

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ISAAC WERLANG DA SIVA

**MICROGERAÇÃO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA:
estudo de viabilidade**

Porto Alegre

2016

ISAAC WERLANG DA SIVA

**MICROGERAÇÃO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA:
estudo de viabilidade**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2016

ISAAC WERLANG DA SILVA

**MICROGERAÇÃO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA:
estudo de viabilidade**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, UFRGS

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil

Prof. MSc. Igor Pasa Wiltuschnig, UFRGS

Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Porto Alegre, dezembro de 2016

*Dedico este trabalho às pessoas que mais amo
nesta vida: minha esposa, meu filho, e meus pais!*

AGRADECIMENTOS

À minha esposa pela compreensão e incentivo mesmo nos momentos em que me tornei ausente.

Ao meu filho por me trazer alegria mesmo nos dias difíceis.

Aos meus pais pela dedicação e apoio em todos os momentos que precisei.

Ao professor Tiarajú pelos conselhos, paciência e confiança.

Ao professor Jorge, da Escola Técnica de Agricultura, pelas informações e paciência.

RESUMO

A regulamentação da microgeração e minigeração e a criação do sistema de compensação de energia, com a aprovação da resolução nº 482/2012, abriu caminho para um mercado até então pouco explorado no Brasil: a geração individual de energia. Com a redução dos custos de implementação e o aumento do interesse por parte dos consumidores, a procura por informação sobre estes tipos de sistema só tem aumentado. Este trabalho tem por objetivo abordar os aspectos técnicos, estudo de potencial e viabilidade para os principais sistemas de microgeração e minigeração, sendo eles: eólico, fotovoltaico e biomassa. Além de fazer uma análise dos principais tópicos da resolução nº 482/2012, mostrando as exigências e passos que devem ser cumpridos para a instalação de um sistema de microgeração distribuída.

Palavras-chave: Engenharia Elétrica. Microgeração Distribuída. Minigeração. Energia Renovável.

ABSTRACT

The regulation of microgeneration and minigeneration and the creation of an energy compensation system, with the approval of resolution no. 482/2012, paved the way for a market that had not been explored until now in Brazil: individual energy generation. By reducing implementation costs, and increasing consumer interest, demand for information on these types of systems has only increased. This work aims to address the technical aspects, potential study and feasibility for the main microgeneration and minigeneration systems, being: wind, photovoltaic and biomass. In addition to an analysis of the main topics of resolution n° 482/2012, showing the requirements and steps that must be fulfilled for the installation of a distributed microgeneration system.

Keywords: Electrical engineering. Distributed Microgeneration. Minigeneration. Renewable energy.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	ENERGIA EÓLICA.....	16
2.1	AEROGERADORES	16
2.1.1	Classificação de aerogeradores	18
2.1.1.1	<i>Classificação quanto à disposição do eixo.....</i>	<i>18</i>
2.1.1.2	<i>Classificação quanto ao sistema de orientação</i>	<i>19</i>
2.1.1.3	<i>Classificação quanto ao sistema de regulação de potência</i>	<i>20</i>
2.1.1.4	<i>Classificação quanto ao acoplamento</i>	<i>20</i>
2.1.2	Curva de potência.....	21
2.2	TORRE DE SUSTENTAÇÃO	22
2.3	SISTEMAS EÓLICOS CONECTADOS À REDE.....	22
2.4	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO	23
2.4.1	Turbulência	24
2.4.2	Variação do potencial com a altura	25
2.4.3	Representação estatística do vento.....	25
2.4.4	Potência disponível	27
2.4.5	Potência produzida	28
2.4.6	Fator de capacidade	29
2.4.7	Recursos eólicos no Rio Grande do Sul	29
3	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	34
3.1	ESTRUTURA DA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	34
3.2	MODULO FOTOVOLTAICO	35
3.2.1	Tipos de módulos fotovoltaicos.....	37
3.2.2	Parâmetros característicos.....	38
3.2.2.1	<i>Fatores externos</i>	<i>39</i>
3.2.2.2	<i>Parâmetros característicos em associações</i>	<i>40</i>
3.3	SISTEMA DE CONCENTRAÇÃO	41
3.4	ESTRUTURAS DE SUPORTE.....	42
3.5	SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE	43
3.6	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO	43
3.6.1	Cálculo da potência gerada.....	44
3.6.2	Irradiação solar no Brasil	45
4	BIOMASSA	47

4.1	O BIOGÁS.....	47
4.1.1	Biodigestores	48
4.1.2	Fatores que influenciam a produção de biogás.....	50
4.1.3	Potencial de produção de biogás	51
4.1.4	Conversão em energia elétrica.....	52
4.1.5	Co-geração.....	54
5	INVERSORES	56
5.1	TIPOS DE INVERSORES	56
5.2	ESCOLHA DO INVERSOR	57
5.3	INVERSORES EM SISTEMAS HÍBRIDOS	58
6	LEGISLAÇÃO	59
6.1	SISTEMA DE COMPENSAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	59
6.2	ACESSO AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	61
7	<i>SMART GRID</i> E MEDIDORES INTELIGENTES	64
8	ESTUDO DE CASO	66
8.1	ESTUDO DO POTENCIAL EÓLICO	67
8.1.1	Potencial de geração com turbina VERNE555	70
8.1.2	Potencial de geração com turbina XZERES 442SR.....	73
8.1.3	Análise de custo.....	77
8.2	ESTUDO DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO	80
8.2.1	Potencial de geração com painel Canadian.....	80
8.2.2	Potencial de geração com painel Globo Brasil.....	82
8.2.3	Análise de custo.....	83
8.3	ESTUDO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO COM BIOMASSA	87
8.3.1	Potencial de geração com grupo gerador a combustão Biogás GGB 30.....	89
8.3.2	Potencial de geração com gerador a combustão Trigás TT15.....	90
8.3.3	Potencial de geração com microturbina Capstone C30	91
8.3.4	Análise de custo.....	93
8.4	COMPARAÇÃO DOS ASPECTOS FINANCEIROS	97
8.5	ESCOLHA DO SISTEMA DE GERAÇÃO	99
8.6	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	101
9	CONCLUSÕES.....	103
	REFERÊNCIAS	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais componentes de um aerogerador.....	17
Figura 2. Aerogerador de eixo horizontal tipo Barlavento (esquerda) e Sota vento (direita). .	18
Figura 3. Exemplos de aerogeradores de eixo vertical.....	19
Figura 4. Exemplo de curva de potência.	22
Figura 5. Configuração de um sistema eólico conectado à rede.	23
Figura 6. Zona de turbulência.....	24
Figura 7. Histograma de frequências.....	26
Figura 8. Curva de distribuição de Weibull.....	27
Figura 9. Fator de rugosidade.	30
Figura 10. Frequência de direção de incidência dos ventos.	31
Figura 11. Fator de forma de Weibull.	32
Figura 12. Velocidade média dos ventos a 100m.....	33
Figura 13. Estrutura da célula fotovoltaica.....	35
Figura 14. Estrutura de um módulo fotovoltaico.....	36
Figura 15. Tipos de módulos fotovoltaicos.	38
Figura 16. Curva corrente-tensão.	39
Figura 17. Variação da curva I-V com a irradiância.	40
Figura 18. Variação da curva I-V com a temperatura.	40
Figura 19. Parâmetros para diferentes configurações.....	41
Figura 20. Funcionamento de um sistema de concentração.	41
Figura 21. Sistema fotovoltaico conectado à rede.....	43
Figura 22. Radiação média anual no Brasil.....	46
Figura 23. Biodigestor tipo chinês.....	49
Figura 24. Biodigestor tipo indiano.....	50
Figura 25. Biodigestor tipo da marinha.	50
Figura 26. Ciclo de uma microturbina.....	52
Figura 27. Ciclo de um motor de combustão interna quatro tempos.....	53
Figura 28. Funcionamento de uma turbina Tesla.	54
Figura 29. Sistema fotovoltaico com microinversores e sistema com inversor central.	57
Figura 30. Sistema de compensação de energia elétrica.	60
Figura 31. Fator de ajuste.	60
Figura 32. Procedimentos e prazos.....	62
Figura 33. Estrutura de uma <i>Smart Grid</i>	64

Figura 34. Vista aérea ETA.	66
Figura 35: Instalação do anemômetro.	67
Figura 36. Histograma de frequência de velocidade instantânea.	68
Figura 37. Histograma de frequência de velocidade máxima.	68
Figura 38. Histograma de frequência de velocidade média.....	69
Figura 39. Curva de potência do aerogerador VERNE555.	71
Figura 40. Histograma de velocidades para 20 metros.....	72
Figura 41. Histograma de probabilidade e curva de potência do VERNE555.....	72
Figura 42. Curva de potência do aerogerador XZERES.	74
Figura 43. Histograma de velocidades para 30 metros.....	75
Figura 44. Histograma de probabilidade e curva de potência do XZERES.	75
Figura 45. Mapa da radiação no plano inclinado para a região de Viamão.	80
Figura 46. Custo equivalente anual.	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Exemplo de cálculo de potência.	28
Quadro 2. Tempo de retenção.....	48
Quadro 3. Indicadores para a estimativa de produção de biogás.....	51
Quadro 4. Requisitos mínimos.	63
Quadro 5. Especificações VERNE555.	71
Quadro 6. Cálculo da potência gerada.....	73
Quadro 7. Especificações XZERES 442SR.	74
Quadro 8. Cálculo da potência gerada.....	76
Quadro 9. Orçamento VERNE555.	77
Quadro 10. Orçamento XZERES 442SR.	77
Quadro 11. Custo de implementação por unidade de potência.	78
Quadro 12. Custo por unidade de potência e durabilidade dos inversores.....	78
Quadro 13. Custo por unidade de potência e durabilidade dos aerogeradores.....	79
Quadro 14. Custo por unidade de potência e durabilidade dos conjuntos aerogeradores.	79
Quadro 15. Custo anual de manutenção dos conjuntos aerogeradores.	79
Quadro 16. Especificações do painel fotovoltaico Canadian	81
Quadro 17. Especificações do painel fotovoltaico Globo Brasil.....	82
Quadro 18. Orçamento Canadian.	84
Quadro 19. Orçamento Globo Brasil.....	84
Quadro 20. Análise de custos.	85
Quadro 21. Custo por unidade de potência e durabilidade dos inversores.....	85
Quadro 22. Custo por unidade de potência e durabilidade dos painéis fotovoltaicos.....	86
Quadro 23. Custo por unidade de potência e durabilidade dos sistemas fotovoltaicos.....	86
Quadro 24. Custo anual de manutenção dos sistemas fotovoltaicos.	86
Quadro 25. Quantidade de animais.....	87
Quadro 26. Estimativa de carga diária.....	87
Quadro 27. Produção de biogás.....	88
Quadro 28. Especificações GGB 30.....	89
Quadro 29. Especificações TT15.....	90
Quadro 30. Especificações do conjunto Capstone C30.....	92
Quadro 31. Orçamento Biodigestor.....	93
Quadro 32. Orçamento Biogás GGB 30.....	93

Quadro 33. Orçamento Trigás TT15.	94
Quadro 34. Orçamento Capstone C30.	94
Quadro 35. Vida útil.	94
Quadro 36. Custo de implementação por unidade de potência.	95
Quadro 37. Custo por unidade de potência e durabilidade dos geradores.	95
Quadro 38. Custo por unidade de potência e durabilidade dos conjuntos geradores.	96
Quadro 39. Custo por unidade de potência e durabilidade dos geradores com cogeração.	97
Quadro 40. Custo anual de manutenção dos grupos geradores.	97
Quadro 41. Aspectos financeiros.	98
Quadro 42. Orçamento do sistema a biogás.	100
Quadro 43. Orçamento do sistema fotovoltaico.	100
Quadro 44. VPL.	102

1 INTRODUÇÃO

No Brasil a microgeração de energia, seja por energia renovável ou por geradores a combustão (principalmente a gasolina ou diesel), existe a muitos anos. Até 2012, devido à falta de regulamentação específica, estes sistemas operavam somente de forma isolada, sem nenhum tipo de conexão com a rede de distribuição de energia. Esta geração de forma isolada era utilizada principalmente em locais sem acesso a rede de distribuição. Devido a seu alto custo de implementação e operação, principalmente custo de combustível (no caso de geradores a gasolina ou diesel) ou de sistemas de armazenamento de energia (normalmente baterias do tipo chumbo-ácido, com custo elevado e baixa durabilidade), era pouco difundida em locais com acesso à rede

Seguindo uma tendência mundial de incentivo a geração de energia renovável, em 17 de abril de 2012 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou a resolução nº 482/2012 (revisada em 2015 pela resolução 687/2015) estabelecendo as condições gerais de acesso à rede de distribuição de energia elétrica para sistemas de microgeração e minigeração distribuída [1]. Estas condições permitem o uso de qualquer fonte de energia renovável, além da cogeração qualificada. Denomina-se microgeração centrais geradoras com potência instalada de até 75kW e minigeração aquelas com potência entre 75kW e 5MW (3MW para fontes hídricas). Além disso foi criado um sistema de compensação de energia elétrica, no qual a energia gerada excedente pode ser injetada na rede gerando créditos de energia. Tais créditos posteriormente podem ser utilizados quando o consumo de energia for maior do que a geração local, usando-se assim a energia fornecida pela concessionária [2].

Este trabalho enfatizou a microgeração distribuída em propriedades (rurais ou urbanas) onde são utilizadas principalmente as seguintes tecnologias de geração de energia renovável:

- Eólica
- Solar fotovoltaica
- Biomassa

Para cada tipo de geração, foram abordados seus aspectos técnicos e de estudo de potencial, de forma que, fosse possível determinar a melhor alternativa de geração para cada local. Além disso foi feita uma análise dos principais tópicos da resolução nº 482/2012,

mostrando as exigências e passos que devem ser cumpridos para a instalação de um sistema de microgeração distribuída.

Por fim, foi realizado o estudo de viabilidade de implementação de um sistema de minigeração distribuída na Escola Técnica de Agricultura (ETA) de Viamão, fazendo-se o estudo das características do local, através de medição e pesquisa, e o estudo do potencial de geração de cada uma das tecnologias, assim determinando-se a melhor solução para a escola.

2 ENERGIA EÓLICA

A geração de energia elétrica por sistemas eólicos consiste na transformação da energia cinética dos ventos em energia elétrica. Esta transformação é feita com o uso de aerogeradores. Um aerogerador é constituído por uma aeroturbina, responsável por converter a energia cinética do vento em energia mecânica, acoplada a um gerador, responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica [3].

No Brasil, a energia eólica teve seu primeiro grande impulso em 2003 com a implementação do PROINFA (Programa de Incentivo a Fontes Alternativas) [4]. Desde então a geração de energia eólica por sistemas de alta potência vem se expandindo rapidamente, a partir de novos inventivos governamentais, sendo atualmente o Rio Grande do Sul o estado com a segunda maior capacidade instalada [4].

Com o aumento da demanda por turbinas e geradores eólicos houve um aquecimento do mercado, estimulando a produção nacional e aumentando a oferta de produtos. A maior oferta resultou em um aumento da competitividade do mercado e conseqüentemente na redução dos custos de implementação de sistemas eólicos de alta potência [4].

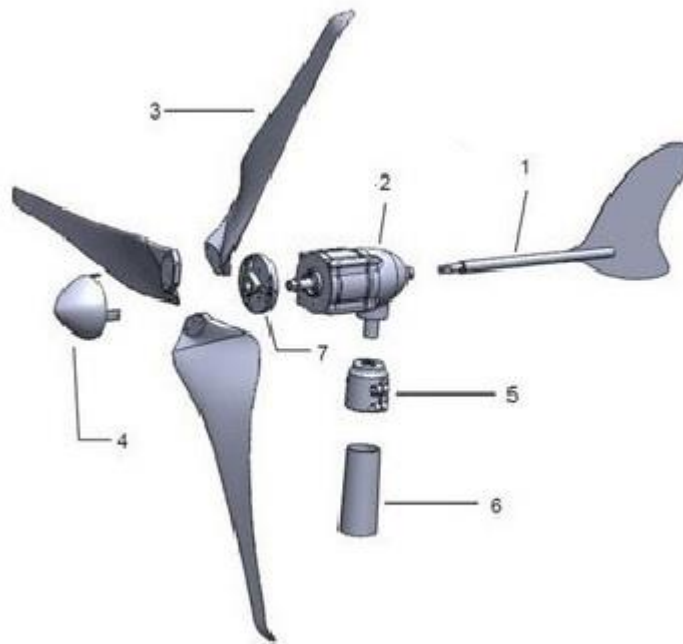
Por outro lado, os sistemas de microgeração eólica ainda são pouco comuns. Isto ocorre devido aos custos referentes ao estudo dos ventos locais para baixas alturas e a menor oferta de equipamentos para estas potências. Além disso estes geradores ainda não alcançaram uma boa maturidade tecnológica, possuindo ainda uma baixa eficiência para as baixas velocidades de vento encontradas nas regiões e alturas, mais comuns para a microgeração[3].

Nos últimos anos o governo tem investido em pesquisas sobre o perfil dos ventos em todo o território nacional, incentivando assim novos investimentos na área. A partir da extrapolação destes dados é possível estimar o potencial eólico local para qualquer altura, o que reduz significativamente os custos de implementação de sistemas de microgeração eólica.

2.1 AEROGERADORES

O aerogerador é o componente mais importante de um sistema de geração eólico. Ele é o responsável pela conversão da energia eólica em energia elétrica. Na figura 1 são mostrados os principais componentes de um aerogerador do tipo de eixo horizontal (tipo mais comum).

Figura 1. Principais componentes de um aerogerador.



Fonte: ELECTRÓNICA [5].

Os principais componentes são [5]:

- 1) Pá / Leme de orientação;
- 2) Gerador;
- 3) Pás / Lâminas;
- 4) Proteção frontal / Cúpula frontal;
- 5) Rolamento de apoio;
- 6) Mastro de suporte;
- 7) Apoio do eixo.

Um aerogerador de boa qualidade é um equipamento de baixa manutenção e alta durabilidade, podendo alcançar uma vida útil de até 20 anos [6].

2.1.1 Classificação de aerogeradores

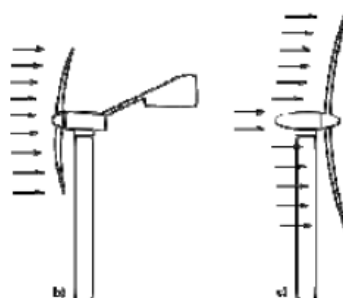
Os aerogeradores são classificados quanto as diferentes disposições do eixo do rotor, sistema de orientação e sistema de regulação de potência [3].

2.1.1.1 Classificação quanto à disposição do eixo

Os aerogeradores são divididos em duas classificações quanto à disposição do eixo, sendo elas [3]:

- Aerogeradores de eixo Horizontal: suas pás giram em um plano perpendicular à direção do vento incidente. São os mais utilizados devido a sua maior eficiência em relação aos de eixo vertical [7]. Os aerogeradores de eixo horizontal ainda podem ser subdivididos em [3]:
 - Barlavento: a incidência do vento ocorre na parte frontal da turbina. É o tipo mais utilizado pois os recursos eólicos não sofrem a influência da torre. Como ponto negativo existe a necessidade do uso de mecanismos de orientação do rotor em relação ao vento[8].
 - Sota-vento: a incidência do vento ocorre na parte traseira da turbina. Possui a vantagem de se auto alinhar com o vento, não necessitando de mecanismo de orientação. Como desvantagem os recursos eólicos são afetados pela torre antes de incidirem na turbina [7]. A figura 2 ilustra os dois tipos de aerogeradores de eixo horizontal.

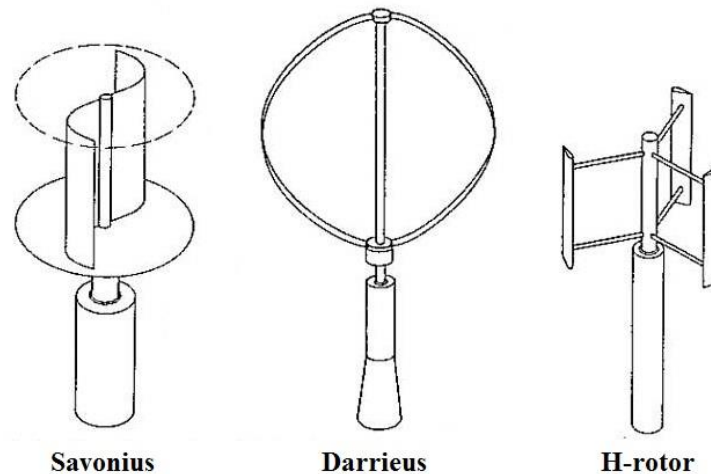
Figura 2. Aerogerador de eixo horizontal tipo Barlavento (esquerda) e Sota vento (direita).



Fonte: PEREIRA, I. Q. G. [7] (adaptado).

- Aerogeradores de eixo vertical: possuem como principal vantagem a captação dos ventos incidentes em qualquer direção, não sendo necessário o uso de mecanismos de orientação. Além disso seu gerador pode ficar localizado no nível do solo facilitando sua manutenção [8]. Ainda segundo ARRIBAS [3] existem como vantagens o menor nível de ruído, menor impacto visual e o melhor comportamento para fluxos turbulentos. Estas características fazem com que os aerogeradores de eixo vertical sejam uma boa opção para uso urbano. Por outro lado, estes aerogeradores possuem menor eficiência se comparados aos de eixo horizontal, e possuem maior dificuldade para a regulação de potência na incidência de ventos forte. A figura 3 ilustra alguns exemplos de aerogeradores de eixo vertical.

Figura 3. Exemplos de aerogeradores de eixo vertical.



Fonte: PEREIRA, I. Q. G. [7].

2.1.1.2 Classificação quanto ao sistema de orientação

Os aerogeradores do tipo barlavento necessitam de sistemas de orientação de forma que sua turbina fique alinhada com o vento [3]. Os sistemas utilizados são:

- Sistema de orientação ativo: sistema de acionamento que gira o aerogerador através de motores, ajustando sua posição conforme a direção do vento. Este sistema não costuma ser utilizado em sistemas de microgeração [3];

- Sistema de orientação passivo: sistema mecânico, onde é utilizado um leme de orientação junto ao aerogerador. O vento ao incidir neste leme orienta a turbina para a posição correta de incidência [3].

2.1.1.3 *Classificação quanto ao sistema de regulação de potência*

Os aerogeradores quando projetados possuem uma limitação em sua velocidade de giro e por consequência na velocidade do vento incidente. Esta limitação se deve ao fato de que os ventos fortes ocorrem com frequências relativamente baixas, e projetos de aerogeradores capazes de suportar tais velocidades são relativamente caros [8]. Para limitar a velocidade de giro das turbinas e, portanto, regular sua potência, existem diversas soluções. Segundo ARRIBAS [3] os sistemas mais utilizados são:

- Sem regulação: o aerogerador é projetado para suportar todas as velocidades de vento que possam incidir sobre ele;
- Regulação por desorientação: a turbina sofre um desalinhamento horizontal em relação a incidência do vento;
- Regulação por mudança de passo: variação no ângulo de ataque das pás da turbina. Este sistema é mais comum em grandes aerogeradores, não sendo utilizado na microgeração;
- Regulação por perda aerodinâmica (*Stall*): neste sistema as pás são projetadas de forma que haja uma redução do coeficiente de potência a partir de certas velocidades do vento.

2.1.1.4 *Classificação quanto ao acoplamento*

O sistema de acoplamento é a interligação entre o eixo do rotor e o eixo do gerador de um aerogerador. Este acoplamento pode ser feito de duas formas:

- Acoplamento com multiplicador de velocidades: neste sistema é utilizado um conjunto de engrenagens entre o eixo do rotor e o eixo do gerador, com intuito de compatibilizar a velocidade de giro das pás, geralmente baixa, com a velocidade exigida pelo gerador. Possui alto custo e maior frequência de manutenção, sendo o sistema mais utilizado em grandes aerogeradores [9].
- Acoplamento direto: com o avanço da tecnologia dos geradores, estes podem operar em baixas rotações com eficiência próxima à de geradores de maior rotação e, assim, serem acoplados diretamente ao rotor do aerogerador sem o uso de multiplicadores de velocidade [6]. Com isto estes sistemas tornam-se muito mais competitivos para sistemas de microgeração e minigeração pois possuem menor custo, maior durabilidade e confiabilidade mecânica. Além disto a menor eficiência do gerador é compensada, pois, este sistema não possui a perda de rendimento mecânico causada pelo conjunto de engrenagens. Devido a estas vantagens, os aerogeradores de acoplamento direto são, atualmente, os mais fabricados para uso em microgeração e minigeração [9].

2.1.2 Curva de potência

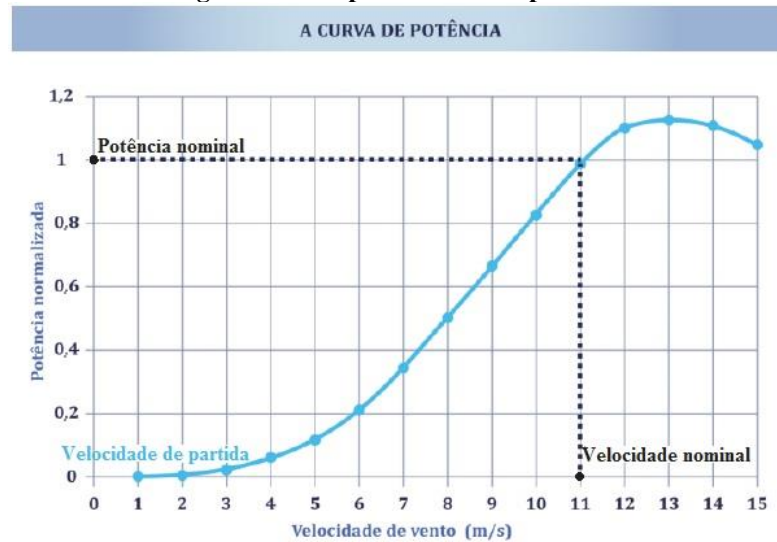
A curva de potência é a relação entre a velocidade do vento e a potência elétrica produzida pelo aerogerador. Esta é uma das características mais importantes na hora da escolha do aerogerador para um projeto pois permite o cálculo da energia que será produzida. A figura 4 mostra um exemplo de curva de potência.

