*	3	600	1800	1:1,3	2340	4140	4,14

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, da equação [4.8.1.1] e utilizando 20 dias de retenção (DANGELA, 2012):

$$V_{cd} = 4,14 * 20 = 82,8 \text{ m}^3$$

Este valor será tomado como base para calcular as dimensões do biodigestor. Para iniciar os cálculos, será considerado:

$$r = 2,0 \text{ m}; p = 0,4 \text{ m}; L = 7,5 \text{ m}$$

O raio (r) foi escolhido para ter 2 metros, supondo que esta dimensão não ultrapassaria a altura da fossa. Já a proporção (p) foi escolhida conforme o máximo valor possível de acordo com (JUNQUEIRA, 2014). A escolha de L foi obtida por iterações utilizando o software “Excel”, visando a obtenção do volume total próximo da referência calculada anteriormente (V_{cd}). A Tabela (23) apresenta as dimensões do biodigestor.

Tabela 23 – Dimensões do biodigestor.

Parâmetros	Descrição	Valores
P	P = perímetro total transversal (campana mais fossa)	12,56 m
A%	A% = porcentagem do perímetro transversal destinado ao arco	43,5
b	b = lateral, base ou largura menor da fossa	2,37 m
a	a = largura maior da fossa	3,83 m
h	h = profundidade da fossa	2,25 m
Af	Af = área transversal da fossa	6,98 m ²
At	At = área total transversal ou área transversal da fossa mais área transversal da campana	11,62 m ²
Ag	Ag = área transversal da campana ou área transversal destinada para o gás	4,65 m ²
Vt	Vt = volume total do biodigestor (campana mais gás)	87,2 m ³
Vf	Vf = volume total da fossa	52,3 m ³
Vg	Vg = volume total do gás	34,9 m ³

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo (PERDOMO, 2000), o custo por m³ de câmara de digestão é de R\$ 150,00. Utilizando essa informação, chega-se ao valor estimado de R\$ 13.050,00.

Depois de encontrado o volume de biogás que será disponibilizado no biodigestor, necessita-se dimensionar o gerador adequado. Para isso, é utilizada a equação [4.8.2.1], que faz a análise de potência produzida pelos dejetos diários. Segundo (KONZEN, 1983), dejetos suínos produzem 0,051 m³ de biogás por quilograma. Substituindo os valores, tem-se:

$$PE = \frac{(0,051 * 2,25 * 600) * 5500 * 0,3 * 4,1868}{86400} = 5,5 \text{ kW}$$

O grupo gerador escolhido é apresentado na Tabela (24).

Tabela 24 – Características do grupo gerador.

Modelo	Marca	Potência (nominal)	Valor (R\$)
B4T – 10000 Bioflex	Branco	8 kVA	15.370,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Contabilizando os investimentos e os ganhos estimados, chega-se a Tabela (25).

Tabela 25 – Valores referentes aos fatores analisados (PLD = 822,83).

	Valor (R\$)
Energia Elétrica Gerada	+ 2.429,82/mês
Energia Elétrica Consumida	- 160/mês
Biodigestor	- 13.050,00
Grupo Gerador	- 15.370,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, o tempo de retorno do investimento será de aproximadamente 1 ano em épocas de pouca geração hidrelétrica. Porém, no período o qual o PLD está com valores inferiores o preço da energia gerada também se reduz. Visto isso, a Tabela (26) apresenta os valores para um caso de PLD em torno de R\$ 160,00/ MWh.

Tabela 26 – Valores referentes aos fatores analisados (PLD = 160,00).

	Valor (R\$)
Energia Elétrica Gerada	+ 472,48 /mês
Energia Elétrica Consumida	- 160 /mês
Biodigestor	- 13.050,00
Grupo Gerador	- 15.370,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta situação, o tempo de retorno se eleva chegando em torno de 8 anos. Por isso, a volatilidade do mercado energético devido ao índice hidrológico pode tornar o investimento mais atrativo ou menos atrativo.