Segundo ARRIBAS [3], a partir da curva de potência pode-se determinar os seguintes valores:

- Velocidade de partida: valor da velocidade do vento no qual o aerogerador começa a gerar energia;
- Velocidade nominal: valor da velocidade do vento no qual o aerogerador fornece sua potência nominal. A partir desta velocidade os sistemas de regulação deverão manter a potência de saída regulada;

- Velocidade de corte ou de desconexão: valor da velocidade do vento em que o sistema de controle coloca o aerogerador em posição de proteção contra ventos fortes.

Figura 4. Exemplo de curva de potência.



Fonte: ARRIBAS, L. [3] (adaptado).

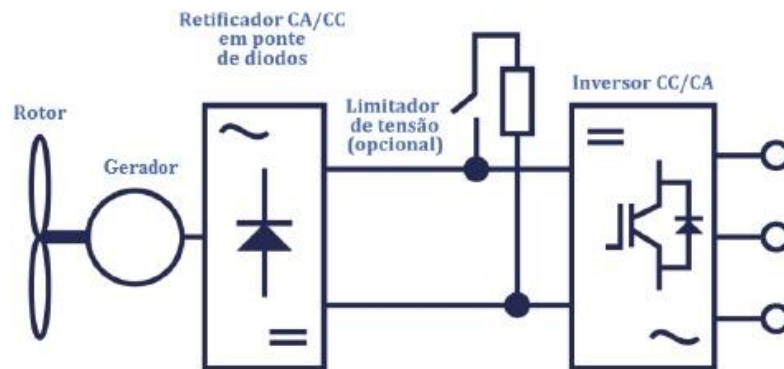
2.2 TORRE DE SUSTENTAÇÃO

A torre é o elemento de sustentação e elevação do aerogerador. São normalmente de forma tubular ou de treliça. Em sistemas de microgeração possuem alturas de 6 a não mais do que 40 metros, devido à dificuldade de construção e ao custo elevado [3].

2.3 SISTEMAS EÓLICOS CONECTADOS À REDE

Os sistemas eólicos conectados à rede possuem como grande vantagem a ausência de elementos de acumulação de energia, que são elementos de alta manutenção e custo elevado. A configuração mais comum de sistemas de micro geração eólica conectada à rede está apresentada na figura 5 [3].

Figura 5. Configuração de um sistema eólico conectado à rede.



Fonte: ARRIBAS, L. [3] (adaptado).

A partir da figura 5 é possível notar que a configuração é composta por quatro elementos [3]:

- Aerogerador: converte a energia cinética do vento em energia elétrica;
- Retificador CA/CC (pode ser dispensado se o inversor for do tipo CA/CA): responsável pela conversão da tensão trifásica da saída do aerogerador em contínua. Em sistemas de microgeração o tipo mais utilizado é constituído por uma ponte de diodos [3];
- Limitador de tensão: responsável por limitar a tensão de saída do retificador. Esta limitação tem por finalidade a proteção do inversor e ocorre através da derivação da potência excedente para uma resistência de dissipação ligada em paralelo com o retificador;
- Inversor tipo *Grid Tie* CA/CA ou CC/CA: converte a tensão/corrente gerada para o padrão da rede de distribuição. O tema, inversores, será tratado com maior profundidade no capítulo 5.

2.4 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO

O vento é um recurso energético que possui grande variação temporal e espacial. Esta variação ocorre devido a mudanças climáticas e fatores como o relevo e obstáculos locais.

Os dados sobre velocidade e direção do vento local são decisivos para o cálculo do aproveitamento eólico. Estes dados podem ser obtidos diretamente por uma campanha de

medições, com o uso de anemômetros, realizada no local e na altura em que o aerogerador será instalado, obtendo-se assim um histograma de velocidades [3]. Outra forma de se obter estes dados é através da extrapolação de dados fornecidos por mapas eólicos locais.

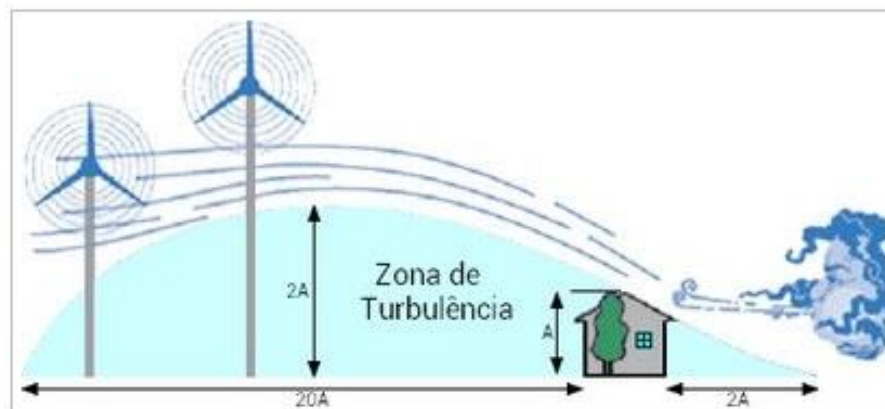
Para a extrapolação dos dados é importante conhecer o perfil vertical do vento, que é a variação da velocidade do vento com a altura devido às perturbações aerodinâmicas provocadas pelo relevo e rugosidade da superfície. Portanto informações como altura das edificações e rugosidade do local são decisivos para a determinação do potencial eólico sem o uso de campanhas de medições.

2.4.1 Turbulência

O choque das correntes de ar em árvores e construções cria zonas com rápidas variações de velocidade e trajetória do vento. As zonas de turbulência podem chegar a duas vezes a altura do obstáculo atingido e se estender por áreas com comprimento de até vinte vezes esta altura [8]. Este efeito está ilustrado na figura 6.

Em projetos de microgeração eólica deve-se avaliar cuidadosamente os efeitos da turbulência sobre os ventos incidentes, pois, como nestes projetos a turbina estará localizada a uma altura relativamente baixa, tais efeitos poderão ter grande impacto sobre potência gerada.

Figura 6. Zona de turbulência.



Fonte: ELECTRÓNICA [5].

2.4.2 Variação do potencial com a altura

A variação da velocidade do vento entre duas alturas pode ser estimada através da Lei Logarítmica dada pela equação 1 [4]:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{\ln(h_2/z_0)}{\ln(h_1/z_0)}, \quad (1)$$

onde:

- h_1 : altura na qual ocorre a velocidade do vento v_1 ;
- h_2 : altura na qual ocorre a velocidade do vento v_2 ;
- v_1 : velocidade do vento à uma altura h_1 ;
- v_2 : velocidade do vento à uma altura h_2 ;
- z_0 : fator de rugosidade da superfície.

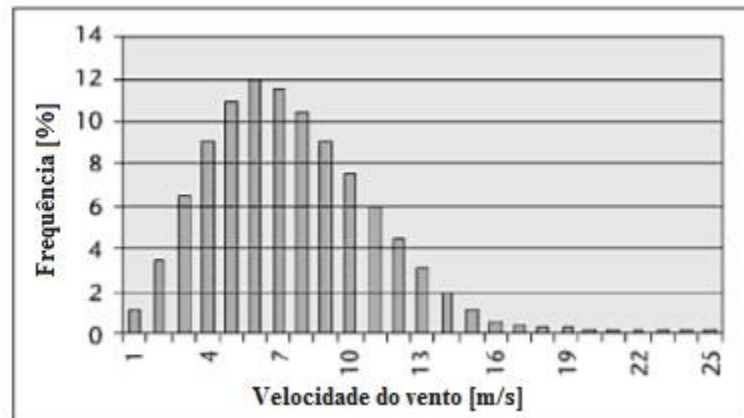
O fator de rugosidade é o fator representativo da desaceleração do vento devido ao atrito com a superfície terrestre local. Este fator pode ser determinado, em uma campanha de medições, através da coleta de dados de velocidade do vento, utilizando-se dois anemômetros simultaneamente, na mesma torre, mas em alturas distintas. Com os dados das alturas e velocidades o fator de rugosidade será obtido através da equação 2 [4]:

$$z_0 = \exp \left[\frac{v_2 \ln(h_1) - v_1 \ln(h_2)}{v_2 - v_1} \right]. \quad (2)$$

2.4.3 Representação estatística do vento

O vento pode ser representado estatisticamente de forma através de histogramas de frequências que relacionam a velocidade de incidência, em intervalos discretos de 1m/s, com a probabilidade que ela ocorra. Este é o método utilizado em campanhas de medidas. A figura 7 mostra um exemplo deste tipo de representação.

Figura 7. Histograma de frequências.



Fonte: MOREIRA, R. I. P. [8] (adaptado).

A forma do histograma também pode ser obtida através de uma função de distribuição de probabilidades do vento. A função mais utilizada no ajuste da distribuição de probabilidades do vento é a função de *Weibull*, cuja expressão é dada pela equação 3 [3]:

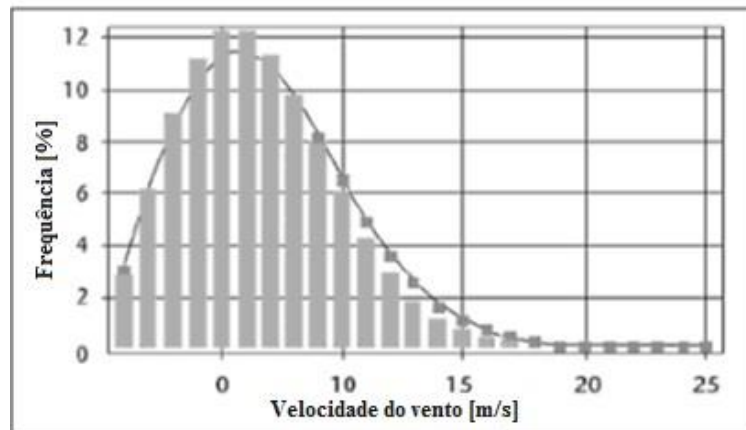
$$P(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right], \quad (3)$$

onde:

- v : Velocidade do vento para a qual se quer calcular a probabilidade de ocorrência;
- k : Fator de forma;
- c : Fator de escala (m/s).

A grande vantagem do uso da função de *Weibull*, ao invés dos histogramas, é que para um determinado local é necessário apenas conhecer os parâmetros da função para poder calcular a probabilidade de ocorrência de qualquer velocidade de vento [3]. A figura 8 mostra um exemplo de curva de distribuição de *Weibull*.

Figura 8. Curva de distribuição de Weibull.



Fonte: MOREIRA, R. I. P. [8] (adaptado).

2.4.4 Potência disponível

A potência disponível no vento pode ser calculada com a utilização da equação 4 [8]:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3, \quad (4)$$

onde:

- v : velocidade do vento (m/s);
- ρ : densidade do ar (kg/m³);
- A : área de varrimento (m²).

A densidade do ar pode ser calculada conforme a equação 5 [3]:

$$\rho = 1,225 \times (1 - (\text{altitude}(m) \times 0,0000918)). \quad (5)$$

Desta potência total, a potência máxima que poderá ser extraída pelo aerogerador, em condições ideais de uso, segundo o *Limite de Betz*, é dada pela equação 6 [10]:

$$P_{\text{máx}} = \frac{16}{27} P. \quad (6)$$

2.4.5 Potência produzida

Em projetos onde se tem os dados de campanhas de medição, em forma de histogramas de frequência, a potência média produzida por um aerogerador eólico pode ser estimada pela multiplicação da probabilidade de vento dada pelo histograma, para cada velocidade de vento, pelo valor da curva de potência produzida pelo aerogerador nesta mesma velocidade, somando, ao final, todos os resultados obtidos [3]. Um exemplo deste tipo de cálculo pode ser visto no quadro 1.

Quadro 1. Exemplo de cálculo de potência.

Velocidade do vento [m/s]	Potência [W]	Probabilidade de vento	Potência gerada [W]
1	0	12.53%	0.00
2	2	20.50%	0.36
3	19	21.99%	4.25
4	53	18.35%	9.66
5	110	12.55%	13.77
6	202	7.21%	14.56
7	329	3.52%	11.59
8	465	1.47%	6.86
9	614	0.53%	3.26
10	772	0.17%	1.28
11	939	0.04%	0.42
12	1,053	0.01%	0.11
13	1,080	0.00%	0.02
14	1,053	0.00%	0.00
15	1,009	0.00%	0.00
16	961	0.00%	0.00
17	913	0.00%	0.00
18	869	0.00%	0.00
19	825	0.00%	0.00
20	781	0.00%	0.00
Total:		98.88%	66.14

Fonte: ARRIBAS, L. [3] (adaptado).

Outra forma de se estimar potência produzida é a partir da integração do produto da função de Weibull, $P(v)$, pela curva de potência do aerogerador, $g(v)$, como apresentado na equação 7 [8]:

$$P_g = \int_0^{\infty} P(v) \cdot g(v) dv . \quad (7)$$

2.4.6 Fator de capacidade

O fator de capacidade (F_c) é a razão entre a energia produzida pelo aerogerador em um dado período (E_p) e a energia produzida caso este mesmo aerogerador estivesse operando em sua capacidade nominal no mesmo período (E_n). Este fator pode ser calculado através da equação 8 [10]:

$$F_c = \frac{E_p}{E_n}. \quad (8)$$

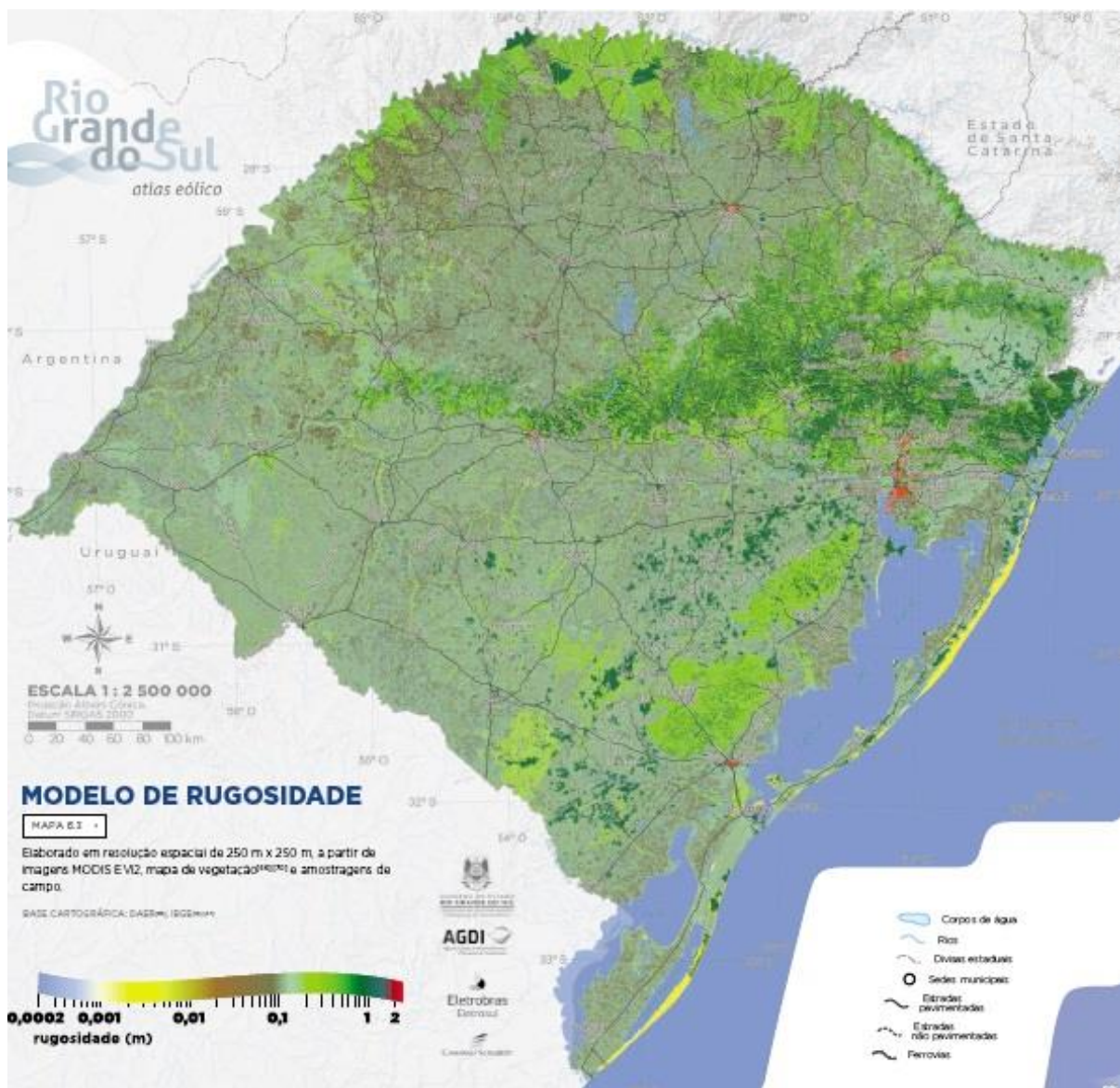
2.4.7 Recursos eólicos no Rio Grande do Sul

O Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (2014), fornece todas as informações necessárias para a avaliação de um projeto de geração eólica. Dentre os dados mais importantes para o projeto de microgeração eólica pode-se destacar: rugosidade, figura 9, direção de incidência dos ventos, figura 10, fator de forma de *Weibull*, figura 11, e velocidade média dos ventos, figura 12.

Fazendo-se uma análise dos mapas é possível perceber que a região sudoeste e as regiões litorâneas são as que apresentam maior potencial de geração eólica no Rio Grande do Sul, pois são as regiões com maiores velocidades de vento.

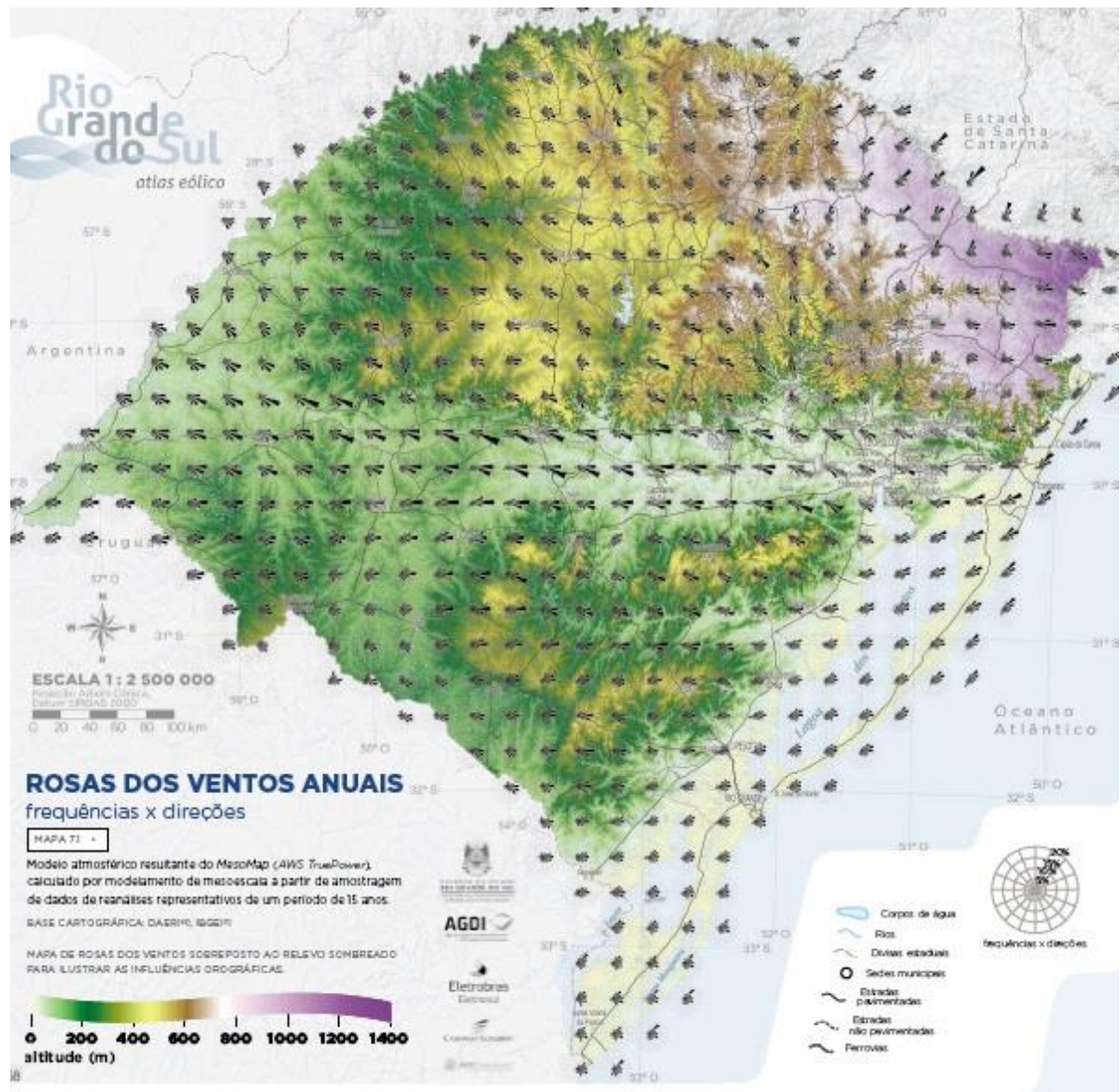
No Atlas Eólico do Rio Grande do Sul são fornecidas as velocidades médias do vento para alturas de 100m e 150m que, juntamente com o fator de rugosidade, podem ser utilizados para se estimar o perfil vertical do vento para qualquer altura [4]. Devido ao fato de este tipo de atlas ser desenvolvido prioritariamente para projetos eólicos de grande capacidade, as campanhas de medição são realizadas para alturas muito superiores às utilizadas em microgeração. Portanto ao se estimar a velocidade do vento para alturas inferiores a 30m, se estará sujeito a erros significativos.

Figura 9. Fator de rugosidade.



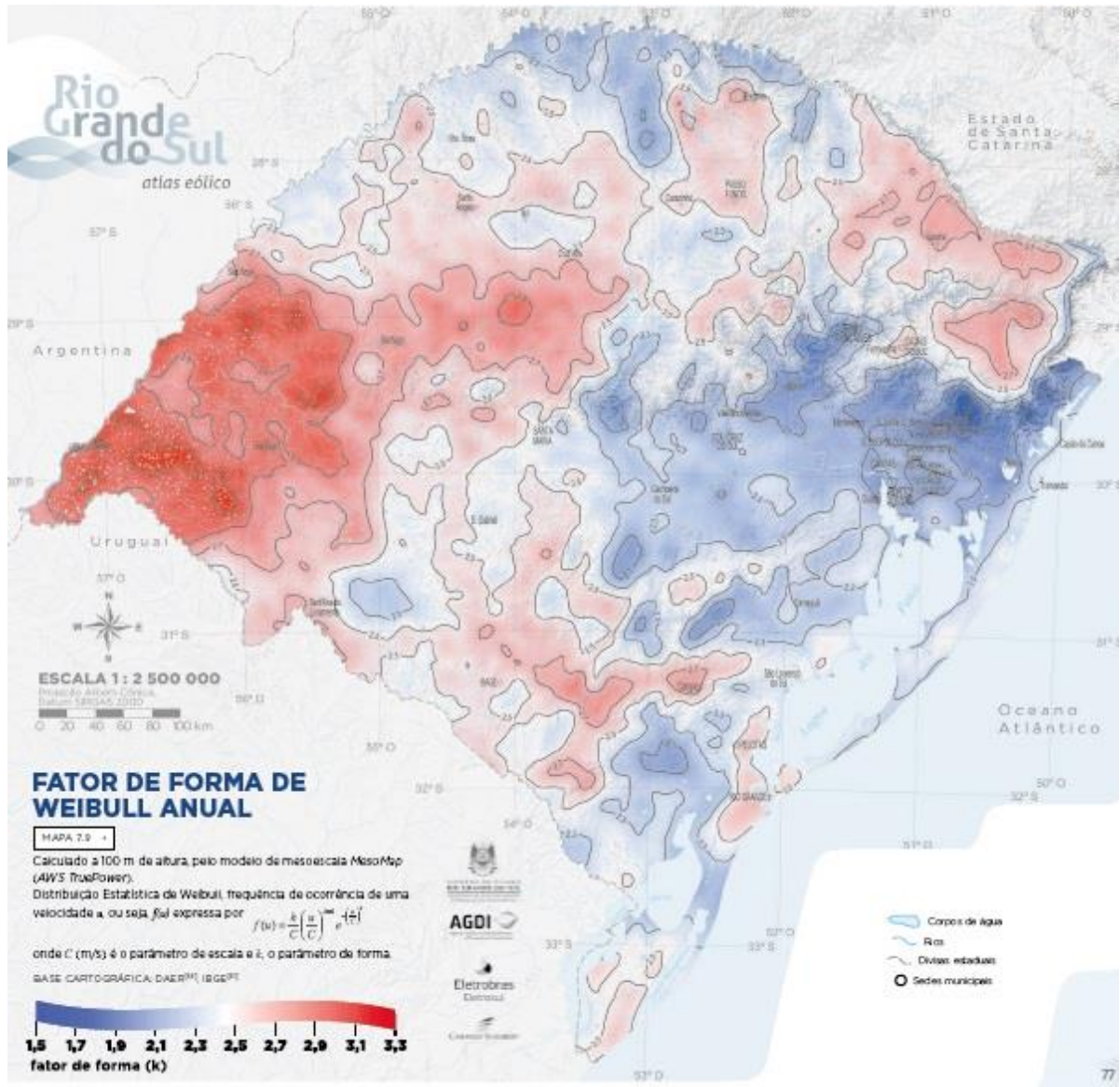
Fonte: GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL [4].

Figura 10. Frequência de direção de incidência dos ventos.



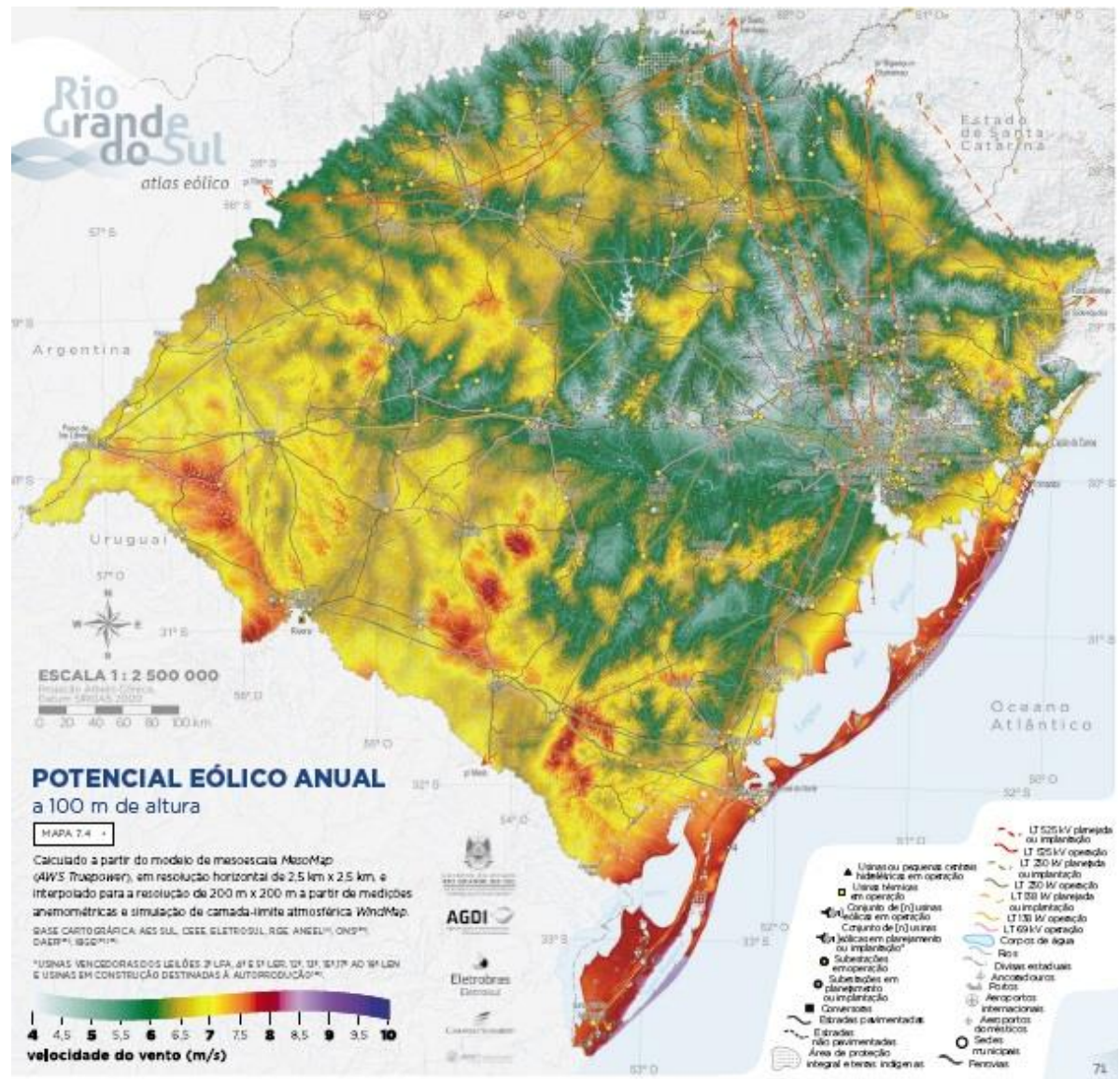
Fonte: GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL [4].

Figura 11. Fator de forma de Weibull.



Fonte: GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL [4].

Figura 12. Velocidade média dos ventos a 100m.



Fonte: GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL [4].

Além dos erros referentes as altas variações de altura, as turbinas de microgeração por estarem localizadas muito mais próximas à superfície, sofrem interferências devido a turbulência dos ventos. Em geral árvores e construções não costumam ultrapassar os 30 metros de altura, logo as zonas de turbulência não devem ultrapassar os 60 metros e por isso o efeito da turbulência não está incluído no fator de rugosidade do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul [4].

3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Nos últimos anos a geração de energia elétrica fotovoltaica vem crescendo de forma acelerada, isto se deve as novas tecnologias de construção de painéis, ao crescimento da capacidade de fabricação e aos incentivos governamentais, principalmente na Europa, para geração de energia sustentável e diversificação da matriz energética local [11].

O fundamento da geração de energia elétrica a partir da energia solar está no Efeito Fotovoltaico, descoberto por Becquerel em 1839 ao observar que certos materiais quando expostos à luz geravam uma corrente elétrica. No entanto somente entre os anos 50 e 70 que se iniciaram as principais pesquisas nesta área [11].

O principal elemento da geração fotovoltaica é a célula fotovoltaica. As células fotovoltaicas são produzidas com materiais semicondutores que absorvem a energia dos fótons da radiação solar. Esta energia quando absorvida pelos elétrons de valência do semicondutor pode causar o rompimento de suas ligações, deixando o elétron livre para se movimentar pelo material. Ao se movimentar o elétron deixa um espaço vazio em seu lugar, chamado de lacuna, que também é livre. Quando estes elétrons e lacunas se movimentam em sentidos opostos geram uma corrente elétrica capaz de alimentar circuitos externos [12].

Uma célula fotovoltaica é constituída normalmente de um material base (normalmente silício) dopado com materiais que apresentam excesso ou deficiência de elétrons em relação ao material base. Ao se dopar um lado da célula com materiais que possuem excesso de elétrons e o outro com materiais com deficiência de elétrons cria-se um campo elétrico perpendicular à célula, o conjunto assim formado é chamado de junção p-n, este campo elétrico é o responsável forçar a movimentação dos elétrons e lacunas em sentidos opostos gerando a corrente elétrica. Esta corrente elétrica gerada é que irá alimentar as cargas elétricas conectadas à célula[11].

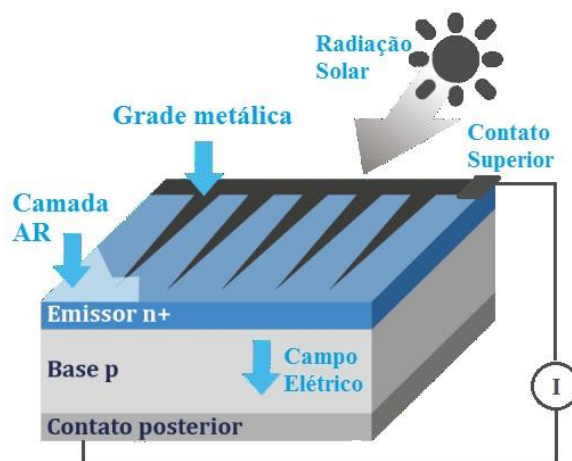
3.1 ESTRUTURA DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

Os principais componentes de uma célula fotovoltaica, mostrados na figura 13, são [11]:

- Camada antirreflexo: reduz as perdas por reflexão superficial, aumentando a eficiência;

- Contato metálico superior;
- Grade metálica: Deve possuir resistência mínima e estar disposta de forma em que possa coletar adequadamente os elétrons e permitir a maior passagem de luz possível ao interior do dispositivo;
- Camada n (emissor);
- Camada p (base);
- Contato metálico inferior.

Figura 13. Estrutura da célula fotovoltaica.



Fonte: ALONSO, M.C.; GARCÍA, F.S.; SILVA, J.P. [11] (adaptado).

3.2 MODULO FOTOVOLTAICO

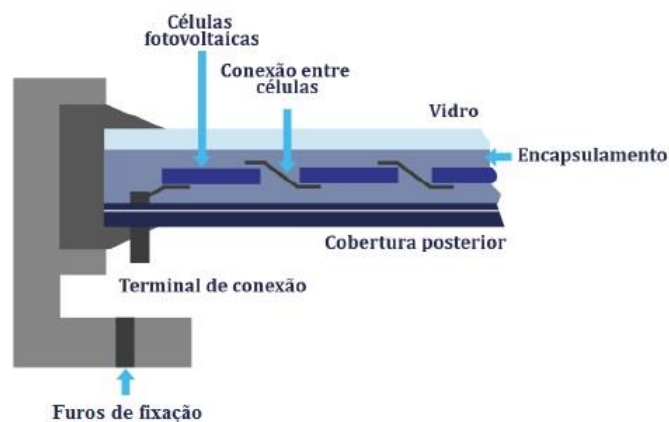
Uma célula fotovoltaica sozinha gera, em condições padrão de operação, tensões de 0,46 a 0,48V e densidades de corrente da ordem de 32mA/cm². Assim uma única célula não é capaz de gerar energia suficiente para alimentar uma residência. Para resolver este problema as células fotovoltaicas são agrupadas em associações do tipo série ou paralelo [12]. Este agrupamento de células é então encapsulado para que fique protegido dos agentes atmosféricos, assim conferindo ao conjunto rigidez mecânica e isolamento elétrico [11]. A este agrupamento se dá o nome de módulo fotovoltaico.

Os módulos fotovoltaicos são equipamento de baixa manutenção e alta durabilidade. A maioria dos módulos possui garantia de eficiência de 25 anos (funcionamento com redução máxima de 20% na potência nominal) e pode chegar a uma vida útil de 30 a 40 anos [13].

A figura 14 apresenta a estrutura mais comum de um módulo, onde pode-se observar a presença dos seguintes elementos [11]:

- Cobertura frontal: deve ser de material impermeável, de alta resistência a impactos, baixa reflexão na superfície frontal, alta transmissão para a radiação solar, estável à exposição prolongada de raios UV, ter baixa resistência térmica e ter boas propriedades de autolimpeza. Normalmente a cobertura frontal também será responsável pela rigidez mecânica do módulo. O material mais utilizado é o vidro;
- Encapsulamento: responsável pela adesão das células à cobertura frontal e posterior do módulo. Deve ser impermeável, resistente ao estresse térmico e à abrasão. O material mais utilizado é o EVA;
- Cobertura posterior: deve ser impermeável e com baixa resistência térmica. Normalmente é constituída de uma camada de *Tedlar*;
- Células fotovoltaicas;
- Conexões entre células: normalmente de alumínio ou aço inoxidável e soldadas nas células.

Figura 14. Estrutura de um módulo fotovoltaico.



Fonte: ALONSO, M.C.; GARCÍA, F.S.; SILVA, J.P. [11] (adaptado).

3.2.1 Tipos de módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos se dividem em diversos tipos, em relação ao material das células utilizadas e tecnologias de encapsulamento, conforme podem ser vistos na figura 15. Dentre estes tipos destacam-se [11]:

- Módulo de silício monocristalino (Si-m): um dos tipos mais abundantes no mercado. Fabricado com células de Si-m que, devido a seu processo de fabricação, tem forma semi-quadrada. Possui rendimento na ordem de 13 a 15%;
- Módulo de silício policristalino (Si-p): tipo abundante no mercado. Fabricados com células de Si-p que possuem forma quadrada. Seu rendimento fica na ordem de 13 a 16%;
- Módulo de silício amorfo (Si-a): são módulos de lâminas finas, possuem baixo custo e menor uso de material. Devido a suas características são mais versáteis e melhor integrados às construções. Por outro lado, possuem baixo rendimento, ficando na ordem de 5 a 8%;
- Módulo CIS: módulo de lâminas finas. Geralmente fabricados por métodos de vaporizações de disseleneto de cobre e índio sobre lâminas de vidro. Seu rendimento varia de 11 a 13%;
- Módulo de TeCd: devido às suas características, é possível de obter módulos com pouco uso de material e, portanto, extremamente finos. Seu rendimento pode variar entre 9 e 11%. Como desvantagem existe o fato de o Cd ser tóxico;
- Módulo com células de contatos posteriores: o ponto de contato frontal é substituído por um ponto de contato posterior, desta forma aumenta-se a área de passagem da luz solar para as células aumentando assim o rendimento. Sua eficiência varia de 19 a 21%.

Figura 15. Tipos de módulos fotovoltaicos.



Fonte: ALONSO, M.C.; GARCÍA, F.S.; SILVA, J.P. [11].

3.2.2 Parâmetros característicos

Os parâmetros característicos de uma célula ou módulo fotovoltaico são obtidos a partir da curva corrente-tensão (I-V), sendo os principais [11]:

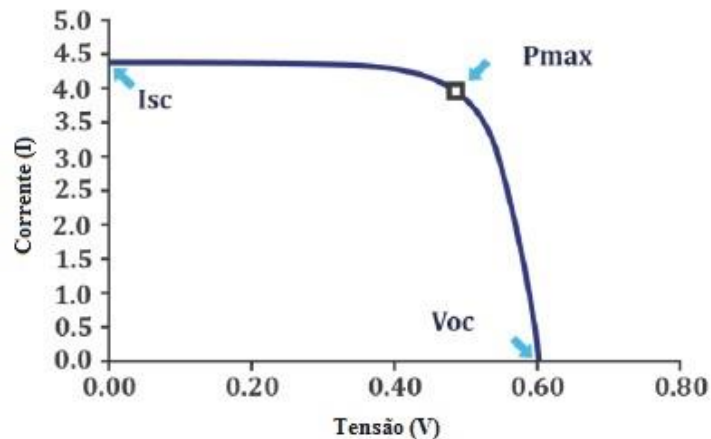
- Corrente de curto-circuito (I_{sc}): máxima corrente produzida pela célula, obtida ao se colocar os contatos da célula em curto-circuito e, portanto, com a tensão igual a zero;
- Tensão de circuito aberto (V_{oc}): máxima tensão produzida pela célula, obtida em circuito aberto, e, portanto, com a corrente igual a zero;
- Potência máxima ($P_{máx}$): máxima potência produzida pela célula, obtida no ponto onde o produto $V \times I$ tem seu valor máximo;
- Corrente no ponto de potência máxima ($I_{máx}$): valor da corrente no ponto de potência máxima;
- Tensão no ponto de potência máxima ($V_{máx}$): valor da tensão no ponto de potência máxima;

- Fator de preenchimento ou *Fill factor* (FF): quociente entre $P_{m\acute{a}x}$ e o produto $I_{sc} \times V_{oc}$, pode ser expresso em percentual. É um dos principais indicadores da qualidade da célula fotovoltaica, sendo que quanto maior o seu valor, melhor será a célula;
- Eficiência η : quociente entre a potência entregue pela célula ($P_{m\acute{a}x}$) e a potência da radiação solar incidente sobre ela (P_L), equação 9:

$$\eta(\%) = \frac{P_{m\acute{a}x}}{P_L} . \quad (9)$$

Um exemplo de curva corrente-tensão (I-V) típica de uma célula solar é mostrado na figura 16.

Figura 16. Curva corrente-tensão.



Fonte: ALONSO, M.C.; GARCÍA, F.S.; SILVA, J.P. [11] (adaptado).

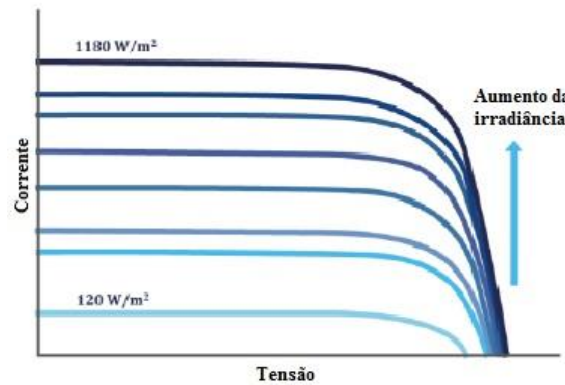
3.2.2.1 Fatores externos

A curva de I-V de um painel fotovoltaico é obtida em laboratório com radiação incidente de forma normal e com um valor predeterminado (geralmente 1000W/m^2). Além disso fatores externos, como temperatura (usualmente 25°C), também são controladas. Em projetos reais, alguns fatores externos podem irã influenciar a curva I-V, dentre eles os mais importantes são [11]:

- Irradiância: é a potência emitida pelo sol sobre a área de incidência, dada em W/m^2 . Afeta principalmente a corrente de curto-circuito. A corrente pode ser considerada

proporcional à irradiância. A figura 17 ilustra o efeito da irradiância sobre a curva I-V.

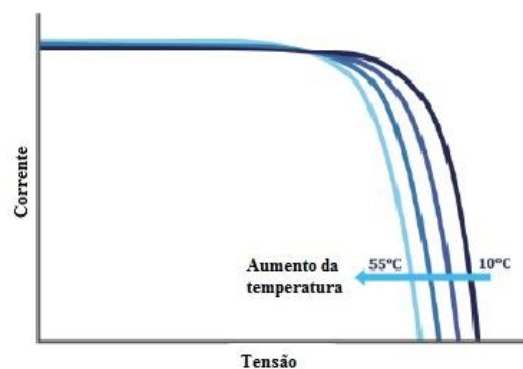
Figura 17. Variação da curva I-V com a irradiância.



Fonte: ALONSO, M.C.; GARCÍA, F.S.; SILVA, J.P. [11] (adaptado).

- Temperatura da célula: afeta principalmente a tensão e a potência. Com o aumento da temperatura haverá uma redução nestes parâmetros. A figura 18 ilustra os efeitos da temperatura sobre a curva I-V.

Figura 18. Variação da curva I-V com a temperatura.



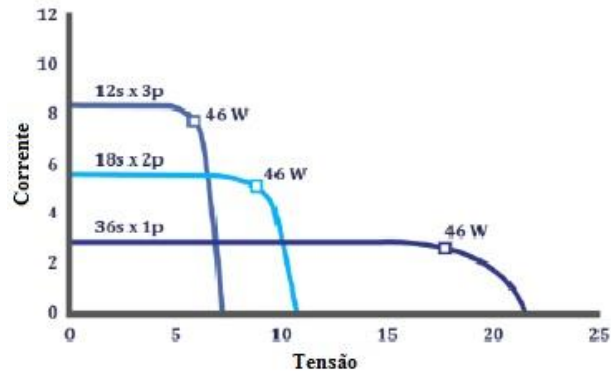
Fonte: ALONSO, M.C.; GARCÍA, F.S.; SILVA, J.P. [11] (adaptado).

3.2.2.2 *Parâmetros característicos em associações*

Em sistemas de geração fotovoltaicos geralmente são utilizadas associações de painéis fotovoltaicos. Estas associações são feitas para aumentar a potência gerada e adequar parâmetros como tensão e corrente. Para aumentar a tensão são feitas ligações em série e para aumentar a corrente são feitas ligações em paralelo. A potência gerada não será influenciada

pelo tipo de ligação e sim pela soma das potências dos painéis [11]. A figura 19 ilustra a variação dos parâmetros com diferentes configurações.

Figura 19. Parâmetros para diferentes configurações.

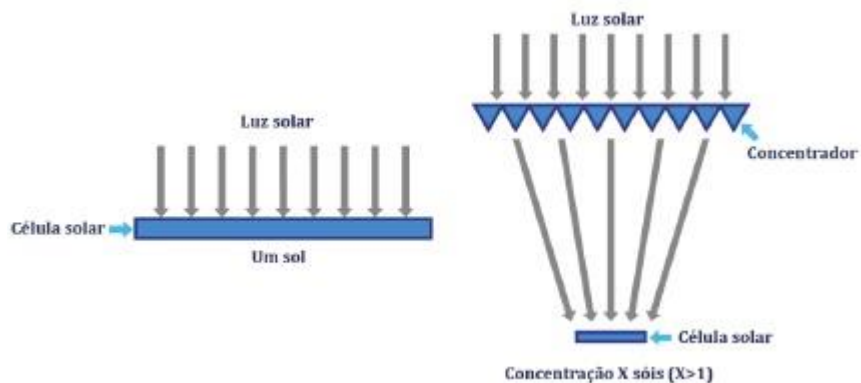


Fonte: ALONSO, M.C.; GARCÍA, F.S.; SILVA, J.P. [11] (adaptado).

3.3 SISTEMA DE CONCENTRAÇÃO

Sistemas de concentração são sistemas capazes de concentrar a radiação solar incidente sobre eles em células fotovoltaicas de menor tamanho, como ilustrado na figura 20. Ao se concentrar a radiação em uma célula aumenta-se a eficiência do conjunto e, portanto, pode-se gerar uma energia elétrica igual ou superior a que seria gerada em uma célula de tamanho equivalente, mas com a vantagem de ter um menor custo de produção, desta forma aumenta-se o rendimento do sistema fotovoltaico [11].

Figura 20. Funcionamento de um sistema de concentração.



Fonte: ALONSO, M.C.; GARCÍA, F.S.; SILVA, J.P. [11].

Os sistemas de concentração são compostos de [11]:

- Células fotovoltaicas;
- Dissipadores de calor;
- Elementos óticos. Normalmente compostos de lentes refrativas, elementos reflexivos ou uma combinação de ambos;
- Sistema de rastreamento. Responsável por acompanhar a movimentação do sol, corrigindo o ângulo de incidência solar.

3.4 ESTRUTURAS DE SUPORTE

A estrutura de suporte é de grande importância em sistemas fotovoltaicos. Ela é responsável pela rigidez e sustentação dos módulos, assim como pela orientação dos mesmos em relação a incidência solar.

Os suportes devem ser construídos com materiais resistentes a corrosão e devem garantir um bom isolamento elétrico [11].

Quanto a orientação, os suportes podem ser de três tipos [11]:

- Fixos: são os mais utilizados em sistemas de microgeração devido ao seu baixo custo;
- Com ajuste manual: permite o ajuste da inclinação do painel para as diferentes estações do ano;
- Com sistema de rastreamento: o suporte ajusta automaticamente a posição do painel conforme o ângulo de incidência solar.

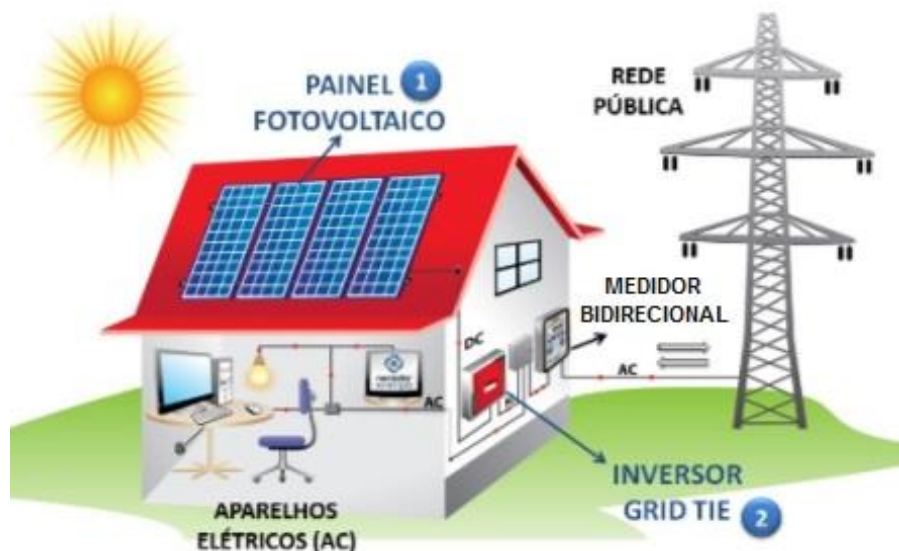
De forma geral os suportes devem ser construídos de modo que o módulo fotovoltaico fique com um ângulo de inclinação igual a latitude local, e orientado na direção de maior incidência solar. No caso do Rio Grande do Sul o módulo deve estar orientado para o norte [12].

3.5 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

Um sistema fotovoltaico conectado à rede, como ilustrado na figura 21, é, de forma usual, constituído por [13]:

- Módulos fotovoltaicos;
- Rastreador de máxima potência: rastreia o ponto de máxima potência do gerador solar fazendo ajustes nas impedâncias do gerador e das cargas através de conversores CC/CC. Desta forma o gerador trabalha em seu rendimento máximo. Pode estar integrado ao inversor;
- Inversor CC/CA *Grid Tie*: transforma a corrente contínua fornecida pelo painel fotovoltaico em corrente alternada dentro dos padrões da rede de distribuição.

Figura 21. Sistema fotovoltaico conectado à rede.



Fonte: NEOSOLAR [13] (adaptado).

3.6 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO

A avaliação do recurso solar é feita através de campanhas de medição. São feitas diversas medições do valor instantâneo da irradiância solar em um dado período. De posse destes valores, é feita a média geral [14].

Para a microgeração distribuída pode-se utilizar como base para a estimativa da potência gerada, os valores médios anuais obtidos no Atlas Brasileiro de Energia Solar [14], ou outro semelhante.