Algumas informações não foram incluídas no presente trabalho como, por exemplo: Outras variáveis de custo para a criação dos suínos, possibilidade de utilização do biodigestor para a produção de biofertilizante, utilização de créditos de carbono para lucro a partir do biogás gerado. Estas análises podem vir a tornar o sistema mais atrativo, sendo de grande valia o seu estudo em projetos posteriores

6 CONCLUSÃO

A inserção das fontes renováveis de energia no sistema elétrico de potência por meio da geração distribuída possui diversas vantagens, tais como: baixa emissão de gases poluentes, redução das perdas por transmissão de energia elétrica, maior confiabilidade ao Sistema Interligado Nacional e baixo impacto ambiental.

Com a homologação da resolução 482 pela ANEEL, possibilitou-se a inserção destas novas tecnologias no mercado energético, tornando-as atrativas para os consumidores em geral, ampliando assim este mercado.

Também é possível concluir que a análise das características ambientais do local é imprescindível na análise de projeto destas fontes de geração, pois as fontes de energia como solar e eólica dependem diretamente das condições naturais disponibilizadas no local onde serão instaladas. Necessita-se fazer a análise correta dos parâmetros, buscando traçar curvas de comportamento do vento e da irradiação solar na região, utilizando de ferramentas estatísticas e probabilísticas, para assim mensurar corretamente os dados de geração.

Assim, no caso de redução de consumo verificou-se que os fatores naturais da região determinaram que a energia solar fotovoltaica trouxesse o menor custo para um mesmo objetivo, porém este comportamento não necessariamente se repetirá em outras localidades.

No segundo caso, pode-se perceber o potencial de geração que o biogás proporciona, aliado à iniciativa ambiental de redução das emissões de gases poluentes na atmosfera. No âmbito técnico, a quantidade de energia produzida está correlacionada com a energia química existente na composição do gás, além do dimensionamento correto do grupo-gerador, considerando seu fator de rendimento.

Portanto, o trabalho apresentado cumpre com o objetivo de abordar conceitualmente os conteúdos básicos de cada fonte energética, trazendo também um enfoque no projeto de cada uma.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, J. W. S. **Diagnóstico Técnico Institucional da Recuperação e Uso Energético do Biogás Gerado Pela Digestão Anaeróbia de Resíduos.** 2000. 165 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
- AZEVEDO, M. H., **Características, Produção e Utilização do Biogás Produzido a partir de Resíduos Orgânicos.** 2000. Tese (Mestrado, Promec), Porto Alegre 2000.
- BARRERA, P. **Biodigestores: Energia, Fertilidade e Saneamento Para Zona Rural.** 2. ed. São Paulo: Ícone, 1993. 106p.
- BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS, N.; BOSSANYI, E. **Wind Energy HandBook.** 2001.
- CARNEIRO, J. **Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos.** 37f. Relatório (Engenharia Têxtil) – Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2009.
- CATAPAN, A.; CATAPAN, D. C.; CATAPAN, E. A. **Formas alternativas de geração de energia elétrica a partir do biogás: uma abordagem do custo de geração da energia.** Custos e Agronegócio, Recife, v. 7, n. 1, p. 25-37, jan./abr. 2011. Disponível em: <<http://www.custoseagronegocioonline.com.br/numero1v7/biogas.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2014.
- COLATTO, L.; LANGER ,M. **Biodigestor – resíduo sólido pecuário para produção de energia.** Unoesc & Ciência – ACET, Joaçaba . 2011.
- COSTA, I. C. O. **O potencial de utilização do Biogás no estado de Mato Grosso do Sul como fonte de energia e preservação do meio ambiente.** 2014. 89f. Monografia (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande - MS, 2014.
- CRESESB. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: CRESESB, 2014. 530p.
- DEUBLEIN, D; STEINHAUSER, A. **Biogasfromwasteandrenewableresources: anintroduction.** Weinhein-Germany: VerlagGmbH&Co. KGaA, 2008.
- FERNANDES, D. M. **Biomassa e biogás na suinocultura.** 2012. 211f. Dissertação (Pós-Graduação em Energia na Agricultura à Universidade Estadual do Oeste do Paraná) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascável - PR, 2011.
- FERRAZ, J. M. G.; MARIEL, I. E. **FERRAZ, J. M. G.; MARIEL, I. E. Biogás, uma fonte alternativa de energia. Brasil, 1980.** 27. Sete Lagoas - MG: Embrapa, 1980. 27p.
- Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na estação de tratamento de esgoto de madre de Deus - Bahia.** Disponível em:

<<http://www.acquacon.com.br/cobesa/apresentacoes/pap/pap001785.pdf>> Acesso em: 20 nov. 2014.

IANNICELLI, L. A. Reaproveitamento Energético do Biogás de Uma Indústria Cervejeira. 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Taubaté. São Paulo, 2008.

JERVELL, J. T. Estudo da influência das características do vento no desempenho de aerogeradores. 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de engenharia da Universidade do Porto. Portugal, 2008.

KONZEN, E. A. Avaliação Quantitativa e Qualitativa dos Dejetos de Suínos em Crescimento e Terminação, Manejados em Forma Líquida. 1980. 56 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1980.

NASCIMENTO, C. A. Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica. 2004. 21f. Monografia (Pós-Graduação em fontes alternativas de energia) –Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, 2004.

NEVES, V. L. V. Construção de biodigestor para produção de biogás a partir da fermentação de esterco bovino. 2010. 57f. Monografia (Tecnologia em biocombustíveis) – Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba - SP, 2010.

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

OLIVER, A. P. M. et al. Manual de Treinamento em Biodigestão. Bahia, 2008.

Os ventos. . Disponível em:
<<http://www.fakeclimate.com/arquivos/MaterialDidaticoFake/02-Ventos.pdf>> Acesso em: 22 set. 2014.

OTSUBO, C. Manual de Biodigestor Sansuy, 2001.

PERDOMO, CC; Oliveira, PA. Valorize os dejetos animais: use o biodigestor. Embrapa Suínos e Aves. Folder. 2000.

PEREIRA, B. D.; MAIA, J. C. S.; CAMILOT, R. Eficiência Técnica na Suinocultura: Efeitos dos Gastos Com o Meio Ambiente e do Programa Granja de Qualidade (Mato Grosso). 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v12n2/v12n02_a13.pdf>. Acesso em: 22set. 2014.

PINTO, M. Fundamentos de Energia Eólica. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2013. 368 p.

RIBEIRO, D. S, et al. Determinação das Dimensões de um Biodigestor em Função da Proporção Gás/Fase Líquida. Revista Holos, ano 27, vol. 1. 2011.

SANTOS, A. F. S. **Estudo de viabilidade de aplicação do biogás no ambiente urbano.** MBA - Administração, Ribeirão Preto - SP, n.1, p.1-15, 2009.

SGANZERLA, E. **Biodigestor : uma solução.** Porto Alegre: Agropecuária, 1983. 86p.

SOUZA, J. S. I. **Enciclopédia agrícola brasileira.** São Paulo: EDUSP, 1995. 508p.

SOUZA, M. E. **Fatores que influenciam a digestão anaeróbia.** Revista DAE, Botucatu, v.134, n.44, p.88-94, 1984.

ROYA, B.; FREITAS, E.; BARROS, E.; ANDRADE, F.; PRAGANA, M.; SILVA, D. J. A. **Biogás – uma energia limpa.** Revista Eletrônica Novo Enfoque, v.13, n.13, p.142-149, 2011.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica.** São Paulo: Editora Érica LTDA, 2013. 224 p.