3.6.1 Cálculo da potência gerada

A potência gerada por um módulo fotovoltaico pode ser calculada pode ser obtida através da equação 10 [11]:

$$P_m = P_{m,ref} \frac{G}{G_{ref}} [1 - \gamma(T_c - T_{c,ref})], \quad (10)$$

onde:

- P_m : potência gerada [W];
- $P_{m,ref}$: potência nominal do módulo [W];
- G : irradiância à qual o módulo será submetido [W/m²];
- G_{ref} : irradiância padrão de referência do módulo, fornecida pelo fabricante [W/m²];
- γ : coeficiente de temperatura do ponto de máxima potência, fornecido pelo fabricante [%/°C];
- $T_{c,ref}$: temperatura da célula nas condições de referência, fornecida pelo fabricante [°C];
- T_c : temperatura de operação da célula, calculada através da equação 11 [11]:

$$T_c = T_a + G \left[\frac{TNOC - 20}{800} \right], \quad (11)$$

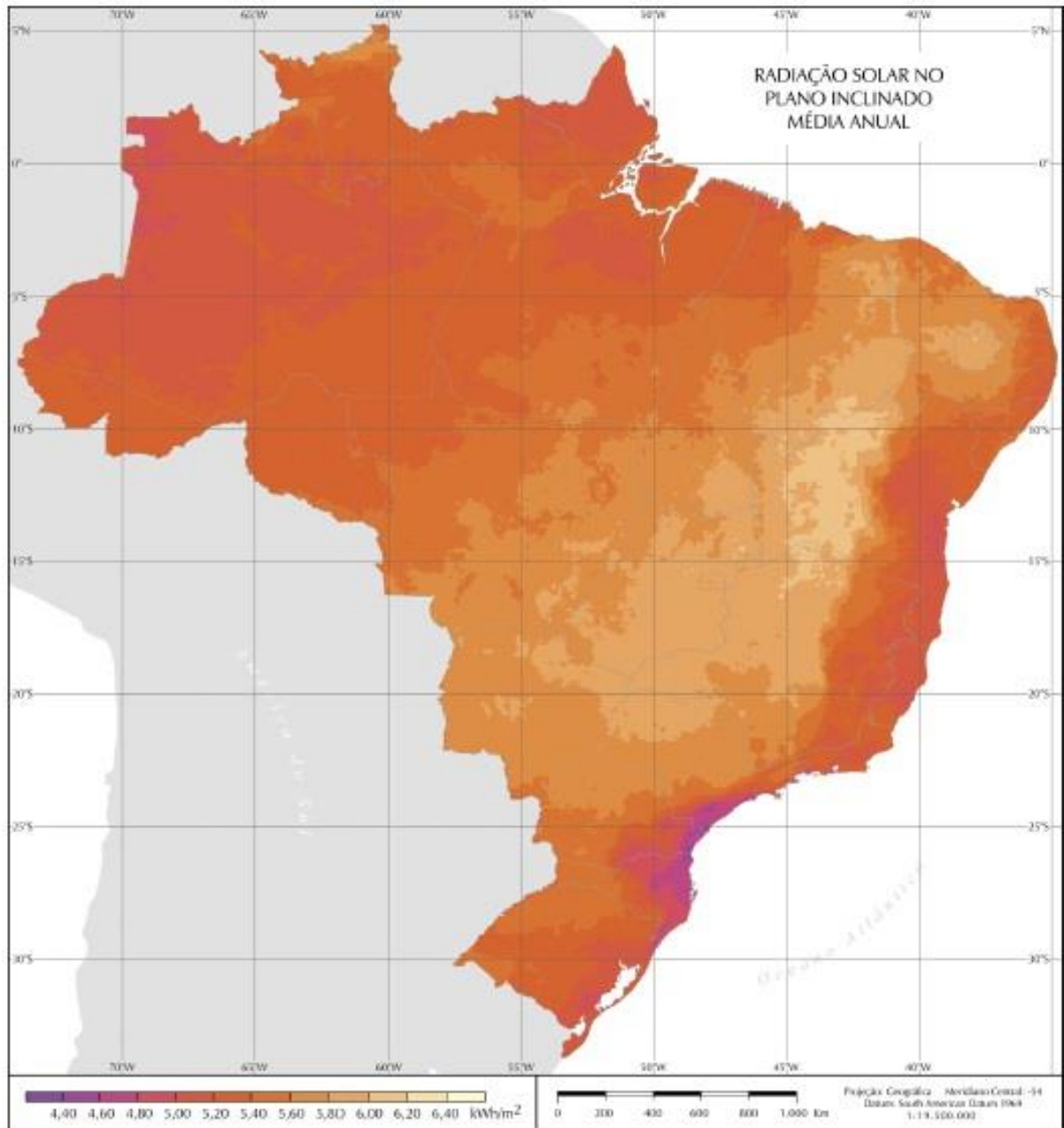
onde:

- T_a : temperatura ambiente [°C];
- $TNOC$: temperatura nominal de operação do módulo, fornecida pelo fabricante [°C];

3.6.2 Irradiação solar no Brasil

Para avaliar o potencial solar no Brasil, pode-se utilizar o mapa da radiação no plano inclinado, obtido no Atlas Brasileiro de Energia Solar [14] e ilustrado na figura 21. A vantagem deste mapa é que os valores da radiação foram obtidos na inclinação ideal de instalação de um módulo fotovoltaico (igual a latitude local). Esta inclinação é necessária pois, na maioria das cidades, os raios solares não incidem de forma perpendicular à superfície e, portanto, a radiação no plano inclinado será superior à do plano horizontal [14]. Além disso seus valores estão em kWh/m².dia, sendo necessário apenas fazer a divisão do valor obtido no mapa pelas 24 horas do dia para se obter o valor da irradiância média.

Analisando o mapa, é possível perceber que as regiões central e nordeste do Brasil são as que oferecem maior potencial de geração fotovoltaica. Isto ocorre principalmente devido ao clima seco e a latitude local. Com o clima seco há menor incidência de nuvens e, portanto, maior radiação na superfície. Já a latitude, próxima à linha do Equador, favorece, pois, o ângulo de incidência solar possui menor variação durante as diferentes estações do ano. No Rio Grande do Sul, as regiões norte e oeste também oferecem ótimos potenciais.

Figura 22. Radiação média anual no Brasil.

Fonte: PEREIRA, E. P.; F. R. M.; S. L. A.; R. R. [14].

4 BIOMASSA

O termo biomassa é utilizado para designar os derivados de matéria orgânica (animal ou vegetal) utilizados como combustível para a produção de energia. A biomassa é considerada um recurso de energia renovável pois pode ser plantada ou produzida continuamente em curtos períodos de tempo. Portanto, por não serem renováveis, os combustíveis fósseis, mesmo tendo origem na matéria orgânica, não estão inseridos no termo biomassa [15].

Existem diversas maneiras de se aproveitar a biomassa para a geração de energia. Dentre elas, a mais comum, principalmente em propriedades rurais, é a biodigestão. Na biodigestão a matéria orgânica é transformada em biogás e seu resíduo pode ser utilizado como biofertilizante [16].

4.1 O BIOGÁS

O biogás é proveniente da biodegradação anaeróbia da matéria orgânica por bactérias. A biodegradação sem a presença de oxigênio libera uma mistura de gases, principalmente gás metano e gás carbônico. Esta mistura é chamada de biogás [15].

O poder calorífico do biogás fica em torno de 6 kWh/m³, podendo variar devido, principalmente, à concentração de metano em sua composição. Para fins de comparação, o gás natural possui um poder calorífico de 10,1 kW/m³ e a gasolina 8,95 kW/l [16].

Dentre os resíduos mais utilizados na produção do biogás estão: resíduos pecuários (principalmente esterco), resíduos agrícolas, lixo doméstico e os lodos das estações de tratamento de esgoto [16]. A partir da análise dos resíduos utilizáveis, nota-se que o uso do biogás ainda ajuda a reduzir a contaminação do meio ambiente.

Para que o biogás produzido possa ser utilizado como combustível, é necessário que haja uma estrutura especialmente planejada para este fim. Em sistemas de microgeração, a estrutura utilizada é o biodigestor.

4.1.1 Biodigestores

O biodigestor é uma estrutura onde é possível otimizar a decomposição dos resíduos, através do controle das condições às quais as bactérias estão submetidas, e canalizar o gás produzido para o uso como fonte energética [15]. O resíduo da decomposição da matéria orgânica ainda pode ser utilizado como biofertilizante [14].

Um Biodigestor é normalmente constituído de [16]:

- Caixa de carga / Mescla: local onde devem ser inseridos os resíduos orgânicos misturados com água;
- Câmara de digestão: local onde ocorre a decomposição anaeróbia dos resíduos;
- Saída de gás: tubulação por onde é feita a retirada do gás da câmara de digestão;
- Caixa de descarga: local de onde são retirados os resíduos da biodigestão.

O volume de um biodigestor deverá ser calculado levando em conta o volume de matéria orgânica que será inserido na carga diária e o tempo de retenção, conforme a equação 12 [16]:

$$V = C \times t \times \frac{4}{3}, \quad (12)$$

onde:

- V : volume do biodigestor;
- C : volume da carga diária, sendo considerada a carga diária o equivalente à quatro litros de água para cada quilo de esterco [16];
- t : tempo de retenção (pode-se utilizar o quadro 2 como referência).

A constante $4/3$ aparece devido ao espaço que deve ser reservado para o gás [16].

Quadro 2. Tempo de retenção.

Matéria Prima	Tempo de
Esterco bovino líquido	20-30 dias
Esterco suíno líquido	15-25 dias
Esterco de ave líquido	20-40 dias

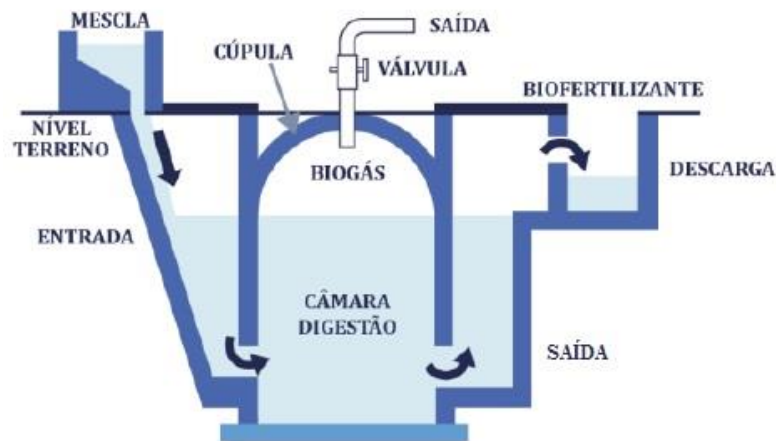
Fonte: CARREAS, N. [16].

No Brasil os biodigestores mais utilizados são os de processo contínuo, ou seja, o biodigestor recebe uma carga diária de matéria orgânica. Esta carga deve ser aproximadamente igual a matéria decomposta neste mesmo período. Cada carga necessita de um tempo de retenção para que seja transformada em biogás[15]. Normalmente este tempo varia de 10 a 55 dias dependendo dos resíduos utilizados e das condições as quais estão submetidos [16].

Os tipos mais comuns de biodigestores são [16]:

- Chinês (ou de cúpula fixa): modelo de peça única, construído totalmente em alvenaria abaixo do nível do solo[16]. Como vantagens estão a baixa variação da temperatura interna e o pouco espaço ocupado na superfície do terreno[15]. A figura 23 ilustra um biodigestor do tipo chinês.

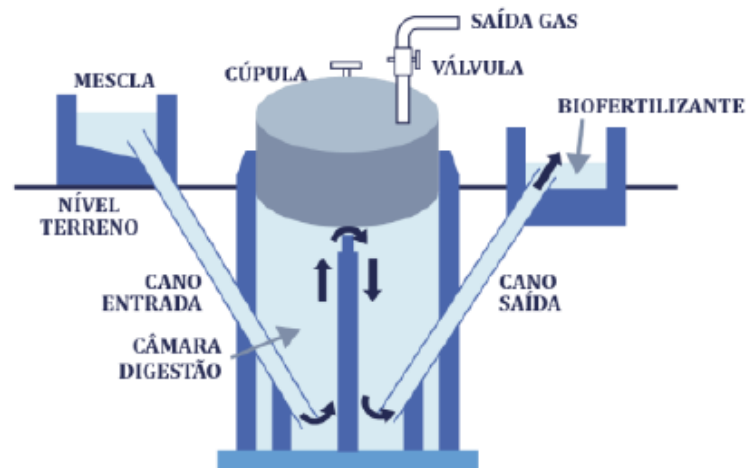
Figura 23. Biodigestor tipo chinês.



Fonte: CARREAS, N. [16].

- Indiano (ou de cúpula móvel): modelo construído geralmente em concreto, mas com uma cúpula móvel normalmente construída de metal ou fibra [15]. Possui como vantagens a baixa variação da temperatura interna e o pouco espaço ocupado na superfície do terreno, além disso por ter a cúpula móvel pode armazenar maiores quantidades de gás. Como desvantagem possui um custo elevado de construção [15]. A figura 24 ilustra um biodigestor do tipo indiano.

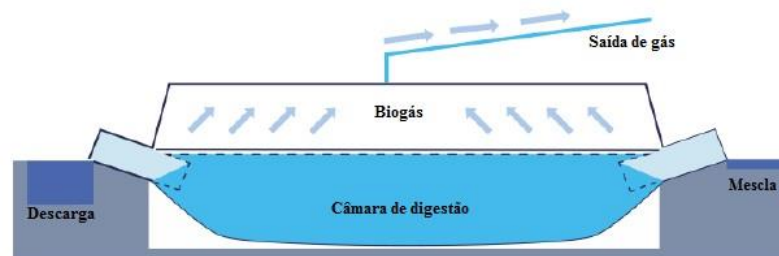
Figura 24. Biodigestor tipo indiano.



Fonte: CARREAS, N. [16].

- Da marinha (ou tubular): modelo do tipo horizontal com pequena profundidade e grande comprimento. Geralmente é fabricado em PVC ou polietileno [16]. É o tipo mais utilizado atualmente. Possui como vantagens a grande área de exposição ao sol, favorecendo a produção de gás, e a rapidez e facilidade de construção[15]. Como desvantagem está na grande área de superfície ocupada. A figura 25 ilustra um biodigestor do tipo da marinha.

Figura 25. Biodigestor tipo da marinha.



Fonte: CARREAS, N. [16].

4.1.2 Fatores que influenciam a produção de biogás

A produção de biogás, por ser um processo biológico, sofre grandes variações conforme as condições internas do biodigestor. Por isso existe uma série de fatores importantes que devem ser controlados para o bom funcionamento deste sistema [16]. Dentre estes fatores pode-se destacar [15]:

- Composição do resíduo: quanto maior a taxa de carga orgânica, maior será a produção de biogás;
- Umidade: quanto maior a umidade, maior será o potencial de produção de gás;
- Tamanho das partículas: quanto menores as partículas, mais rapidamente ocorrerá sua decomposição e assim o tempo de retenção será menor;
- pH: as bactérias responsáveis pela decomposição da matéria orgânica possuem maior rendimento para faixas de pH entre 6,6 e 7,6 [16];
- Temperatura: a faixa de temperatura ideal para a biodigestão é de 40 a 50 graus, por favorecer as bactérias responsáveis pela produção do gás metano [16].

4.1.3 Potencial de produção de biogás

O potencial de produção de biogás, em um biodigestor, pode ser estimado sabendo-se a quantidade e os tipos de resíduos orgânicos utilizados em cada carga. Esta estimativa é feita com o uso de tabelas de referência que podem ser facilmente encontradas na literatura. Um exemplo está na tabela de indicadores de SILVA, L. E. J. (2005), que fornece a estimativa de produção de biogás para cada espécie de animal, assim como sua produção de esterco diária [17].

Quadro 3. Indicadores para a estimativa de produção de biogás.

Espécie animal e condição de	Esterco	Biogás [m³/animal/dia]
Bovino estabulado	30,00	1,11
Bovino semiestabulado	15,00	0,56
Bovino não-estabulado	10,00	0,36
Suíno leitão	2,3	0,18
Suíno adulto	5,8	0,33
Galinha poedeira	0,14	0,02
Frango de corte	0,05	0,01
Ovino	2,5	0,17

Fonte: SILVA, L. E. J. [17] (adaptado).

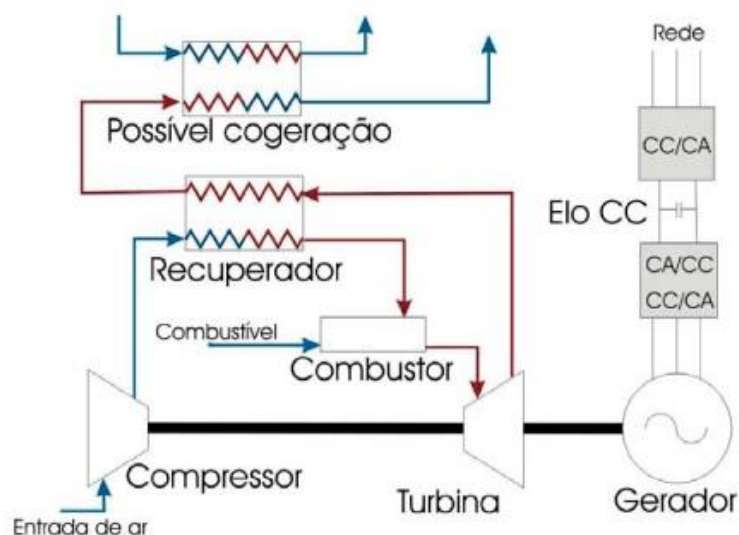
4.1.4 Conversão em energia elétrica

A conversão do biogás em energia elétrica não é feita de forma direta. Em um primeiro momento é gerada energia mecânica, com o uso de turbinas ou motores à combustão, para depois esta energia mecânica ser convertida em energia elétrica, através do acoplamento de um gerador.

Dentre as principais tecnologias de conversão, para sistemas de microgeração, estão:

- Microturbinas: sistemas de 30kW a 250kW compostos por compressor, câmara de combustão, turbina e gerador elétrico. O compressor injeta o ar atmosférico, sob pressão, na câmara de combustão, onde também é injetado o biogás. Com a combustão gerada, os gases se expandem e saem em alta velocidade, transferindo parte de sua energia cinética para a turbina, fazendo-a girar. A turbina, por sua vez, aciona o compressor e o gerador [18]. Este sistema possui eficiência global de aproximadamente 16%, mas pode alcançar até 33% se for utilizado em conjunto com um recuperador de calor, o qual utiliza o calor dos gases de exaustão para o aquecimento do ar que será injetado. As microturbinas possuem alta durabilidade (até 20 anos), baixa manutenção e baixa emissão de gases geradores do efeito estufa [19]. A figura 26 ilustra o ciclo de uma microturbina.

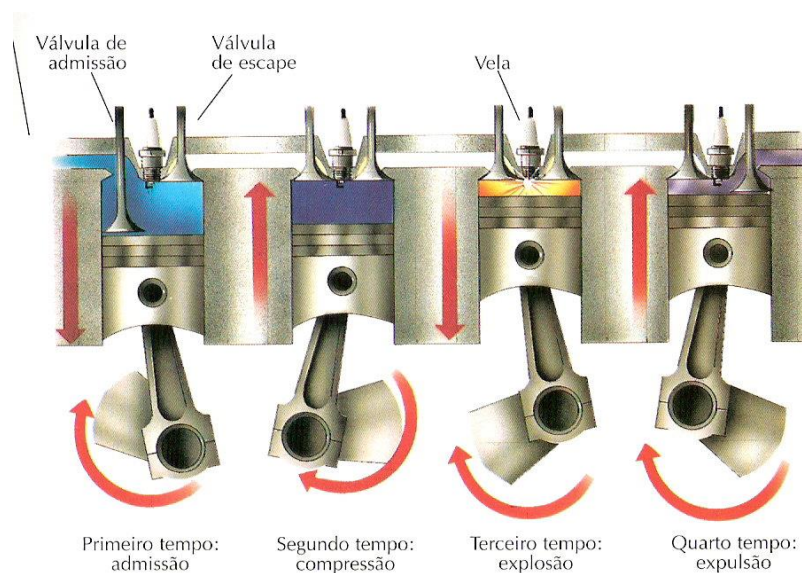
Figura 26. Ciclo de uma microturbina.



Fonte: BONA, F. S. [20].

- Motores de combustão interna: sistemas de 30kW a 20 MW [15]. Pode-se utilizar também motores a gás natural adaptados para o uso com biogás, sendo estes encontrados com potências a partir de 6kW. Os motores de combustão interna mais utilizados são os de ciclo Otto. Neste tipo de equipamento, o gás é misturado ao ar atmosférico na câmara de combustão. Com a combustão, os gases se expandem, provocando o movimento cíclico dos pistões, e assim produzindo energia mecânica para o acionamento do gerador. Este sistema é amplamente utilizado por ser de fácil aquisição e manuseio, mas possui como desvantagens, a baixa vida útil (em torno de 3 anos), a necessidade de manutenções frequentes e a maior emissão de gases causadores do efeito estufa [18]. A eficiência global de um sistema com motor à combustão é de aproximadamente 30% [19]. A figura 27 ilustra o ciclo de um motor do tipo ciclo Otto.

Figura 27. Ciclo de um motor de combustão interna quatro tempos.

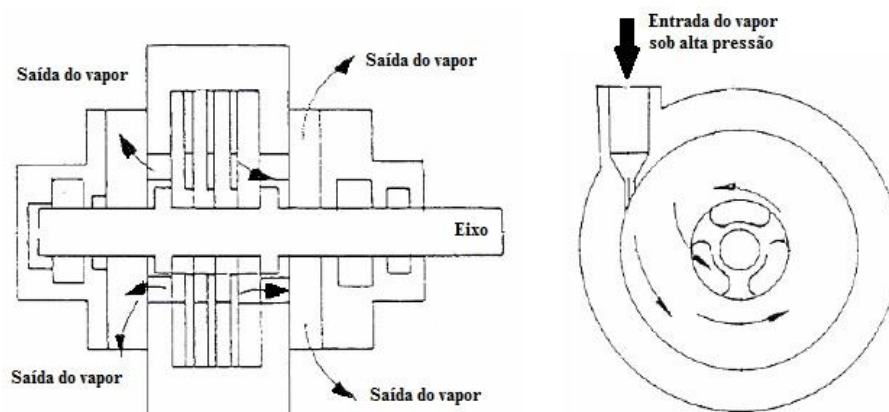


Fonte: SALAZAR, A. R. G. [19].

- Turbinas à vapor: encontradas nas mais diversas potências, variando de poucos quilowatts até mais de 1000MW. São máquinas de combustão externa, operando, geralmente, com o vapor proveniente de caldeiras. Neste sistema, o vapor sai da caldeira, sob alta pressão e alta temperatura, passando pelo interior da turbina. Ao passar pela turbina, este vapor cria um movimento rotacional em seu eixo, gerando energia mecânica, que é transferida para o gerador (acoplado ao eixo da turbina), gerando, assim, energia elétrica [21]. As turbinas à vapor possuem vida útil elevada

(até 25 anos) e baixa manutenção, mas seu rendimento global é baixo, geralmente inferior a 7%. No Brasil já estão sendo desenvolvidas microturbinas à vapor para microgeração de energia. São turbinas do tipo Tesla- Pelton, de 1kW a 50kW [22], baixo custo e rendimento global de até 4,2% [23]. A figura 28 ilustra o funcionamento de uma destas turbinas.

Figura 28. Funcionamento de uma turbina Tesla.



Fonte: BATISTA, J. C. [23] (adaptado).

É importante destacar que o biogás possui em sua composição uma pequena parcela de ácido sulfúrico e água. Estas substâncias podem reduzir a eficiência da queima do biogás, ou até mesmo causar danos ao sistema de combustão. Para evitar estes inconvenientes, é importante o uso de filtros e sistemas de desumidificação para o tratamento do biogás antes de seu uso [21].

4.1.5 Co-geração

Como visto na seção anterior, o processo de geração de energia elétrica a partir da energia térmica do biogás possui eficiência inferior à 33%. Uma maneira de se aproveitar parte da energia desperdiçada é a co-geração. Os sistemas com co-geração utilizam a energia térmica dos combustíveis para gerar mais de uma forma de energia útil e, com isso, podem chegar a rendimentos globais de até 80% [21].

A forma mais comum de co-geração é o aproveitamento dos gases de exaustão, das microturbinas ou motores à combustão, para o aquecimento de água ou até mesmo geração de vapor. Para que isso ocorra, é necessário o uso de trocadores de calor nos quais a energia térmica dos gases é transferida para a água que circula em sua parte interna. Portanto, além da energia elétrica gerada, a água aquecida (ou vapor), pode ser utilizada para diversos fins, como: aquecimento de ambiente, chuveiros, piscinas, indústria, etc. A figura 26 ilustra um possível sistema de co-geração com aproveitamento dos gases de exaustão de uma microturbina. Outras formas de co-geração com o aquecimento de água podem ser obtidas através do uso do vapor liberado nas turbinas à vapor ou até mesmo da água utilizada na refrigeração de motores de combustão [21].

Além da co-geração com o aquecimento de água, ainda é possível a co-geração com o uso de microturbinas e turbinas à vapor em um mesmo sistema, onde os gases do sistema de exaustão das microturbinas são utilizados para gerar o vapor necessário para o acionamento da turbina à vapor. Este sistema é chamado de ciclo combinado, que pode ser utilizado para aumentar a produção de energia elétrica ou para acionar cargas mecânicas [21].

5 INVERSORES

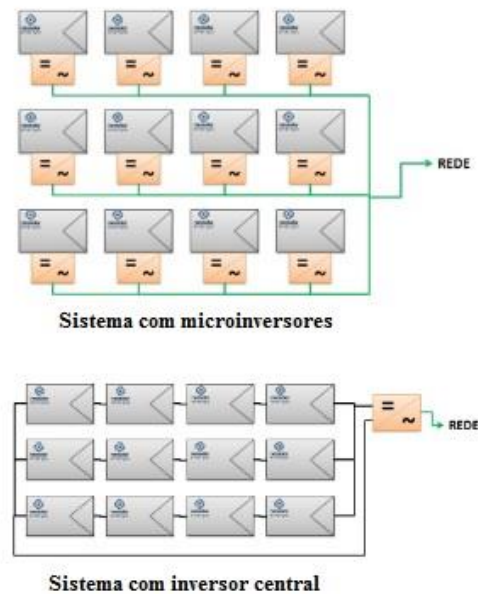
Os inversores são equipamentos capazes de converter as características de tensão e frequência da fonte geradora para outras que se adaptem melhor ao uso. Estes equipamentos são extremamente importantes em sistemas de microgeração e minigeração distribuída, pois servem como interface entre a fonte geradora e a rede de distribuição. A vida útil de um inversor varia de 10 a 15 anos [13].

5.1 TIPOS DE INVERSORES

Existem diversos tipos de inversores, dentre eles pode-se destacar:

- Inversor CC/CA: converte corrente contínua em corrente alternada. São os mais utilizados na microgeração, principalmente em conjunto com painéis fotovoltaicos [24]. Podem conter o sistema de rastreamento de máxima potência incorporado.
- Inversor CA/CA (cicloconversor): pode variar o módulo da tensão de entrada e sua frequência. São utilizados em sistemas com geração rotativa [24]. Como fazem a conversão direta, sem a necessidade de retificadores, tornam o sistema mais eficiente e confiável.
- Inversor *Grid Tie*: desenvolvido especialmente para sistemas conectados à rede de distribuição. É capaz de converter os parâmetros da energia gerada para os mesmos parâmetros da rede de distribuição e realizar a sincronia de forma automática. Deve ser capaz de monitorar a rede e se desconectar automaticamente em casos de falta ou desligamento [13].
- Microinversor: pequeno inversor projetado para ser conectado apenas a um painel fotovoltaico. Neste tipo de sistema cada painel terá seu próprio inversor, facilitando a manutenção e aumentando a eficiência e confiabilidade do sistema. Por outro lado, o custo pode ser até 200% superior ao de um inversor central equivalente [13]. A figura 29 ilustra um sistema com microinversores e um sistema com inversor central.

Figura 29. Sistema fotovoltaico com microinversores e sistema com inversor central.



Fonte: NEOSOLAR. [13] (adaptado).

5.2 ESCOLHA DO INVERSOR

A escolha de um inversor deve ser feita levando em consideração as seguintes condições:

- Tensão da rede de distribuição: 127V/220V ou 220V/380V;
- Número de fases da saída: para sistemas de microgeração até 10kW pode-se utilizar inversores monofásico. Acima deste valor devem ser utilizados inversores trifásicos [13];
- Frequência da rede de distribuição: no Brasil 60Hz;
- Eficiência do inversor: a eficiência do inversor afeta diretamente na potência gerada, portanto, quanto maior a eficiência, melhor será o inversor;
- Taxa de distorção harmônica total de tensão (DTT): deve ser inferior à 5% para sistemas conectados em redes de tensão inferior à 1 kV [25];
- Fator de potência: em sistemas com potência instalada igual ou inferior à 3kW, deve variar de 0,98 (capacitivo ou indutivo) a 1. Em sistemas de potência superior à 3kW e inferior ou igual à 6kW, deve assumir valores entre 0,95 (capacitivo ou indutivo) e 1. E para potências superiores à 6kW deve variar de 0,9 (capacitivo ou indutivo) a 1. Estes valores devem ser autorregulados pelo inversor [25].

- Tensão da fonte de geração: tensão máxima e mínima (AC ou DC);
- Potência máxima de operação: deve ser igual a potência do sistema de geração instalado (podendo ser até 15% inferior no caso de uso em sistemas de geração fotovoltaica) [13];
- Certificação: os inversores utilizados em sistemas conectados à rede de distribuição devem ser certificados conforme normas técnicas brasileiras ou internacionais, atendendo os requisitos de segurança e qualidade estabelecidos [26].

5.3 INVERSORES EM SISTEMAS HÍBRIDOS

Em sistemas de geração híbridos a formas mais comuns para a interligação das diferentes tecnologias de geração são:

- Interligação AC com o uso de inversores individuais: cada tecnologia de geração possui seu próprio inversor. Possui maior flexibilidade e confiabilidade, já que são sistemas individualizados.
- Interligação em corrente contínua: todas as fontes de geradoras são interligadas em corrente contínua utilizando-se apenas um inversor para a conexão com a rede de distribuição. Neste caso os sistemas de geração rotativos devem utilizar retificadores CA/CC [24]. Possui menor custo de implementação, mas todos os geradores devem fornecer a mesma tensão em corrente contínua.

6 LEGISLAÇÃO

A microgeração e minigeração distribuídas são regidas pela resolução normativa N° 482, de 17 de abril de 2012 (revisada em 2015 pela resolução 687/2015), a qual estabelece as condições gerais de acesso à rede de distribuição e cria o sistema de compensação de energia elétrica [26].

Segundo a resolução, os sistemas de geração distribuída devem gerar energia elétrica exclusivamente a partir de fontes de energia renovável ou co-geração qualificada, sendo definido:

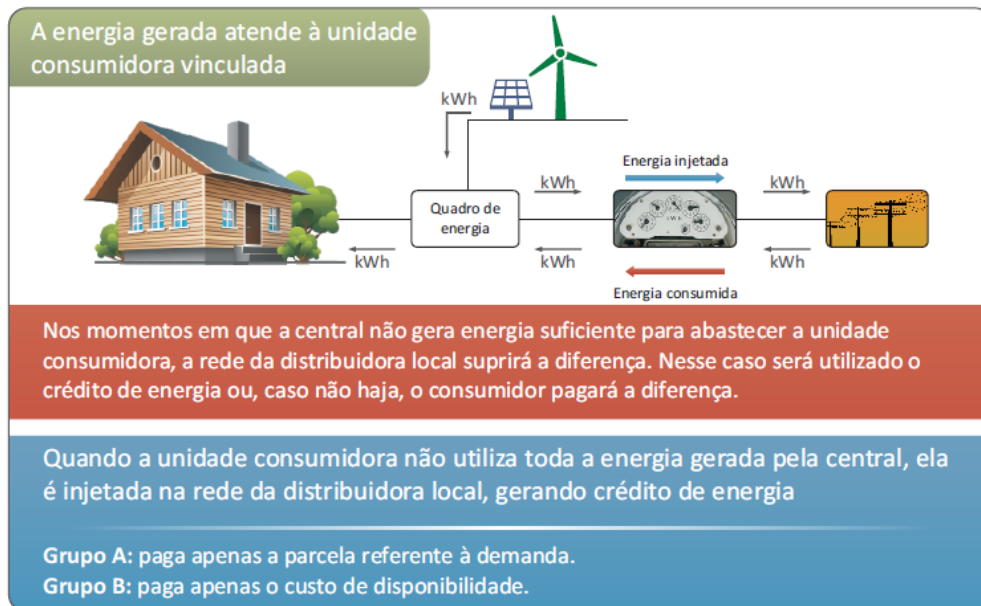
- Microgeração: unidade geradora com potência instalada de até 75kW [26];
- Minigeração: unidade geradora com potência instalada superior à 75kW e menor ou igual a 5MW (3MW para fontes hídricas) [26]

6.1 SISTEMA DE COMPENSAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O sistema de compensação de energia elétrica (figura 30) permite que a energia elétrica ativa gerada pela microgeração ou minigeração, que exceder o consumo, seja injetada na rede da distribuidora gerando créditos de energia (kWh) para o uso futuro. Estes créditos gerados têm validade de 60 meses e podem ser utilizados sempre que o consumo de um mês exceder a geração do mesmo período. Caso o consumo de energia tenha sido superior a geração, e não houver créditos de energia disponíveis, o consumidor pagará o valor referente à diferença entre a energia gerada e a energia consumida [27].

É importante ressaltar que, mesmo nos meses em que a energia gerada tenha sido superior à consumida, o consumidor deverá pagar, à concessionária de energia elétrica, um valor referente ao custo de disponibilidade (para sistemas de baixa tensão) ou à demanda contratada (para sistemas de alta tensão). O custo de disponibilidade é um valor equivalente a 30kWh (monofásico), 50kWh (bifásico) ou 100kWh (trifásico) [27].

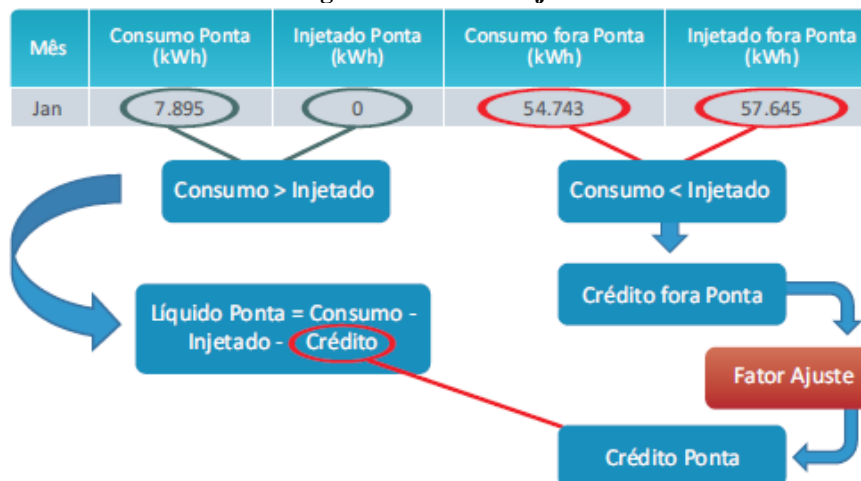
Figura 30. Sistema de compensação de energia elétrica.



Fonte: ANEEL [27].

Nas unidades consumidoras onde o valor da tarifa varia com o horário (ponta ou fora de ponta), utiliza-se um fator de ajuste, para corrigir o valor da energia injetada, caso seja necessária sua utilização em um posto tarifário diferente do qual foi obtida [27].

Figura 31. Fator de ajuste.



Fonte: ANEEL [27].

Além da utilização dos créditos de geração para a redução da fatura na propriedade à qual os equipamentos estão instalados, esta resolução prevê ainda as seguintes possibilidades [28]:

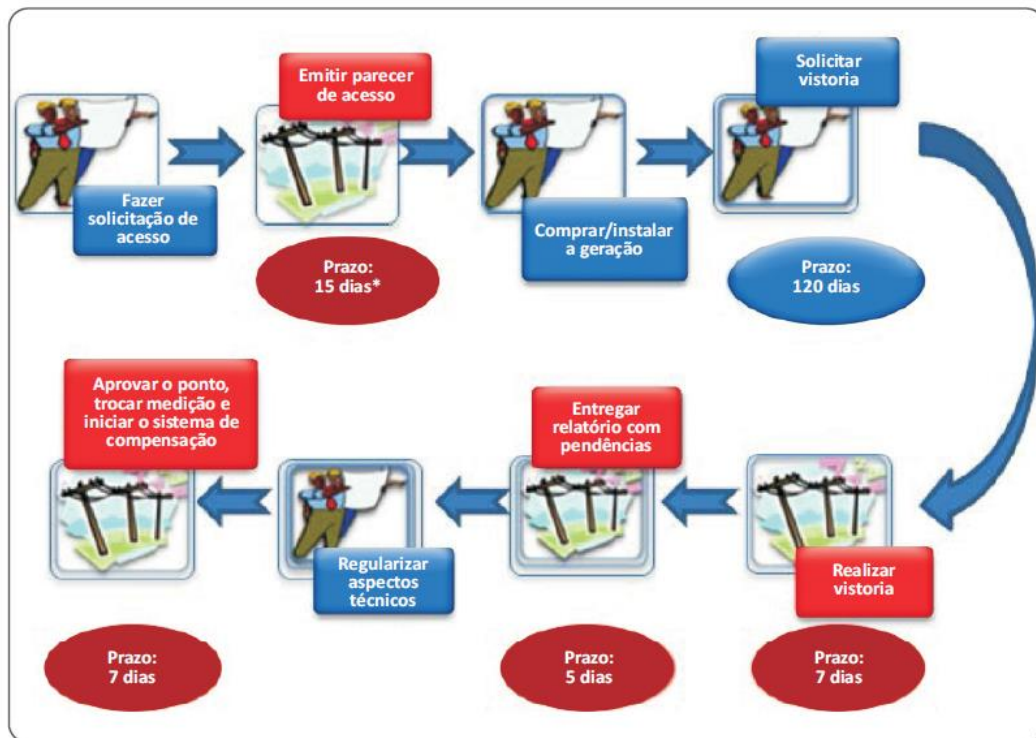
- Geração compartilhada: união de consumidores, de uma mesma área de concessão, por meio de cooperativa ou consórcio, de forma que, a energia excedente, gerada pela unidade com microgeração ou minigeração, possa ser distribuída, em forma de crédito, entre as unidades consumidoras previamente cadastradas, mesmo estas estando em local diferente da fonte geradora [28];
- Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras (condomínios): unidades consumidoras independentes localizadas em uma mesma propriedade, ou em propriedades contínuas, onde a área de uso comum é uma unidade consumidora distinta com microgeração ou minigeração [28]. Neste caso é necessário o uso de medidores distintos para geração e consumo, de forma que a energia gerada possa ser distribuída, em forma de crédito, entre as unidades consumidoras;
- Autoconsumo remoto: um mesmo titular possui diversas unidades consumidoras, dentro de uma mesma área de concessão, sendo uma ou mais com microgeração ou minigeração distribuída. Neste caso, a energia excedente gerada, em uma unidade, pode ser distribuída, em forma de crédito, entre as unidades sem geração[28].

É importante ressaltar que, em qualquer uma destas possibilidades, o percentual de energia distribuído para cada unidade consumidora deve ser determinado pelo titular da unidade com microgeração ou minigeração distribuída [28].

6.2 ACESSO AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

O processo de acesso ao sistema de distribuição por sistemas de microgeração e minigeração distribuída não necessita de contrato e é relativamente simples e rápido. A figura 32 ilustra, de forma resumida as etapas e prazos que devem ser cumpridos pelo solicitante e pela concessionária de energia local.

Figura 32. Procedimentos e prazos.



Fonte: ANEEL [28].

A potência máxima que poderá ser instalada, em um sistema de microgeração e minigeração, é igual a potência disponível (no caso de baixa tensão) ou à demanda contratada (no caso de média tensão) no período anterior à solicitação de acesso. Esta potência pode ser aumentada se solicitado à concessionária no momento da solicitação de acesso. Para os casos em que houver a solicitação de aumento de potência o prazo para a emissão do parecer será aumentado para 30 dias [28].

Para a medição do consumo e geração de energia é necessário o uso de um medidor bidirecional ou dois medidores unidirecionais (um medido o consumo e o outro a geração). Nos sistemas de microgeração o custo do medidor é de responsabilidade da distribuidora, enquanto que, na minigeração, este custo é de responsabilidade do consumidor [28].

Os requisitos mínimos para um sistema de microgeração ou minigeração distribuída estão listados no quadro 4.

Quadro 4. Requisitos mínimos.

EQUIPAMENTO	Potência Instalada		
	Menor ou igual a 75 kW	Maior que 75 kW e menor ou igual a 500 kW	Maior que 500 kW e menor ou igual a 5 MW
Elemento de desconexão	Sim	Sim	Sim
Elemento de interrupção	Sim	Sim	Sim
Transformador de acoplamento	Não	Sim	Sim
Proteção de sub e sobretensão	Sim	Sim	Sim
Proteção de sub e sobrefrequência	Sim	Sim	Sim
Proteção contra desequilíbrio de corrente	Não	Não	Sim
Proteção contra desbalanço de tensão	Não	Não	Sim
Sobrecorrente direcional	Não	Sim	Sim
Sobrecorrente com restrição de tensão	Não	Não	Sim
Relé de sincronismo	Sim	Sim	Sim
Anti-ilhamento	Sim	Sim	Sim
Medição	Sistema de Medição Bidirecional	Medidor 4 Quadrantes	Medidor 4 Quadrantes

Fonte: ANEEL [28] (adaptado).

7 SMART GRID E MEDIDORES INTELIGENTES

Smart Grid ou redes inteligentes são sistemas nos quais o sistema de energia elétrica é automatizado. Isto ocorre através de um sistema de comunicação, bidirecional, paralelo ao sistema de energia, permitindo assim [29]:

- Auto recuperação: o sistema consegue detectar e corrigir falhas automaticamente;
- Medição de consumo de energia remoto: a concessionária passa a ter acesso em tempo real aos dados de consumo de energia do consumidor;
- Dados sobre a qualidade da energia: os consumidores e a concessionária passam a ter acesso em tempo real aos dados de qualidade da energia elétrica;
- Gestão inteligente de sistemas elétricos: com a automatização do sistema sistemas como iluminação pública podem ser monitorados e acionados remotamente, aumentando sua qualidade e eficiência;
- Casas inteligentes: o sistema de redes inteligentes permite ao usuário o monitoramento do sistema elétrico de sua casa e a geração individual de energia elétrica através da microgeração e minigeração distribuída.

Com a implantação das redes inteligentes, aumentando o monitoramento da rede e descentralizando a produção de energia elétrica, o sistema elétrico tende a se tornar muito mais eficiente, pois, haverá uma redução nas perdas elétricas geradas pelas longas redes de transmissão e distribuição de energia [30]. A figura 33 mostra a estrutura de uma *Smart Grid*.

Figura 33. Estrutura de uma *Smart Grid*.



Fonte: LOPES, L.; FERNANDES, N. C.; SAADE, D. C. [30].

Para a implementação de redes inteligentes, um dos componentes de maior importância é o medidor de energia inteligente, sendo este capaz de [29]:

- Fornecer os dados de consumo do cliente remotamente;
- Fazer a comunicação entre o cliente e a concessionária de energia elétrica;
- Fornecer ao consumidor informações como tarifa e qualidade da energia elétrica;
- Permitir a conexão de sistemas de geração distribuída, medindo o consumo e a geração de energia local;
- Permitir o corte e religação da energia de forma remota;
- Possibilitar a cobrança de tarifas diferenciadas em horário de pico.

8 ESTUDO DE CASO

O estudo foi realizado na Escola Técnica de Agricultura (ETA). Situada em Viamão, às margens da RS-040 e a uma altitude de 52m do nível do mar. A escola possui uma área total de aproximadamente 407 hectares, onde ensina técnicas de agricultura e pecuária aos seus aproximadamente trezentos alunos. O local conta com salas de aula, alojamento para os estudantes, refeitório, hortas, área para ordenha de vacas leiteiras, além de criação de suínos, ovinos e gado de corte.

O consumo mensal médio de energia elétrica, obtido através da média de consumo dos meses de setembro, outubro e novembro, é de 28.670 kWh/mês. Dividindo este valor pelo número de horas contidas em um mês se obtém uma carga média de 39,83 kW.

Figura 34. Vista aérea ETA.



Fonte: Escola Técnica de Agricultura [31].

8.1 ESTUDO DO POTENCIAL EÓLICO

Para a análise do potencial eólico do local foi instalado um anemômetro com *datalogger*, fabricado pela WRFComercial, o qual fornece as velocidades instantânea, média e máxima a cada minuto. A instalação foi feita com o uso de uma torre de metal de 10 metros de altura. A figura 35 mostra o anemômetro já instalado.

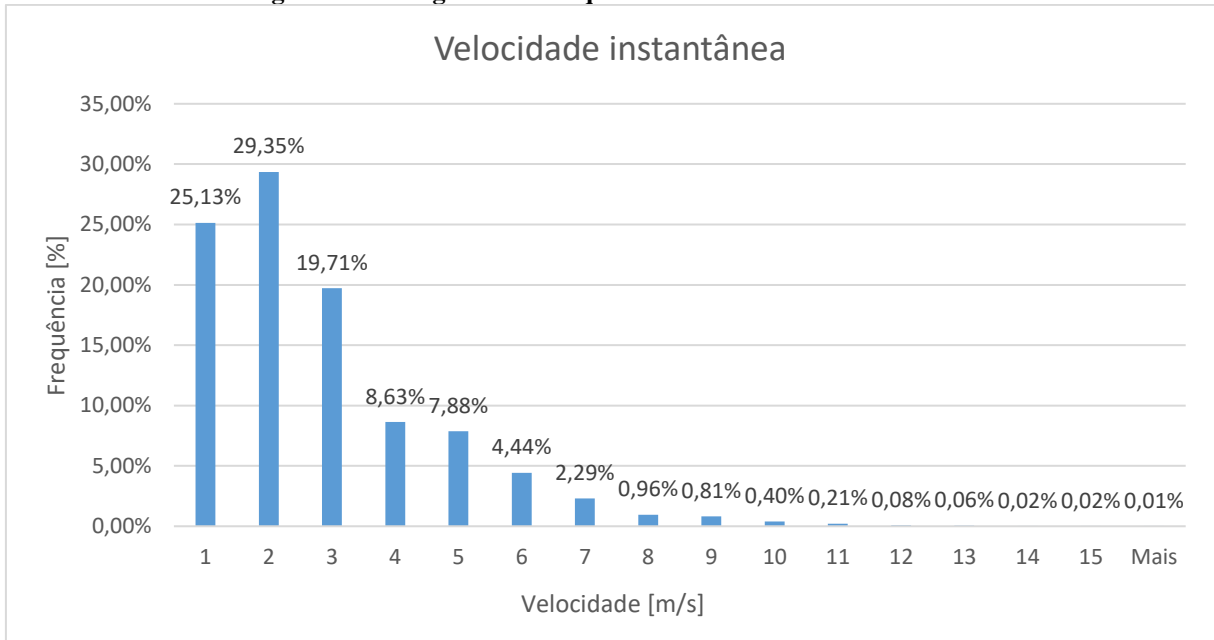
Figura 35: Instalação do anemômetro.



Fonte: Imagem produzida pelo autor.

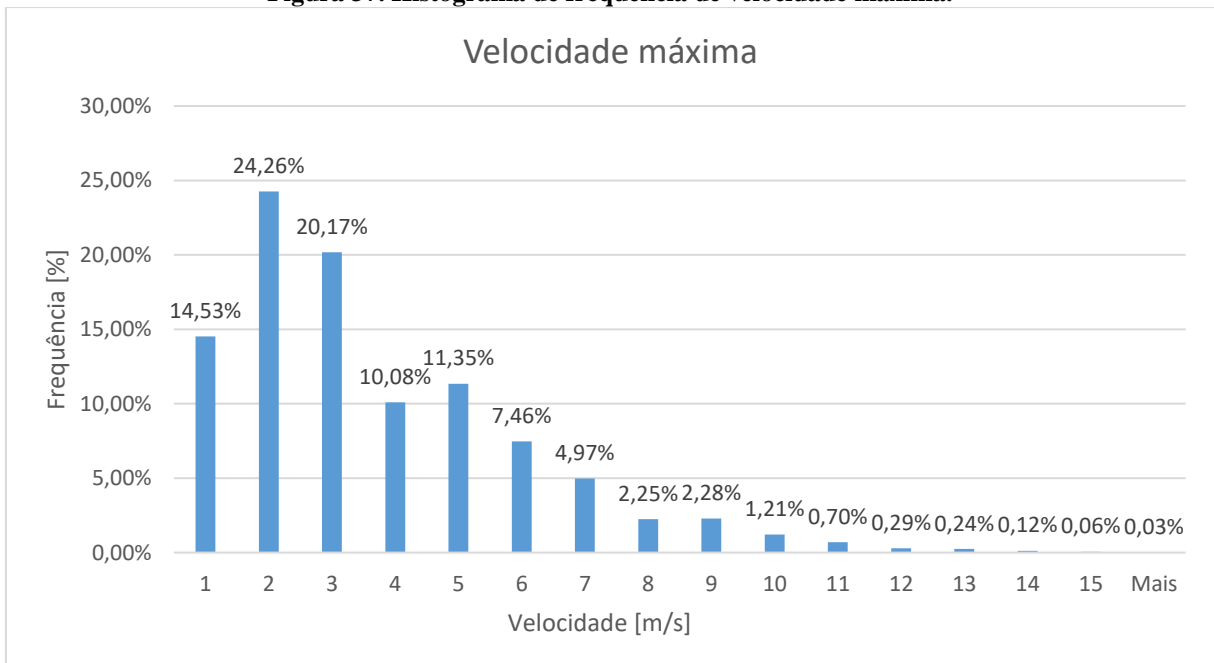
A partir dos dados obtidos pelo anemômetro entre os dias 4 de setembro 2016 e 1 de novembro de 2016, pode-se criar os histogramas de velocidade instantânea (figura 36), máxima (figura 37) e média (figura 38), sendo este último o de real interesse para o estudo.

Figura 36. Histograma de frequência de velocidade instantânea.



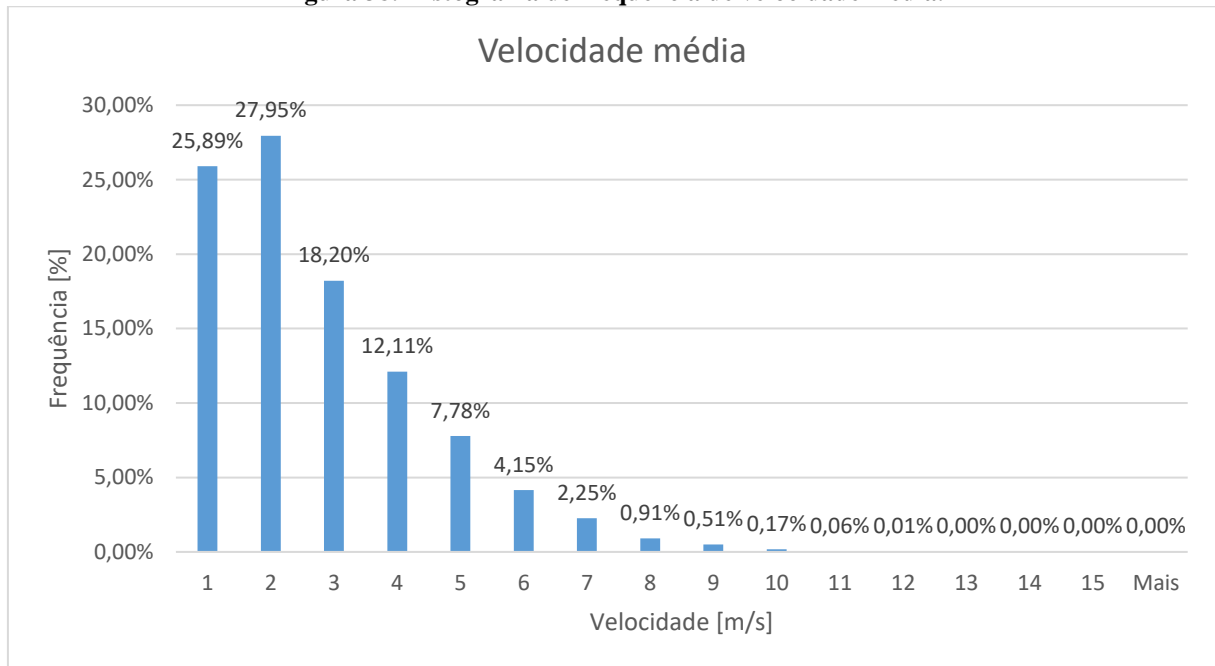
Fonte: Imagem produzida pelo autor.

Figura 37. Histograma de frequência de velocidade máxima.



Fonte: Imagem produzida pelo autor.

Figura 38. Histograma de frequência de velocidade média.



Fonte: Imagem produzida pelo autor

Para estimar a velocidade do vento para diferentes alturas será calculado o valor do fator de rugosidade do local a partir da velocidade média do vento à 10 metros, medida, e a 100 metros, obtida do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul. A velocidade média medida a 10 metros foi de 2,27 m/s e a velocidade média a uma altura de 100m, obtida através do mapa eólico da figura 12, para a região de Viamão, é de 5,5 m/s. Substituindo os valores de velocidade e altura na equação 2 obtém-se:

$$z_0 = \exp \left[\frac{v_2 \ln(h_1) - v_1 \ln(h_2)}{v_2 - v_1} \right] = \exp \left[\frac{5,5 \ln(10) - 2,27 \ln(100)}{5,5 - 2,27} \right] = 1,98. \quad (13)$$

Sabendo-se o valor da rugosidade e a velocidade do vento a 10 metros é possível manipular a equação 1, de forma que, se possa estimar a velocidade do vento em qualquer altura e assim criar um novo histograma para a altura pretendida. Manipulando a equação 1 obtém-se:

$$v_2 = v_1 \frac{\ln(h_2/z_0)}{\ln(h_1/z_0)}, \quad (14)$$

onde:

- v_2 : é a velocidade na altura desejada;
- v_1 : é a velocidade a 10 metros de altura;
- h_2 : é a altura para a qual se deseja obter a velocidade;
- h_1 : é 10 metros;
- z_0 : é o fator de rugosidade calculado.

Após uma análise do mercado de pequenos aerogeradores, foram selecionados, para o cálculo do potencial de geração, os aerogerador ENERSUD VERNE555 e XZERES 442SR. Esta escolha ocorreu devido à facilidade de aquisição, ambos são adquiridos através de empresas brasileiras as quais também realizam a instalação, bem como suas características de geração com baixíssimas velocidades de vento.

8.1.1 Potencial de geração com turbina VERNE555

O ENERSUD VERNE555 é um aerogerador fabricado no Brasil e projetado para captar baixíssimas velocidades de vento [32]. Suas especificações técnicas, obtidas através do site do fabricante, estão dispostas no quadro 5 e sua curva de potência está ilustrada na figura 39.

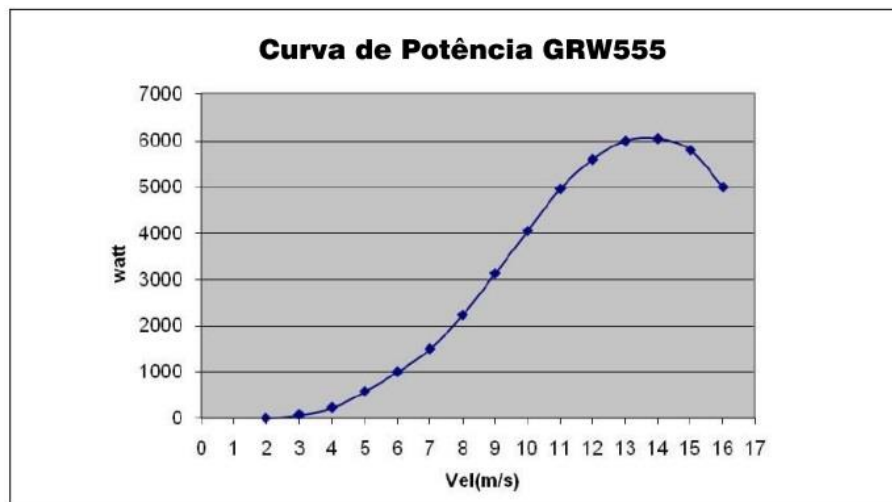
A altura máxima de instalação de aerogeradores considerada pela ENERSUD é 20 metros. Para o cálculo da produção média de energia elétrica foi inicialmente criado o histograma de velocidades do vento para a referida altura.

O histograma de velocidades do vento a 20 metros de altura foi elaborado pela aplicação da equação 12, juntamente com o fator de rugosidade do local, calculado anteriormente, sobre cada velocidade média de vento obtida através das medições com o anemômetro. Esse histograma está mostrado na figura 40.

Quadro 5. Especificações VERNE555.

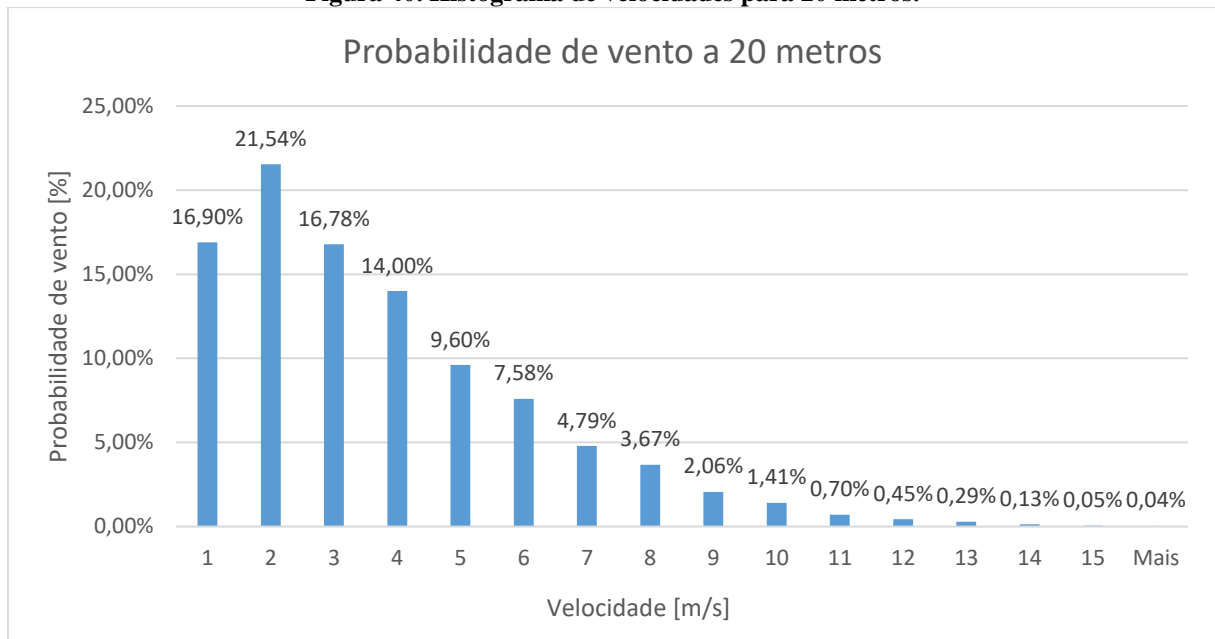
Diâmetro do rotor	5,55 metros
Potência a 12m/s	6000 Watts
Tipo	Eixo horizontal
Velocidade de partida	2,2 m/s
Controle de velocidade	<i>Stall</i>
Proteção contra alta velocidades	Controle de passo
Sistema magnético	Neodímio
Tensão de saída do retificador	400 a 600 Vdc
Peso	190kg
Garantia	2 anos
Vida útil	15 anos

Fonte: ENERSUD [32].

Figura 39. Curva de potência do aerogerador VERNE555.

Fonte: ENERSUD [32].

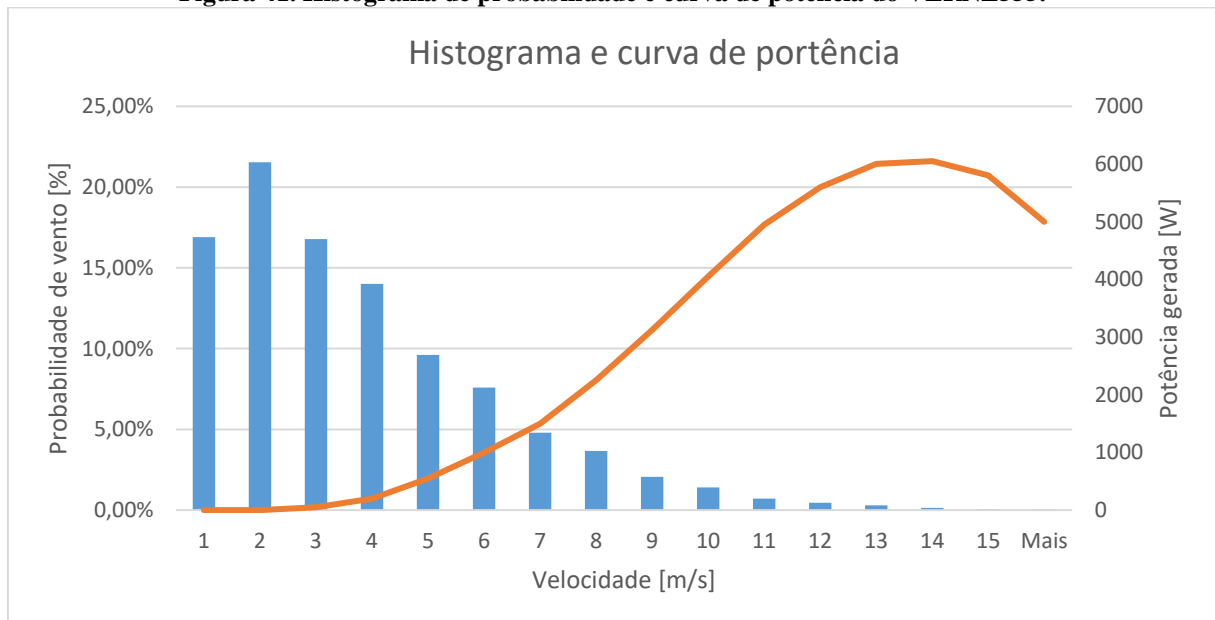
Figura 40. Histograma de velocidades para 20 metros.



Fonte: Imagem produzida pelo autor

A figura 41 ilustra a sobreposição da curva de potência sobre as probabilidades de vento.

Figura 41. Histograma de probabilidade e curva de potência do VERNE555.



Fonte: Imagem produzida pelo autor

Para o cálculo da potência média gerada será utilizado o método indicado por ARRIBAS, L. [3], onde a potência gerada será dada pelo produto da probabilidade de velocidade do vento pela potência gerada, para cada velocidade, sendo estes resultados somados ao final, conforme calculado no quadro 6.

Quadro 6. Cálculo da potência gerada.

Velocidade do vento [m/s]	Probabilidade do vento	Potência (W)	Potência gerada (W)
1	16,90%	0	0,00
2	21,54%	0	0,00
3	16,78%	50	8,39
4	14,00%	200	28,01
5	9,60%	550	52,80
6	7,58%	1000	75,84
7	4,79%	1500	71,85
8	3,67%	2250	82,54
9	2,06%	3125	64,39
10	1,41%	4050	57,07
11	0,70%	4950	34,78
12	0,45%	5600	24,97
13	0,29%	6000	17,25
14	0,13%	6050	8,13
15	0,05%	5800	3,04
Mais	0,04%	5000	1,88
Total	100,00%	Potência total gerada (W)	530,94

Com a potência calculada, pode-se determinar o fator de capacidade do aerogerador para as condições de vento disponíveis através da equação 8:

$$F_c = \frac{E_p}{E_n} = \frac{530,94}{6000} = 0,088, \quad (15)$$

ou seja, o aerogerador irá produzir apenas 8,8% de sua capacidade nominal.

8.1.2 Potencial de geração com turbina XZERES 442SR

O XZERES é um aerogerador fabricado nos Estados Unidos e, segundo o fabricante, é capaz de gerar até 40% mais energia em relação a outros aerogeradores de mesma potência [6]. Suas especificações técnicas, obtidas através do site do revendedor brasileiro, estão dispostas no quadro 7 e sua curva de potência está ilustrada na figura 42 [33].

Para o cálculo da produção média de energia elétrica foi criado um novo histograma de velocidades do vento, agora para uma altura de 30 metros. Esta altura foi definida após contato com a empresa Energia Pura, revendedora da marca XZERES no Brasil, sendo esta a altura disponibilizada no conjunto de instalação comercializado pela empresa.

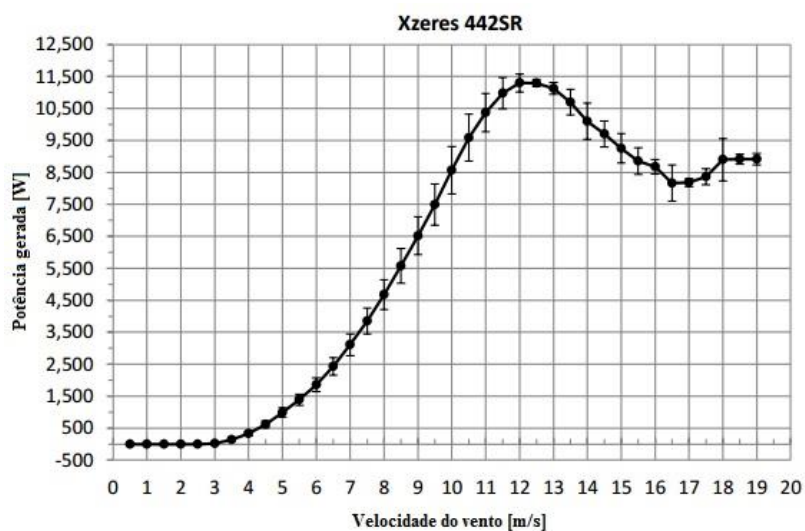
Para a criação do histograma de velocidades do vento a 30 metros, assim como feito para o aerogerador anterior, foi aplicada a equação 12, juntamente com o fator de rugosidade do local, calculado anteriormente, sobre cada velocidade média de vento obtida através das medições com o anemômetro. Com as novas velocidades foi criado o histograma de velocidades para a altura de 30 metros, mostrado na figura 43.

Quadro 7. Especificações XZERES 442SR.

Diâmetro do rotor	7,2 metros
Potência a 11m/s	10400 Watts
Tipo	Eixo horizontal
Velocidade de partida	2,2 m/s
Proteção contra alta velocidades	Stall
Sistema magnético	Neodímio
Tensão de saída do inversor (incluso no kit)	220/380 Vac Trifásico 60Hz
Garantia	10 anos
Vida útil	20 anos

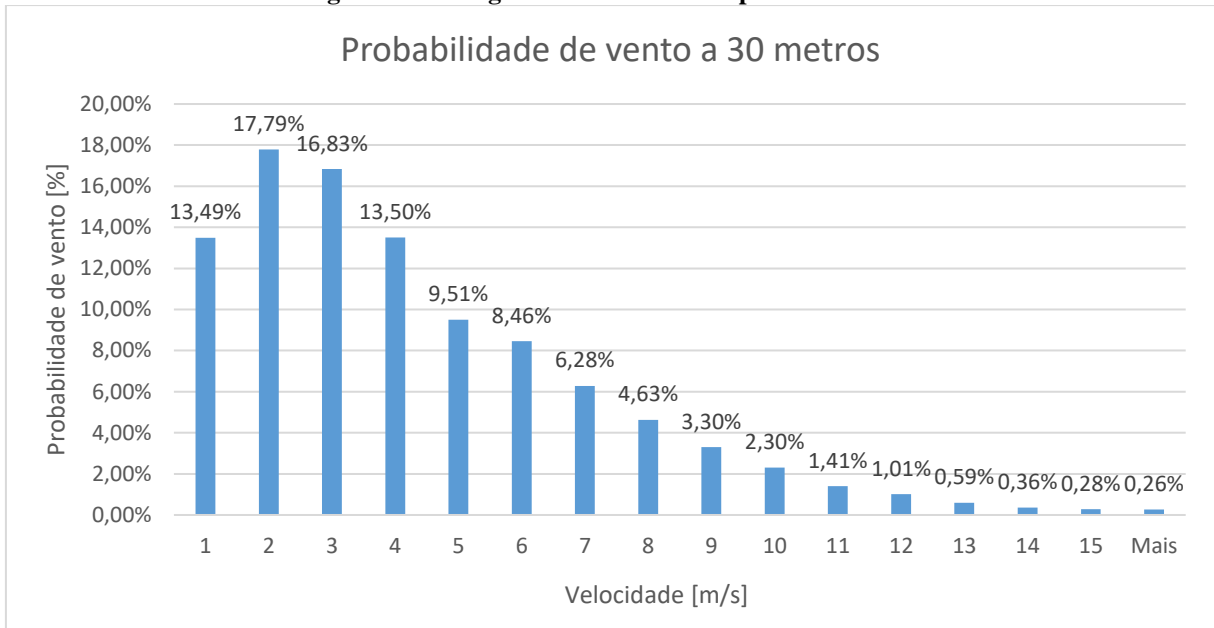
Fonte: ENERGIA PURA [6].

Figura 42. Curva de potência do aerogerador XZERES.



Fonte: SMALL WIND [33] (adaptado).

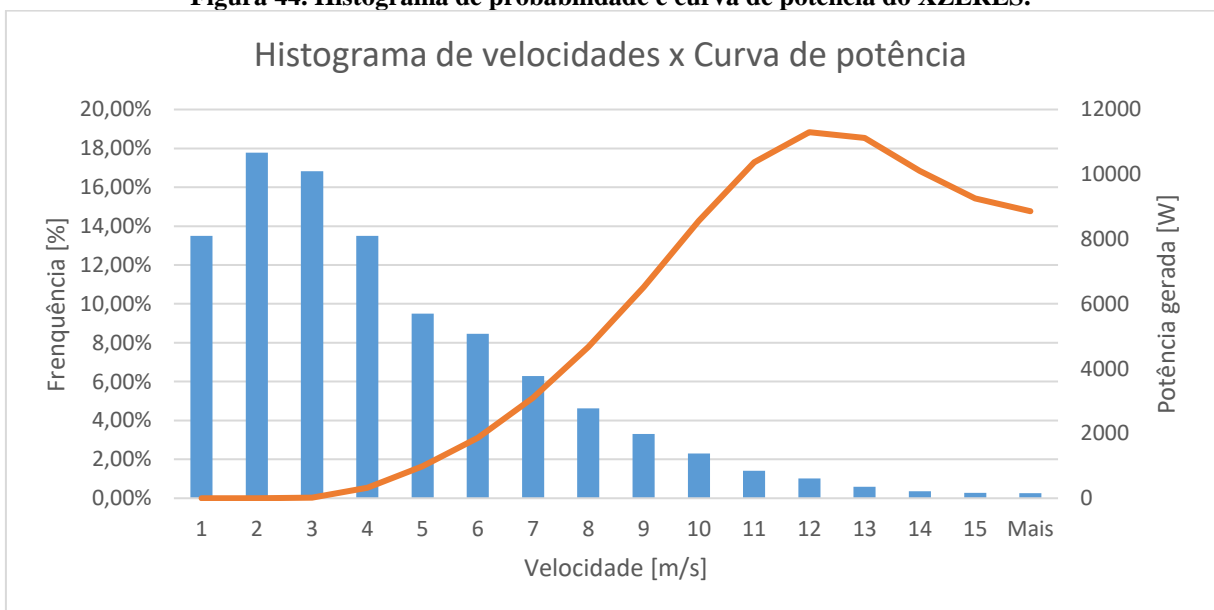
Figura 43. Histograma de velocidades para 30 metros.



Fonte: Imagem produzida pelo autor.

A figura 44 ilustra a sobreposição da curva de potência sobre as probabilidades de vento.

Figura 44. Histograma de probabilidade e curva de potência do XZERES.



Fonte: Imagem produzida pelo autor

Para o cálculo da potência média gerada, assim como foi feito para o aerogerador anterior, será utilizado o método indicado por ARRIBAS, L. [3], onde a potência gerada será dada pelo produto da probabilidade de velocidade do vento pela potência gerada, para cada velocidade, sendo estes resultados somados ao final, conforme calculado no quadro 8.

Quadro 8. Cálculo da potência gerada.

Velocidade do vento [m/s]	Probabilidade do vento	Potência (W)	Potência gerada (W)
1	13,49%	0	0,00
2	17,79%	0	0,00
3	16,83%	15	2,52
4	13,50%	326	44,01
5	9,51%	986	93,72
6	8,46%	1861	157,42
7	6,28%	3105	195,03
8	4,63%	4672	216,14
9	3,30%	6519	215,33
10	2,30%	8567	197,13
11	1,41%	10373	146,03
12	1,01%	11300	114,60
13	0,59%	11124	65,30
14	0,36%	10101	36,23
15	0,28%	9252	26,35
Mais	0,26%	8859	23,21
Total	100,00%	Potência total gerada (W)	1533,02

Com a potência calculada, pode-se estimar o fator de capacidade do aerogerador para as condições de vento disponíveis através da equação 8:

$$F_c = \frac{E_p}{E_n} = \frac{1533}{10400} = 0,147, \quad (16)$$

ou seja, o aerogerador irá produzir apenas 14,7% de sua capacidade nominal.

Uma alternativa para um melhor aproveitamento eólico local, seria a instalação dos aerogeradores em alturas superiores, próximas a 100m, onde a velocidade do vento seria maior. Porém, ambas as empresas, responsáveis pela venda e instalação dos aerogeradores selecionados, informaram que a instalação em maiores alturas é inviável economicamente.

8.1.3 Análise de custo

Após contato telefônico com as empresas Bioserve e Energia pura, no qual foi feito o orçamento dos equipamentos necessários para a instalação dos aerogeradores VERNE555 e XZERES 442SR, foram montados os quadros 9 e 10 com os respectivos valores orçados.

Quadro 9. Orçamento VERNE555.

Aerogerador ENERSUD VERNE555	R\$36.000
Torre tubular estaiada de 20 metros	R\$11.000
Inversor Grid Tie ABB Wind on grid 6kW trifásico	R\$22.500
Quadro de comandos QCI555OG com proteções	R\$4.500
Interface ABB Wind	R\$3.800
Instalação e frete	R\$25.000
Valor Total	R\$102.800

Fonte: Bioserve [34].

Quadro 10. Orçamento XZERES 442SR.

Conjunto instalação XZERES 442RS inclui: Aerogerador XZERES 442SR Torre treliçada de 30 metros Sistema de interface e comando Dois inversores Grid Tie SMA 6kW trifásicos	R\$425.000
Instalação e frete	R\$84.500
Valor Total	R\$509.500

Fonte: Energia Pura [35].

A partir dos valores orçados é possível fazer uma análise do custo de implementação por unidade de potência gerada (R\$/kW) dividindo o valor total de implementação, de cada aerogerador (R\$), pela potência média que será gerada nas condições estudadas (kW). Esta análise está apresentada no quadro 11.

Quadro 11. Custo de implementação por unidade de potência.

Aerogerador	Potência média gerada (kW)	Custo de implementação (R\$)	Custo de implementação (R\$/kW)
VERNE555	0,531	102.800	193.597
XZERES 442SR	1,533	509.500	332.354

Outra análise importante que pode ser feita é a do custo de implementação por unidade de potência gerada e anos de funcionamento (R\$/kW.ano). Para esta análise serão considerados os valores dos custos de implementação por unidade de potência (R\$/kW), calculados no quadro 11, juntamente com o tempo de vida útil dos componentes.

Devido ao fato de os inversores possuírem uma vida útil inferior à dos aerogeradores, os custos de implementação por tempo de funcionamento devem ser calculados de forma separada e somados para uma análise final.

Considerando uma vida útil média de doze anos e meio para os inversores [13], e considerando que o valor do inversor SMA que acompanha o conjunto do aerogerador XZERES é o mesmo do inversor ABB, é possível estimar o custo dos inversores por unidade de potência gerada e anos de funcionamento (R\$/kW.ano) dividindo o custo do inversor (R\$) pela potência gerada (kW) e a sua vida útil (anos), não esquecendo de multiplicar o valor obtido pela quantidade de inversores utilizados no conjunto. Os valores obtidos estão mostrados no quadro 12.

Quadro 12. Custo por unidade de potência e durabilidade dos inversores.

Aerogerador	Inversor	Potência média gerada (kW)	Custo do inversor (R\$)	Vida útil (anos)	Quantidade de inversores	Custo de implementação (R\$/kW.ano)
VERNE	ABB Wind	0,531	25.000	12,5	1	3.766
XZERES	SMA	1,533	25.000	12,5	2	2.609

Fazendo a mesma análise de custo por unidade de potência gerada e anos de funcionamento (R\$/kW.ano) para o restante do conjunto de cada aerogerador, descontando do custo total o valor referente ao inversor, obtém-se os valores dispostos no quadro 13.

Quadro 13. Custo por unidade de potência e durabilidade dos aerogeradores.

Aerogerador	Custo total de implementação (R\$)	Custo dos inversores (R\$)	Custo sem inversores (R\$)	Potência média gerada (kW)	Vida útil (anos)	Custo de implementação (R\$/kW.ano)
VERNE	102.800	25.000	77.800	0,531	15	9.768
XZERES	509.500	50.000	459.500	1,533	20	14.987

O custo total por unidade de potência e tempo de funcionamento, de cada conjunto aerogerador, é então dado pela soma do valor obtido para os inversores com o obtido para o restante do conjunto. Os resultados obtidos estão mostrados no quadro 14.

Quadro 14. Custo por unidade de potência e durabilidade dos conjuntos aerogeradores.

Aerogerador	Custo de implementação dos inversores (R\$/kW.ano)	Custo de implementação dos aerogeradores (R\$/kW.ano)	Custo de implementação total (R\$/kW.ano)
VERNE555	3.766	9.768	13.534
XZERES 442SR	2.609	14.987	17.596

Por fim, é possível estimar o custo de manutenção dos aerogeradores com base nos indicadores do CENTRO DE ENERGIA EÓLICA [36], o qual estima o custo anual de manutenção de aerogeradores entre 1,5% e 2% do custo de implementação. Considerando o custo médio de 1,75% foi estimado o custo de manutenção anual de cada aerogerador, assim como seu custo de manutenção anual por unidade de potência gerada (R\$/kW.ano), sendo os valores calculados mostrados no quadro 15.

Quadro 15. Custo anual de manutenção dos conjuntos aerogeradores.

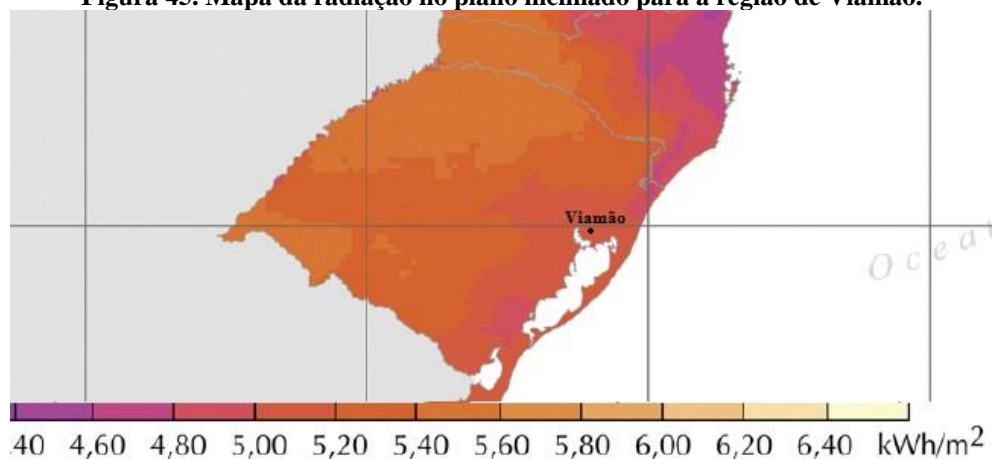
Aerogerador	Custo total de implementação sem os inversores (R\$)	Potência média gerada (kW)	Estimador de custo de manutenção (%)	Custo de manutenção (R\$/ano)	Custo de manutenção (R\$/kW.ano)
VERNE	77.800	0,531	1,75	1.361	2.563
XZERES	459.500	1,533	1,75	8.041	5.245

8.2 ESTUDO DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO

Para o estudo do potencial fotovoltaico foram utilizados os dados do mapa da radiação no plano inclinado do Atlas Brasileiro de Energia Solar [14], ilustrado na figura 22, juntamente com as características técnicas dos painéis fotovoltaicos selecionados. A partir destes dados foi possível calcular, através da equação 10, a potência gerada por cada painel.

Analisando o mapa da radiação no plano inclinado para a região de Viamão, ilustrado na figura 45, é possível definir que a radiação média anual de Viamão é de 5,1kWh/m².dia. A partir da radiação diária é possível obter o valor da irradiação média dividindo-a por 24, referente às 24 horas de um dia. O valor obtido para a irradiação média (G) em Viamão foi de 0,213kW/m².

Figura 45. Mapa da radiação no plano inclinado para a região de Viamão.



Fonte: PEREIRA, E. P.; F. R. M.; S. L. A.; R. R. [14] (adaptado).

Após uma análise do mercado nacional de energia fotovoltaica, foram escolhidos dois painéis fotovoltaicos para este estudo: Canadian CSI CS6P-265P-BR e Globo Brasil GBR260P. A escolha foi feita baseada na facilidade de aquisição e na eficiência dos painéis, em ambos, superior à 16%.

8.2.1 Potencial de geração com painel Canadian

O CSI CS6P-265P-BR, da empresa canadense Canadian, é um painel de silício policristalino com classificação de eficiência A, segundo o Inmetro [37]. Suas especificações técnicas, obtidas através da Neosolar Energia, estão dispostas no quadro 16.

Quadro 16. Especificações do painel fotovoltaico Canadian

Máxima Potência ($P_{m,ref}$)	265 W
Tensão de Máxima Potência (V_m)	30,6 V
Corrente de Máxima Potência (I_m)	8,66 A
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	37,7 V
Corrente de Curto-Circuito (I_{sc})	9,23 A
Tensão Máxima do Sistema	1000 V
Eficiência do Painel (η)	16,47%
Coeficiente de Temperatura da Potência (γ)	0,0041
Temperatura Nominal de Operação de Célula (TNOC)	45±2°C
Irradiação padrão de teste (G_{ref})	1.000 W/m ²
Temperatura padrão da Célula ($T_{c,ref}$)	25°C
Tipo de célula	Silício policristalino
Garantia contra defeitos de fabricação	10 anos
Garantia para perda de eficiência maior do que 20%	25 anos
Classificação quanto a eficiência energética Inmetro	A
Área do painel	1,6m ²

Fonte: NEOSOLAR [37].

Para estimar a potência gerada, inicialmente calcula-se a temperatura de operação do painel, através da equação 11. Substituindo os valores e considerando a temperatura anual média em Viamão (T_a) é de 18,9°C [38]:

$$T_c = T_a + G \left[\frac{TNOC - 20}{800} \right] = 18,9 + 213 \left[\frac{45 - 20}{800} \right] \approx 25,55^\circ C . \quad (17)$$

Sabendo o valor da temperatura de operação (T_c), é possível obter a potência média real que será fornecida pelo painel fotovoltaico, através da equação 10. Substituindo os valores:

$$P_m = P_{m,ref} \frac{G}{G_{ref}} [1 - \gamma(T_c - T_{c,ref})] = 265 \frac{213}{1000} [1 - (0,0041)(25,55 - 25)]. \quad (18)$$

$$P_m = 56,32 \frac{W}{\text{módulo}}$$

O fator de capacidade será então:

$$F_c = \frac{P_m}{P_{m,ref}} = \frac{56,32}{265} = 0,212, \quad (19)$$

ou seja, nestas condições de operação, o módulo fotovoltaico será capaz de produzir apenas 21% de sua capacidade.

8.2.2 Potencial de geração com painel Globo Brasil

O painel Globo Brasil GBR260P, de fabricação nacional, é, assim como o painel Canadian, um painel de silício policristalino com classificação de eficiência A, segundo o Inmetro [39]. Suas especificações técnicas, obtidas através do site do fabricante, estão dispostas no quadro 17.

Quadro 17. Especificações do painel fotovoltaico Globo Brasil

Máxima Potência ($P_{m,ref}$)	260 W
Tensão de Máxima Potência (V_m)	30,24 V
Corrente de Máxima Potência (I_m)	8,6 A
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	37,65 V
Corrente de Curto-Circuito (I_{sc})	9,11 A
Tensão Máxima do Sistema	1000 V
Eficiência do Painel (η)	16,05%
Coeficiente de Temperatura da Potência (γ)	0,0043
Temperatura Nominal de Operação de Célula (TNOC)	45±2°C
Irradiação padrão de teste (G_{ref})	1.000 W/m ²
Temperatura padrão da Célula ($T_{c,ref}$)	25°C
Tipo de célula	Silício policristalino
Garantia contra defeitos de fabricação	5 anos
Classificação quanto a eficiência energética Inmetro	A
Área do painel	1,62m ²

Fonte: GLOBO BRASIL [39].

Assim como feito anteriormente, o primeiro passo para estimar a potência gerada é calcular a temperatura de operação do painel, através da equação 11. Substituindo os valores e considerando a temperatura anual média em Viamão (T_a) é de 18,9°C [38]:

$$T_c = T_a + G \left[\frac{TNOC - 20}{800} \right] = 18,9 + 213 \left[\frac{45 - 20}{800} \right] \approx 25,55^\circ C . \quad (20)$$

Sabendo o valor da temperatura de operação (T_c), obtém-se a potência média real que será fornecida pelo painel fotovoltaico, através da equação 10. Substituindo os valores:

$$P_m = P_{m,ref} \frac{G}{G_{ref}} [1 - \gamma(T_c - T_{c,ref})] = 260 \frac{213}{1000} [1 - (0,0043)(25,55 - 25)], \quad (21)$$

$$P_m = 55,25 \frac{W}{\text{módulo}}.$$

O fator de capacidade será então:

$$F_c = \frac{P_m}{P_{m,ref}} = \frac{55,25}{260} = 0,212, \quad (22)$$

ou seja, nestas condições de operação, o módulo fotovoltaico será capaz de produzir apenas 21% de sua capacidade.

8.2.3 Análise de custo

Após pesquisa realizada em lojas on-line de sistemas fotovoltaicos, foram selecionados dois kits de instalação semelhantes para os painéis Canadian, vendidos pela Neosolar Energia, e Globo Brasil, vendidos pela SOLARizAR. Os valores obtidos estão dispostos respectivamente nos quadros 18 e 19. Os valores de mão de obra apresentados foram estimados em 15% do valor total do sistema [40].

Quadro 18. Orçamento Canadian.

67 painéis CSI CS6P-265P – BR (potência total 17,76kWp)	R\$54.605
Inversor Fronius Symo 15.0-3-M (15.000W) trifásico	R\$21.975
Conjunto de montagem para telhado	R\$13.678
2 Quadro Elétrico Fotovoltaico (Stringbox), 2 string IP65 25A 1000V	R\$4.780
Cabos e conectores	R\$1.746
Mão de obra [40]	R\$18.700
Frete	R\$9.200
Valor Total	R\$124.688

Fonte: NEOSOLAR [37].

Quadro 19. Orçamento Globo Brasil.

67 GBR260P (potência total 17,42kWp) [41]	R\$73.700
Inversor Fronius Symo 15.0-3-M (15.000W) trifásico [37]	R\$21.975
Conjunto de montagem para telhado [37]	R\$13.678
2 Quadro Elétrico Fotovoltaico (Stringbox), 2 string IP65 25A 1000V [37]	R\$4.780
Cabos e conectores [37]	R\$1.746
Mão de obra [40]	R\$22.443
Frete total	R\$11.300
Valor Total	R\$149.622

Fonte: NEOSOLAR [37]; SOLARIZAR [41].

A potência média que será gerada por cada sistema será o produto de potência gerada por um painel, nas condições de estudo e calculadas anteriormente, pelo número de painéis.

A partir dos valores totais obtidos é possível fazer uma análise do custo de implementação por unidade de potência gerada (R\$/kW) dividindo o valor total de implementação, de cada sistema fotovoltaico (R\$), pela potência média que será gerada nas condições estudadas (kW). Esta análise está apresentada no quadro 20.

Quadro 20. Análise de custos.

Painel	Potência média produzida pelo sistema (kW)	Custo de implementação (R\$)	Custo de implementação (R\$/kW)
Canadian	3,77	124.688	33.073
Globo Brasil	3,7	149.622	40.438

O cálculo do custo de implementação por unidade de potência gerada e anos de funcionamento (R\$/kW.ano), foi realizado considerando os valores dos custos de implementação por unidade de potência (R\$/kW), calculados no quadro 20, juntamente com o tempo de vida útil dos componentes.

Assim como nos sistemas eólicos, nos sistemas fotovoltaicos os inversores possuem uma vida útil inferior à do restante do sistema, portanto os custos de implementação por tempo de funcionamento devem ser calculados de forma separada e somados para uma análise final.

Considerando uma vida útil média de doze anos e meio para os inversores [13], é possível estimar o custo dos inversores por unidade de potência gerada e anos de funcionamento (R\$/kW.ano) dividindo o custo do inversor (R\$) pela potência gerada (kW) e a sua vida útil (anos). Os valores obtidos estão mostrados no quadro 21.

Quadro 21. Custo por unidade de potência e durabilidade dos inversores.

Painel	Inversor	Potência média gerada (kW)	Custo do inversor (R\$)	Vida útil (anos)	Quantidade de inversores	Custo de implementação (R\$/kW.ano)
Canadian	Fronius Symo	3,77	21.975	12,5	1	466
Globo Brasil	Fronius Symo	3,7	21.975	12,5	1	475

Fazendo a mesma análise de custo por unidade de potência gerada e anos de funcionamento (R\$/kW.ano) para o restante do sistema, descontando do valor total o custo referente ao inversor, e considerando a vida útil dos painéis igual a garantia de 80% de eficiência, que é de 25 anos, obtém-se os valores dispostos no quadro 22.

Quadro 22. Custo por unidade de potência e durabilidade dos painéis fotovoltaicos.

Painel	Custo total de implementação (R\$)	Custo dos inversores (R\$)	Custo sem inversores (R\$)	Potência média gerada (kW)	Vida útil (anos)	Custo de implementação (R\$/kW.ano)
Canadian	124.688	21.975	102.713	3,77	25	1.090
Globo Brasil	149.622	21.975	127.647	3,7	25	1.380

O custo total por unidade de potência e tempo de funcionamento, de cada sistema fotovoltaico, é então dado pela soma do valor obtido para os inversores com o obtido para o restante do sistema. Os resultados obtidos estão mostrados no quadro 23.

Quadro 23. Custo por unidade de potência e durabilidade dos sistemas fotovoltaicos.

Painel	Custo de implementação dos inversores (R\$/kW.ano)	Custo de implementação dos aerogeradores (R\$/kW.ano)	Custo de implementação total (R\$/kW.ano)
Canadian	466	1.090	1.556
Globo Brasil	475	1.380	1.855

Por fim, é possível estimar o custo de manutenção dos sistemas fotovoltaicos com base no indicador do EPE [42], o qual estima o custo anual de manutenção dos sistemas fotovoltaicos em 1% do seu custo de implementação. A partir deste percentual foi estimado o custo de manutenção anual de cada sistema fotovoltaico, assim como seu custo de manutenção anual por unidade de potência gerada (R\$/kW.ano), sendo os valores calculados mostrados no quadro 24.

Quadro 24. Custo anual de manutenção dos sistemas fotovoltaicos.

Painel	Custo total de implementação sem os inversores (R\$)	Potência média gerada (kW)	Estimador de custo de manutenção (%)	Custo de manutenção (R\$/ano)	Custo de manutenção (R\$/kW.ano)
Canadian	102.713	3,77	1	1.027	272
Globo Brasil	127.647	3,7	1	1.276	345

8.3 ESTUDO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO COM BIOMASSA

Para a análise do potencial de geração elétrica, por biomassa, foi feito um levantamento da matéria orgânica produzida no local, sem a necessidade de novos investimentos. Assim a matéria utilizada foi o esterco produzido pelos animais criados na escola. No quadro 25 está a quantidade de animais por tipo.

Quadro 25. Quantidade de animais.

Tipo	Quantidade
Bovino não-estabulado	300
Bovino semiestabulado	25
Suíno adulto	10
Ovino	22

O dimensionamento do biodigestor foi feito a partir da quantidade de esterco produzida diariamente pelos animais da escola e do tempo de retenção necessário para a produção do gás. A quantidade de esterco foi estimada através dos indicadores de produção de SILVA, L. E. J. [17], informados no quadro 4, e está mostrada no quadro 26. O tempo de retenção utilizado, utilizando os indicadores de CARREAS, N.[16] indicados no quadro 2, será de 30 dias, tempo de retenção máximo para esterco de Bovino, que é a maior parte da produção diária.

Quadro 26. Estimativa de carga diária.

Espécie animal e condição de criação	Número de animais	Esterco [kg/animal/dia]	Esterco [kg /dia]
Bovino semiestabulado	25	15,00	375
Bovino não-estabulado	300	10,00	3000
Suíno adulto	10	5,8	58
Ovino	22	2,5	0,17
Total			3433,17 kg/dia

Com o valor da quantidade de esterco diária e do tempo de retenção, calcula-se o volume mínimo do biodigestor através da equação 12:

$$V = C \times t \times \frac{4}{3} = (4 \times 3433,17) \times 30 \times \frac{4}{3} = 549305 \text{ litros.} \quad (23)$$

A partir dos indicadores de produção de SILVA, L. E. J. [17], informados no quadro 4, é possível estimar a produção de biogás, por dia, que seria possível com o uso de um biodigestor. Esta estimativa está mostrada no quadro 27.

Quadro 27. Produção de biogás.

Espécie animal e condição de criação	Biogás [m³/animal/dia]	Número de animais	Produção de biogás (m³/dia)
Bovino semiestabulado	0,56	25	14
Bovino não-estabulado	0,36	300	108
Suíno adulto	0,33	10	3,3
Ovino	0,17	22	3,74
		Total	129,04

Para a estimativa de produção de energia elétrica, foi feita uma análise do mercado nacional de geradores à biogás e selecionados os seguintes modelos: Microturbina Capstone C30, grupo gerador à combustão Biogás GGB 30 e grupo gerador à combustão Trigás TT15. Estes modelos foram selecionados por possuírem eficiência de conversão em energia elétrica superior à 25%, segundo seus fabricantes, além de, em todos eles, ser possível o uso de trocadores de calor, de forma a também ser possível o seu uso para o aquecimento de água em sistemas de cogeração. Não foi selecionado para esta estimativa nenhuma turbina à vapor, isto se deve ao fato de a única alternativa para a microgeração no mercado nacional, a turbina BRMini, possuir uma eficiência de conversão em energia elétrica inferior à 5% [23].

8.3.1 Potencial de geração com grupo gerador a combustão Biogás GGB 30

O grupo gerador a combustão Biogás GGB 30, produzido no Brasil, é refrigerado a água e, segundo seu fabricante, pode ser conectado diretamente a rede elétrica, seguindo os padrões da ANEEL. Suas especificações técnicas, obtidas através do site do fabricante e por contato telefônico, estão dispostas no quadro 28.

Quadro 28. Especificações GGB 30.

Potência em regime contínuo	25kW
Tensão de saída	Trifásica 220/380 Volts
Frequência	60Hz
Sobrecarga admitida a cada 12 horas	10% por 1 hora
Refrigeração	Água-Ar forçado
Normas técnicas	NBR 5117 e 5052 IEC
Motor	MWM 229/4
Rotação	1800rpm
Consumo de biogás	15m ³ /h
Eficiência	30%
Garantia	6 meses ou 1000h
Vida útil	8000h

Fonte: BIOGÁS [43].

Considerando o consumo informado pelo fabricante de 15m³/h e a produção diária de biogás na escola de 129,04m³/h, pode-se calcular o número de horas por dia que o gerador poderá funcionar em sua potência máxima dividindo-se a produção diária pelo consumo:

$$\frac{129,04}{15} = 8,6 \text{ horas.} \quad (24)$$

Sabendo que a potência máxima produzida pelo gerador é de 25kW [43], e o número de horas de funcionamento, é possível calcular a energia produzida fazendo o produto da potência pelo número de horas:

$$25 \times 8,6 = \frac{215kWh}{dia}. \quad (25)$$

Por fim, com a potência diária produzida é possível obter a potência média gerada:

$$\frac{215}{24} = 8,96kW. \quad (26)$$

O fator de capacidade deste grupo gerador é dado pela relação entre a potência produzida e sua potência máxima:

$$\frac{8,96}{25} = 0,358, \quad (27)$$

ou seja, este gerador está produzindo 35,8% de sua capacidade máxima.

8.3.2 Potencial de geração com gerador a combustão Trigás TT15

O grupo gerador a combustão Trigás TT15, produzido no Brasil, é refrigerado a água e, segundo seu fabricante, pode ser conectado diretamente a rede elétrica, seguindo os padrões da ANEEL [44]. Além disso, segundo informações fornecidas pelo fabricante através de contato telefônico, este gerador vem pronto para o aquecimento de água através de trocadores de calor, instalados nos sistemas de refrigeração e de descarga do motor, fornecendo uma potência térmica de 20kW. As especificações técnicas, obtidas através do site do fabricante e por contato telefônico, estão dispostas no quadro 29.

Quadro 29. Especificações TT15.

Potência em regime contínuo	15kW
Potência térmica	20kW
Tensão de saída	Trifásica 220/380 Volts
Frequência	60Hz
Refrigeração	Água
Normas técnicas	NBR 5117 e 5052 IEC
Motor	4 cilindros
Rotação	1800rpm
Consumo de biogás	7m ³ /h
Eficiência	33%
Garantia	1 ano ou 1000h

Fonte: TRIGÁS [44].

Considerando o consumo informado pelo fabricante de $7\text{m}^3/\text{h}$ e a produção diária de biogás na escola de $129,04\text{m}^3/\text{h}$, pode-se calcular o número de horas por dia que o gerador poderá funcionar em sua potência máxima dividindo-se a produção diária pelo consumo:

$$\frac{129,04}{7} = 18,4 \text{ horas.} \quad (28)$$

Sabendo que a potência máxima produzida pelo gerador é de 15kW [44], e o número de horas de funcionamento, é possível calcular a energia diária produzida fazendo o produto da potência pelo número de horas:

$$15 \times 18,4 = \frac{275\text{kWh}}{\text{dia}}. \quad (29)$$

Por fim, com a potência diária produzida é possível obter a potência média gerada:

$$\frac{275}{24} = 11,5\text{kW}. \quad (30)$$

O fator de capacidade deste grupo gerador é dado pela relação entre a potência produzida e sua potência máxima:

$$\frac{11,5}{15} = 0,766, \quad (31)$$

ou seja, este gerador está produzindo 76,6% de sua capacidade máxima.

8.3.3 Potencial de geração com microturbina Capstone C30

A microturbina Capstone C30, fabricada nos Estados Unidos, assim como os grupos geradores pode ser conectada diretamente a rede elétrica sem o uso de inversores [45]. Este sistema por não aspirar o biogás, como ocorre nos motores a combustão, deve ser conectado à um compressor de gás, neste caso um compressor CompAir V04G [47]. Pode-se ainda utilizar um trocador de calor para aquecimento de água, gerando uma potência térmica de 50kW [45]. As especificações técnicas do conjunto estão dispostas no quadro 30.

Quadro 30. Especificações do conjunto Capstone C30.

Potência gerada em regime contínuo (Microturbina)	25kW [36]
Potência térmica com o uso de trocador de calor	50kW [36]
Tensão de saída	Trifásica 220/380 Volts
Frequência	60Hz [21]
Consumo de biogás	22m ³ /h [21]
Eficiência	26% [37]
Vida útil	40000h [21]
Potência consumida pelo compressor V04G	4kW [38]
Vazão do compressor V04G	10 l/s [38]
Potência gerada pelo conjunto (Microturbina – Compressor)	21kW

Fonte: COSTA, D. F. [21]; ATLASSEIS [45]; CAPSTONE [46]; COMPAIR [47].

Considerando o consumo de 22m³/h de biogás pela microturbina e a produção diária de biogás na escola de 129,04m³/h, pode-se calcular o número de horas por dia que a microturbina poderá funcionar, em sua potência máxima, dividindo-se a produção de gás diária pelo consumo:

$$\frac{129,04}{22} = 5,9 \text{ horas.} \quad (32)$$

Sabendo que a potência gerada pelo conjunto formado pela microturbina e o compressor é de 21kW e o número de horas de funcionamento, é possível calcular a energia diária produzida fazendo o produto da potência pelo número de horas:

$$21 \times 5,86 = \frac{114,7kWh}{dia}. \quad (33)$$

Por fim, com a potência diária produzida é possível obter a potência média gerada:

$$\frac{114,6}{24} = 4,8kW. \quad (34)$$

O fator de capacidade deste conjunto gerador é dado pela relação entre a potência produzida e sua potência máxima:

$$\frac{4,8}{25} = 0,192, \quad (35)$$

ou seja, este gerador está produzindo 19,2% de sua capacidade máxima.

8.3.4 Análise de custo

Após contato telefônico com a empresa Aviserra Soluções Ambientais, foi obtido o orçamento para a construção do biodigestor de 600m³, mostrado no quadro 31.

Quadro 31. Orçamento Biodigestor.

Construção do Biodigestor completo	R\$78.700
Medida superior: 12x26m	
Medida inferior: 5x19m	
Profundidade: 3,5m	
Capacidade: 600m ³	
Durabilidade: 15 anos	
Filtro para gás sulfídrico	R\$20.000
Total	R\$98.700

Fonte: AVISERRA[48].

Considerando o valor de construção do biodigestor e sua vida útil, pode-se calcular o custo por ano de duração:

$$\frac{98700}{15} = 6.580 \frac{R\$}{ano}. \quad (36)$$

Também foi feito contato telefônico com as empresas Biogás, Trigás e Heimer (revendedor da Capstone no Brasil), onde foram obtidos os orçamentos dos grupos geradores GGB 30, TT15 e C30. Os valores obtidos estão dispostos respectivamente nos quadros 32, 33 e 34.

Quadro 32. Orçamento Biogás GGB 30.

Grupo gerador GGB30	R\$55.000
Instalação + frete	R\$10.000
Valor Total	R\$65.000

Fonte: BIOGÁS [43].

Quadro 33. Orçamento Trigás TT15.

Grupo gerador TT15 instalado e com trocadores de calor	R\$64.000
Frete	R\$1.000
Valor Total	R\$65.000

Fonte: TRIGÁS [44].

Quadro 34. Orçamento Capstone C30.

Microturbina C30	US\$76.500
Compressor V04G	US\$15.500
Frete	R\$16.000
Valor Total (instalação não incluída)	R\$330.640
(Cotação do Dolar em 25/11: R\$3,42)	

Fonte: HEIMER [49].

Para calcular a vida útil, em anos, de cada grupo gerador, para o tempo de funcionamento diário calculado, usa-se a seguinte expressão:

$$Vida\ útil\ (anos) = \frac{Vida\ útil\ (horas)}{(365 \times tempo\ de\ funcionamento\ diário)} \quad (37)$$

Os valores da vida útil, em anos, calculados para cada grupo gerador estão mostrados no quadro 35. A vida útil em horas do gerador da Trigás foi considerada igual à do gerador da Biogás.

Quadro 35. Vida útil.

Grupo gerador	Vida útil (horas)	Funcionamento (horas/dia)	Vida útil (Anos)
GGB 30	8000	8,6	2,55
TT15	8000	18,4	1,19
C30	40000	5,9	18,6

A partir dos valores orçados é possível fazer uma análise do custo de implementação por unidade de potência gerada (R\$/kW) dividindo o valor total de implementação, de cada

aerogerador (R\$), pela potência média que será gerada nas condições estudadas (kW). Esta análise está apresentada no quadro 36.

Quadro 36. Custo de implementação por unidade de potência.

Grupo gerador	Potência média gerada (kW)	Custo de implementação (R\$)	Custo de implementação (R\$/kW)
GGB 30	8,96	65.000	7.254
TT15	11,5	65.000	5,652
C30	4,8	330.640	68.883

Para obter o custo de implementação por unidade de potência gerada e tempo de funcionamento (R\$/kW.ano) dos grupos geradores, será feita a divisão dos custos de implementação por unidade de potência (R\$/kW), calculados no quadro 36, pelos tempos de vida útil (em anos) calculados no quadro 35. Os valores obtidos estão mostrados no quadro 37.

Quadro 37. Custo por unidade de potência e durabilidade dos geradores.

Grupo gerador	Potência média gerada (kW)	Custo de implementação (R\$/kWh)	Vida útil (anos)	Custo de implementação (R\$/kW.ano)
GGB 30	8,96	7.254	2,55	2.845
TT15	11,5	5,652	1,19	4.750
C30	4,8	68.883	18,6	3.703

O valor do custo de implementação por unidade de potência e tempo de funcionamento (R\$/kW.ano) do biodigestor é obtido dividindo o seu custo por tempo de duração (R\$/ano), calculado anteriormente, pela potência gerada, para cada grupo gerador. A soma do valor obtido ao custos por unidade de potência e tempo de funcionamento dos geradores, obtido no quadro 37, representa o custo total de implementação por unidade de potência e tempo de funcionamento (R\$/kW.ano). Os valores calculados estão dispostos no quadro 38.

Quadro 38. Custo por unidade de potência e durabilidade dos conjuntos geradores.

Grupo gerador	Potência média gerada (kW)	Custo de implementação do biodigestor (R\$/ano)	Custo de implementação do biodigestor (R\$/kW.ano)	Custo de implementação do gerador (R\$/kW.ano)	Custo de implementação total (R\$/kW.ano)
GGB 30	8,96	6.580	734	2.845	3.579
TT15	11,5	6.580	572	4.750	5.322
C30	4,8	6.580	1371	3.703	5074

Ainda, pode-se considerar a potência térmica fornecida pelo grupo gerador TT15 pois, mesmo não sendo uma conversão direta em energia elétrica, a água aquecida pode ser utilizada nos chuveiros do alojamento reduzindo assim o consumo de energia elétrica. Para estimar a economia gerada será considerado que cada aluno residente tome um banho por dia, de 10 minutos, e que a potência do chuveiro é de 5500W. O consumo de energia diária por aluno referente ao banho será dado por:

$$\frac{10}{60} \times 5500 = 917W \text{ ou } 0,917kWh. \quad (38)$$

Considerando que residem 72 alunos no alojamento, o consumo diário com banhos será de 66kWh.

O gerador TT15, segundo o fabricante, gera uma potência térmica de 20kW, como ele funcionará por 18,4 horas a energia térmica gerada será de 368kWh por dia, energia superior a necessária para os banhos. Portanto, considerando que haverá uma economia diária de 66kWh, dividindo este valor pelas vinte e quatro horas do dia, é possível atribuir uma potência elétrica extra de 2,75kW para o conjunto gerador TT15. Somando este valor à potência gerada pelo TT15 pode-se recalculer os valores dos custos de implementação. Os novos valores calculados estão dispostos no quadro 39.

Quadro 39. Custo por unidade de potência e durabilidade dos geradores com cogeração.

Grupo gerador	Potência média gerada (kW)	Custo de implementação do biodigestor (R\$/ano)	Custo de implementação do biodigestor (R\$/kW.ano)	Custo de implementação do gerador (R\$/kW.ano)	Custo de implementação total (R\$/kW.ano)
GGB 30	8,96	6.580	734	2.845	3.579
TT15	14,25	6.580	462	3.833	4.295
C30	4,8	6.580	1.371	3.703	5.074

O custo de manutenção anual de um gerador a combustão com potência menor do que 100kW, segundo a NREL [47], é de US\$0,018 por kWh gerado, e o custo de manutenção de microturbinas de 30kW é de US\$0,02 por kWh gerado. Com estes valores é possível calcular o custo anual de manutenção por unidade de potência de cada grupo gerador, multiplicando o valor dado pela NREL [50] pela quantidade de horas contidas em um ano, e depois convertendo o valor para reais. Os valores calculados para a manutenção estão dispostos no quadro 40.

Quadro 40. Custo anual de manutenção dos grupos geradores.

Grupo gerador	Custo de manutenção (US\$/kWh)	Número de horas em um ano (h)	Custo de manutenção anual (US\$/kW.ano)	Custo de manutenção anual (R\$/kW.ano) (Cotação do Dolar em 25/11: R\$3,42)	Custo de manutenção anual (R\$/ano)
GGB 30	0,018	8.760	158	540	4.838
TT15	0,018	8.760	158	540	7.695
C30	0,02	8.760	175	598	2.870

8.4 COMPARAÇÃO DOS ASPECTOS FINANCEIROS

Ao se fazer o estudo dos potenciais de geração disponíveis na Escola Técnica de Agricultura, juntamente com os custos de implementação e o tempo de vida útil, elaborou-se o quadro 41, no qual estão os principais aspectos financeiros para a escolha do sistema de geração.

Quadro 41. Aspectos financeiros.

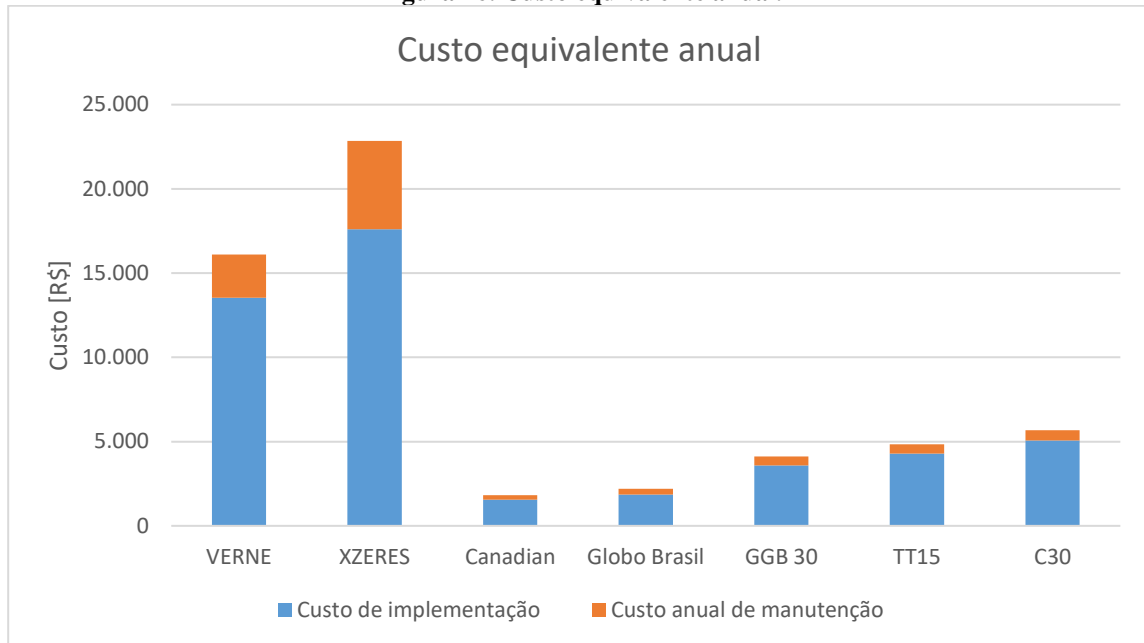
Sistema de geração	Potência média produzida (kW)	Custo de implementação (R\$)	Vida útil (anos)	Custo de implementação (R\$/kW)	Custo de implementação (R\$/kW.ano)	Custo anual de manutenção (R\$/kW.ano)
VERNE	0,531	102.800	15	193.597	13.534	2.563
XZERES	1,533	509.500	20	332.354	17.596	5.245
Canadian	3,77	124.688	25	33.074	1.556	272
Globo Brasil	3,7	149.622	25	40.438	1.855	345
GGB 30	8,96	163.700	2,55	18.270	3.579	540
TT15	14,25	163.700	1,19	11.488	4.295	540
C30	4,8	429.340	18,6	89.446	5.074	598

Inicialmente fazendo-se uma análise dos custos de implementação por quilowatt gerado, sem levar em conta a vida útil do sistema, observa-se que os custos dos sistemas de geração a combustão são os de menor valor, seguidos dos sistemas fotovoltaicos. Os sistemas eólicos, para o local estudado, possuem custo de implementação muito superior.

Ao fazer uma nova análise considerando agora a vida útil de cada sistema, os sistemas fotovoltaicos tornam-se os de menor custo, seguidos dos sistemas a biogás. Os sistemas eólicos novamente aparecem com custo de implementação superior, tendo em média um custo dez vezes superior ao sistema de menor valor.

Analisando os custos de manutenção anual, nota-se que novamente os custos dos sistemas fotovoltaicos são os menores, seguidos dos sistemas a biogás. Os sistemas eólicos novamente possuem valores muito superiores.

Os custos equivalentes totais anuais podem ser comparados na figura 46, onde são somados os valores do custo anual de implementação e de manutenção. Através desta comparação fica, mais uma vez, claro que os sistemas de menor custo são os fotovoltaicos.

Figura 46. Custo equivalente anual.

Fonte: Imagem produzida pelo autor.

8.5 ESCOLHA DO SISTEMA DE GERAÇÃO

Após a análise do quadro 41, é possível notar que, o sistema fotovoltaico com painéis Canadian é o que possui o menor custo de implementação, se considerado o seu tempo de vida útil. Porém é de grande interesse da escola a implementação de um biodigestor onde possam ser colocados os dejetos dos animais, melhorando as condições sanitárias do local, além disso o sistema de geração a biogás não é sazonal, produzindo aproximadamente a mesma potência todos os dias.

Considerando estes fatores, e que a energia gerada deve suprir toda a energia consumida na escola durante o ano, deverá ser instalado um sistema com potência média de 39,83kW, e capaz de consumir todo o biogás produzido pelo biodigestor. Portanto o sistema indicado será formado por um sistema híbrido biomassa-fotovoltaico.

O sistema de geração por biogás será, constituído de um gerador à combustão Biogás GGB 30, por possuir o menor custo de implementação (considerando a vida útil), alimentado pelo biogás proveniente do biodigestor, construído pela Aviserra, gerando uma potência média de 8,96kW. Os componentes e custos deste sistema estão indicados no quadro 42.

Quadro 42. Orçamento do sistema a biogás.

Construção do Biodigestor completo	R\$78.700
Filtro para gás sulfídrico	R\$20.000
Grupo gerador GGB30 instalado	R\$65.000
Total	R\$163.700

Fonte: Biogás [43]; Aviserra [48].

O sistema fotovoltaico deverá gerar os 30,87kW excedentes. Considerando que, conforme calculado anteriormente, cada painel Canadian produza uma potência média de 56,32W para as condições locais, é possível definir o número de painéis necessários dividindo a potência total que o sistema deve gerar pela potência média fornecida pelo módulo, resultando assim em 548 painéis. A potência instalada pode ser calculada pelo produto do número de painéis por sua potência nominal, resultando em 145,22kW. O sistema será constituído pelos componentes indicados no quadro 43.

O custo aproximado do sistema será de R\$1.053.670 (R\$163.700 do sistema de biomassa, R\$889.970 do sistema fotovoltaico). Sendo ainda acrescido os custos com o medidor e o transformador de acoplamento, pois, devido a potência instalada, o sistema já se enquadra como minigeração distribuída. Considerando o custo do transformador de R\$ 55.000, orçado na MOULIN PROJETOS [51], o custo total de implementação será de R\$ 1.108.670.

O custo anual de manutenção é dado pelo produto do custo de manutenção anual por unidade de potência (R\$/kW.ano) com a potência gerada (kW), para cada sistema, resultando num custo de R\$13.235 ao ano (R\$4.838 do grupo gerador e R\$8.397 do sistema fotovoltaico).

Quadro 43. Orçamento do sistema fotovoltaico.

548 painéis CSI CS6P-265P – BR (potência total 17,76kWp)	R\$446.620
3 Inversores Trio 50.0TL com Stringbox AC e DC [34]	R\$145.500
Conjunto de montagem para telhado	R\$111.873
Cabos e conectores	R\$14.282
Mão de obra	R\$133.495
Frete	R\$38.200
Valor Total	R\$889.970

Fonte: NEOSOLAR [37]; SOLARIZAR [41].

8.6 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Para a análise de viabilidade econômica será utilizado o valor presente líquido (VPL), dado pela equação [52]:

$$VPL = \sum_{n=0}^N \frac{FC_n}{(1 + TMA)^n}, \quad (39)$$

onde:

- FC_n : é o fluxo de caixa no ano n ;
- TMA : é a taxa mínima de atratividade;
- N : é o período analisado;
- n : é o ano que está sendo contabilizado.

Para o cálculo do VPL será considerada a taxa SELIC, 14,25% ao ano [53], como TMA e o período analisado será de vinte e cinco anos. O fluxo de caixa será dado conforme o quadro 44, onde estão consideradas as substituições dos grupos geradores a cada dois anos e meio, a substituição dos inversores a cada doze anos e meio e a substituição do biodigestor em quinze anos. Também são considerados no fluxo de caixa a economia média mensal referente à fatura de energia elétrica que é de R\$14.614, ou R\$175.368 ao ano, e os custos anuais de manutenção já calculados. Todos os valores do fluxo de caixa foram reajustados pelo índice de preços ao consumidor (IPC), 7,874% ao ano [54]. Por fim foi considerada uma redução de 0,8% ao ano na geração de energia elétrica pelo sistema fotovoltaico. Esta redução é devido à perda de eficiência dos painéis, sendo em média de 20% em 25 anos.

Após o cálculo do valor presente líquido é possível concluir que o sistema irá gerar uma economia de R\$ 436.058 no período de 25 anos, além da taxa de retorno de 14,25% a.a. que foi predeterminada como a taxa mínima de atratividade.

Quadro 44. VPL.

Ano	Economia fotovoltaica	Economia biogás	Economia Total	Instalação do sistema	Manutenção	Substituição do grupo gerador	Substituição dos inversores	Substituição do biodigestor	FC	VPL
0				-R\$ 1.108.670,00					-R\$ 1.108.670,00	-R\$ 1.108.670,00
1	R\$ 145.437,29	R\$ 42.564,92	R\$ 188.002,21		-R\$ 14.277,12				R\$ 173.725,09	R\$ 152.056,97
2	R\$ 155.632,45	R\$ 45.916,48	R\$ 201.548,93		-R\$ 15.401,30				R\$ 186.147,63	R\$ 142.608,39
3	R\$ 166.542,28	R\$ 49.531,95	R\$ 216.074,23		-R\$ 16.614,00	-R\$ 81.595,03			R\$ 117.865,20	R\$ 79.034,54
4	R\$ 178.216,89	R\$ 53.432,09	R\$ 231.648,99		-R\$ 17.922,19				R\$ 213.726,80	R\$ 125.439,45
5	R\$ 190.709,90	R\$ 57.639,34	R\$ 248.349,24		-R\$ 19.333,38	-R\$ 94.950,50			R\$ 134.065,35	R\$ 68.870,86
6	R\$ 204.078,66	R\$ 62.177,86	R\$ 266.256,52		-R\$ 20.855,69				R\$ 245.400,83	R\$ 110.341,47
7	R\$ 218.384,58	R\$ 67.073,74	R\$ 285.458,32		-R\$ 22.497,87				R\$ 262.960,45	R\$ 103.489,66
8	R\$ 233.693,33	R\$ 72.355,13	R\$ 306.048,46		-R\$ 24.269,35	-R\$ 119.192,14			R\$ 162.586,97	R\$ 56.006,20
9	R\$ 250.075,24	R\$ 78.052,37	R\$ 328.127,61		-R\$ 26.180,32				R\$ 301.947,29	R\$ 91.038,53
10	R\$ 267.605,51	R\$ 84.198,22	R\$ 351.803,73		-R\$ 28.241,76	-R\$ 138.701,51			R\$ 184.860,46	R\$ 48.784,51
11	R\$ 286.364,66	R\$ 90.827,98	R\$ 377.192,64		-R\$ 30.465,52				R\$ 346.727,13	R\$ 80.088,38
12	R\$ 306.438,82	R\$ 97.979,78	R\$ 404.418,60		-R\$ 32.864,37				R\$ 371.554,23	R\$ 75.118,64
13	R\$ 327.920,18	R\$ 105.694,71	R\$ 433.614,89		-R\$ 35.452,11	-R\$ 174.113,13	-R\$ 389.745,55		-R\$ 165.695,91	-R\$ 29.321,16
14	R\$ 350.907,39	R\$ 114.017,11	R\$ 464.924,50		-R\$ 38.243,61				R\$ 426.680,88	R\$ 66.087,03
15	R\$ 375.505,99	R\$ 122.994,82	R\$ 498.500,81		-R\$ 41.254,91	-R\$ 202.611,97		-R\$ 307.658,48	R\$ 53.024,56	-R\$ 7.188,43
16	R\$ 401.828,96	R\$ 132.679,43	R\$ 534.508,39		-R\$ 44.503,33				R\$ 490.005,07	R\$ 58.143,51
17	R\$ 429.997,17	R\$ 143.126,61	R\$ 573.123,78		-R\$ 48.007,52				R\$ 525.116,26	R\$ 54.538,09
18	R\$ 460.139,98	R\$ 154.396,40	R\$ 614.536,37		-R\$ 51.787,63	-R\$ 254.340,46			R\$ 308.408,29	R\$ 28.035,89
19	R\$ 492.395,79	R\$ 166.553,57	R\$ 658.949,36		-R\$ 55.865,39				R\$ 603.083,97	R\$ 47.985,48
20	R\$ 526.912,73	R\$ 179.668,00	R\$ 706.580,73		-R\$ 60.264,23	-R\$ 295.970,90			R\$ 350.345,60	R\$ 24.399,03
21	R\$ 563.849,32	R\$ 193.815,05	R\$ 757.664,37		-R\$ 65.009,43				R\$ 692.654,94	R\$ 42.221,78
22	R\$ 603.375,15	R\$ 209.076,05	R\$ 812.451,20		-R\$ 70.128,28				R\$ 742.322,93	R\$ 39.605,57
23	R\$ 645.671,75	R\$ 225.538,70	R\$ 871.210,45		-R\$ 75.650,18	-R\$ 371.534,68			R\$ 424.025,59	R\$ 19.801,55
24	R\$ 690.933,34	R\$ 243.297,62	R\$ 934.230,96		-R\$ 81.606,87				R\$ 852.624,09	R\$ 34.850,47
25	R\$ 739.367,77	R\$ 262.454,87	R\$ 1.001.822,64		-R\$ 88.032,60				R\$ 913.790,04	R\$ 32.691,98
					SELIC	14,25% a.a.	IPC	7,874% a.a.	Total	R\$ 436.058,40

9 CONCLUSÕES

Após a análise dos potenciais de geração, custos de implementação e manutenção dos sistemas selecionados, foi possível concluir que o sistema de geração de energia eólica não é competitivo economicamente para o local estudado, devido à baixa velocidade média do vento.

Ainda, após realizado o estudo de viabilidade do sistema indicado à escola, verificou-se que este é viável economicamente, sendo a economia ao longo de vinte e cinco anos de R\$436.058. Esta economia poderia ser aumentada caso, ao invés de realizar a substituição de todo o conjunto gerador a combustão a cada dois anos e meio, fosse apenas feita uma retífica geral no motor pertencente ao conjunto.

Além dos ganhos financeiros, existe um ganho imensurável com a implementação do sistema de geração a biogás, que é a melhoria nas condições de habitação da escola, pois, com o uso do biodigestor para o descarte do esterco dos animais, haverá uma grande melhoria nas condições sanitárias do local.

Por fim, ainda existem os benefícios para o sistema elétrico brasileiro, pois, com a minigeração, a energia que seria utilizada pela escola poderá ser disponibilizada para outros locais, reduzindo assim a necessidade de expansão dos sistemas de geração, distribuição e transmissão de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

- [1]URSAIA, G.C. **Ambiente legal**. Disponível em: < <http://www.ambientelegal.com.br/a-regulacao-da-microgeracao-e-minigeracao-de-energia-no-brasil>>. Acesso em: 12 de setembro de 2016.
- [2]SCR. **ANEEL**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas> >. Acesso em: 12 de setembro de 2016.
- [3]ARRIBAS, L. **Energia Mini-eólica**. 2013. 59p. Programa de Capacitação em Energias Renováveis.
- [4]GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. **Atlas Eólico do Rio Grande do Sul**. 2014. 116p.
- [5]ELECTRÓNICA. **Energia Eólica**. Disponível em: <<http://www.electronica-pt.com/energia-eolica>>. Acesso em: 12 de outubro de 2016
- [6]ENERGIA PURA. **Manual do produto: XZERES 442SR**. 1p. Disponível em: <<http://www.energiapura.com/download/XZERES-442SR-Spec-Sheet.pdf>>. Acesso em: 21 de novembro de 2016
- [7]PEREIRA, I. Q. G. **Condições de viabilidade da microgeração eólica em zonas urbanas**. 2010. 71p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade do Porto. Porto. 2010
- [8]MOREIRA, R. I. P. **Avaliação do potencial eólico em regime de microgeração**. 2010. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade do Porto. Porto. 2010
- [9]ENERSUD. **Perguntas frequentes**. Disponível em: <http://enersud1.hospedagemdesites.ws/?page_id=60>. Acesso em: 17 de dezembro de 2016.
- [10]LUNELLI, T. **Avaliação da viabilidade técnica e econômica de instalação de microturbina eólica**. 2011. 25p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2011.
- [11]ALONSO, M.C.; GARCÍA, F.S.; SILVA, J.P. **Energia Solar Fotovoltaica**. 2013. 91 p. Programa de Capacitação em Energias Renováveis.
- [12]GROTH, J. A. **Usina de geração fotovoltaica**. 2013. 120p. Projeto de diplomação (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2013.
- [13]NEOSOLAR. **Aprenda**. Disponível em: <www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais >. Acesso em: 10 de novembro de 2016
- [14]PEREIRA, E. P.; F. R. M.; S. L. A.; R. R. **Atlas Brasileiro de energia solar**. 2006. 57p.

- [15]BASSANESI, K. **Energia elétrica e fontes energéticas renováveis**. 2008. 102p. Projeto de diplomação (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2008.
- [16]CARREAS, N. **O biogás**. 2013. 157 p. Programa de Capacitação em Energias Renováveis.
- [17]SILVA, L. E. J. **Biogás – Produção e utilização**. Universidade Estadual Paulista. 2005.
- [18]WINCH, D. **Biomassa: uma alternativa na geração de energia elétrica**. 2012. 86p. Projeto de diplomação (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2012.
- [19]SALAZAR, A. R. G. **Estudo da utilização do biogás como fonte de energia renovável no processo produtivo de indústrias de bebidas**. 2014. 152p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. Campo Grande. 2014
- [20]BONA, F. S. **As microturbinas e a geração distribuída**. Universidade Estadual de Campinas. Disponível em <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022004000100018&script=sci_arttext>. Acesso em: 16 de novembro de 2016.
- [21]COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. 192p. Dissertação (Pós-Graduação em Energia) – Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.
- [22]BRMINI. **BR Miniturbinas a Vapor**. Disponível em <<http://brmini.com/>>. Acesso em: 17 de novembro de 2016.
- [23]BATISTA, J. C. **Microgeração de energia elétrica (abaixo de 100kW) utilizando turbina tesla modificada**. 2009. 107p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.
- [24]DAROS, H. B. **Integração de fontes de energia renováveis**. 2013. 56p. Projeto de diplomação (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2013.
- [25]CEEE. **Acesso de micro e mini geração com fontes renováveis e cogeração qualificada ao sistema de distribuição**. 2013. 30p.
- [26]ANEEL. **Resolução normativa nº482, de 17 de abril de 2012**. 2012. 9p.
- [27]ANEEL. **Micro e Minigeração Distribuída**. 2016. 34p. Cadernos Temáticos ANEEL
- [28]ANEEL. **Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição**. 2016. 74p. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST
- [29]SANTOS, L. B. **SMART GRID**. 2013. 54p. Monografia (graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade São Francisco. Itatiba. 2013.

[30]LOPES, L.; FERNANDES, N. C.; SAADE, D. C. **Geração distribuída de energia**. Universidade Federal Fluminense. Niteroi.

[31]ETA. **Fotos** . Disponível em: < https://scontent.fpoa8-1.fna.fbcdn.net/v/t1.0-9/940995_583073015051387_281936858_n.jpg?oh=1bba2673f89f778bb8fa819af3bfe083&oe=58BDCDF3>. Acesso em: 8 de setembro de 2016.

[32]ENERSUD. **Manual Turbina Eólica Verne 555**. Disponível em: <http://enersud1.hospedagemdesites.ws/wp-content/uploads/downloads/2011/08/manual_produtos_verne555_web.pdf>. Acesso em: 18 de novembro de 2016.

[33]SMALL WIND. **442SR**. Disponível em: <http://small-wind.org/download/certification_reports/442SR.pdf>. Acesso em: 24 de novembro de 2016

[34]BIOSERV. **Orçamento**. Contato telefônico realizado em 24 de novembro de 2016.

[35]ENERGIA PURA. **Orçamento**. Contato telefônico realizado em 24 de novembro de 2016.

[36]CENTRO DE ENERGIA EÓLICA. **Faq**. Disponível em <<http://www.pucrs.br/ce-eolica/faq.php?q=26#26>>. Acesso em: 29 de novembro de 2016.

[37]NEOSOLAR. **Loja**. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/loja/>>. Acesso em: 18 de novembro de 2016.

[38]CLIMATE. **Clima: Viamão**. Disponível em: <<http://pt.climate-data.org/location/4502/>>. Acesso em: 24 de novembro de 2016.

[39]GLOBO BRASIL. **GBR260P**. Disponível em: <<http://www.paineisglobobrasil.com.br/paineis-solares/gbr260p>>. Acesso em: 24 de novembro de 2016.

[40]FOCER. **Solar Fotovoltaica**. 2002. 48p. Disponível em: <<http://www.bunca.org/publicaciones/FOTOVOLT.pdf>>. Acesso em: 28 de novembro de 2016.

[41]SOLARIZAR. **Loja**. Disponível em: <<http://solarizar.lojaintegrada.com.br/>>. Acesso em 24 de novembro de 2016.

[42]EPE. **Energia Renovável Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. 2016. 452p. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf>>. Acesso em: 29 de novembro de 2016.

[43]BIOGÁS. **Grupo gerador a biogás GGB 30**. Disponível em: <<http://biogasmotores.com.br/produto/7-grupo-gerador-a-biogas-ggb-30>>. Acesso em 25 de novembro de 2016.

[44]TRIGÁS. **Economizadores**. Disponível em: < http://www.trigas.com.br/?page_id=25 >. Acesso em 25 de novembro de 2016

[45]ATLASSEIS. **Microturbia C30.** Disponível em: <http://www.atlasseis.com/images/conteudos/pdf/AtlasSeis_Microturbina_C30_25_kwe_pt.pdf>. Acesso em 25 de novembro de 2016

[46]CAPSTONE. **C30.** Disponível em: <<https://www.capstoneturbine.com/products/c30>>. Acesso em: 25 de novembro de 2016

[47]COMPAIR. **Gas Boost Compressor System.** Disponível em: <<http://www.jjairsystems.co.uk/wp-content/uploads/2014/06/compair-v04g-v18g-vane-gas.pdf>>. Acesso em: 26 de novembro de 2016

[48]AVISERRA. **Biodigestores.** Disponível em: <<http://www.aviserra.com.br/>>. Acesso em: 24 de novembro de 2016

[49]HEIMER. **Micro turbina.** Disponível em: <<http://heimer.com.br/v4/br/microturbinas.html>>. Acesso em: 25 de novembro de 2016

[50]NREL. **Gas-fired distributed energy resource technology characterizations.** 226p. National Renewable Energy Laboratory. U.S- Department of Energy. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34783.pdf>>. Acesso em: 29 do novembro de 2016.

[51]MOULIN PROJÉTOS. **Contato.** Disponível em: <<http://moulinprojetos.com.br/contato.html>>. Acesso em: 6 de dezembro de 2016.

[52]WRPRATES. **O que é o VPL?.** Disponível em: <<http://www.wrprates.com/o-que-e-vpl-valor-presente-liquido/>>. Acesso em:29 de novembro de 2016.

[53]ADVFN. **Taxa Selic Anual.** Disponível em: <<http://br.advfn.com/indicadores/taxa-selic>>. Acesso em: 29 de novembro de 2016.

[54]GLOBAL-RATES. **Inflação Brasil.** Disponível em: <<http://pt.global-rates.com/estatisticas-economicas/inflacao/indice-de-precos-ao-consumidor/ipc/brasil.aspx>>. Acesso em: 29 de novembro de 2016.