

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GISELA CRISTINA DILLMANN ROCKENBACH
LUAN LEITE DA SILVA
THIAGO ALBERTO DE MELLO

PROPOSTA DE GERAÇÃO HÍBRIDA EÓLICO/SOLAR *ON-GRID*
NO SETOR DE AVICULTURA NA REGIÃO DE DOURADOS-MS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2018

GISELA CRISTINA DILLMANN ROCKENBACH
LUAN LEITE DA SILVA
THIAGO ALBERTO DE MELLO

**PROPOSTA DE GERAÇÃO HÍBRIDA EÓLICO/SOLAR *ON-GRID*
NO SETOR DE AVICULTURA NA REGIÃO DE DOURADOS-MS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito à disciplina de TCC-2 para a conclusão do curso superior em Engenharia Elétrica, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT - pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Curitiba.

Orientador: Prof. Marcelo Barcik, Me.

**CURITIBA
2018**

Gisela Cristina Dillmann Rockenbach
Luan Leite da Silva
Thiago Alberto de Mello

Proposta de geração híbrida eólico/solar *on-grid* no setor de avicultura na região de Dourados-MS

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 22 de novembro de 2018.

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annermarlen Gehrke Castana, Ma.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Prof. Marcelo Barcik, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Natasha Salame da Silva, Dra.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Roberto Candido, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcelo Barcik, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

RESUMO

MELLO, Thiago Alberto de; ROCKENBACH, Gisela Cristina Dillmann Rockenbach; SILVA, Luan Leite da. **Proposta de geração híbrida eólico/solar on-grid no setor de avicultura na região de Dourados-MS**. 2018. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, 2018.

Este trabalho de conclusão de curso possui o objetivo de analisar a viabilidade de implementação de um empreendimento para geração híbrida em uma propriedade rural, a fim de determinar sua rentabilidade e sua capacidade de produção de energia elétrica baseada no aproveitamento dos recursos eólico e solar. Inicialmente, realiza-se uma introdução à motivação e aos principais conceitos de geração híbrida, apresentando sua forma de operação e emprego para a composição da matriz energética do país. Em seguida, faz-se uma abordagem teórica sobre os aspectos provedores da configuração de um sistema híbrido eólico-solar, realçando-se elementos técnico-construtivos de cada segmento, contextualizando-se o objetivo do trabalho com as regulamentações estabelecidas por órgãos normatizadores e pela análise do cenário energético nacional para a efetivação do uso de fontes alternativas. Utilizando dados como consumo energético da propriedade, horas de sol pico e velocidade do vento na localidade foi dimensionado o sistema de geração híbrido. Na análise econômica, constatou-se que neste caso a geração eólica acaba sendo prejudicada no retorno dos investimentos devido a velocidade do vento na região, resultando em uma TIR negativa de 31% e um *Payback* de mais de 120 anos. Já a geração fotovoltaica justifica-se por se tratar de um investimento atrativo economicamente, com uma TIR igual à 12%, resultando em um *Payback* de 5 anos e 8 meses. A conclusão de que somente a utilização do sistema fotovoltaico se torna viável, dá-se ao constatar que o mesmo apresenta uma economia de 57% por lote de frango se comparado à concessionária e 73% se comparado à configuração de geração híbrida.

Palavras Chaves: Energia Fotovoltaica, Energia Eólica, Geração-Híbrida, Avicultura, Propriedade Rural.

ABSTRACT

MELLO, Thiago Alberto de; ROCKENBACH, Gisela Cristina Dillmann Rockenbach; SILVA, Luan Leite da. **Proposal of on-grid hybrid wind/solar generation in the poultry sector in the region of Dourados-MS**. 2018. 92 f. TCC (Undergraduate) - Course of Electrical Engineering, Academic Department of Electrotechnology (DAELT), Federal Technological University of Paraná (UTFPR), Curitiba, 2018.

This research intent to present the viability analysis to implement a hybrid generation system in a rural property, to determinate its profitability and its capability to produce electric energy based on the exploration of Wind and Solar resources. Initially, it is presented the motivation and the main concepts of hybrid generation, along with its means of operation and its application to compose the country's energetic system. Then, a theory overview is applied to the formers aspects of Aeolian-solar hybrid system configuration, emphasizing technic-constructive elements of each area, contextualizing the purpose of this research by regularization standards established by regulative institutions and by the analysis of the national energetic structure to effectuate the use of alternatives sources. With the use of data from the property's energy consume, peek sun hours and wind speed at the location, was dimensioned a hybrid generation system. In the economic analysis, it was verified that in this case the wind generation ends up being hampered in the return of the investments due to the wind speed in the region, resulting in a negative TIR of 31% and a *Payback* of more than 120 years. The photovoltaic generation is justified because it is an attractive investment economically, with an TIR equal to 12%, resulting in a *Payback* of 5 years and 8 months. The conclusion that only the use of the photovoltaic system becomes feasible, it is verified that it has a savings of 57% per chicken batch compared to the concessionaire and 73% when compared to the hybrid generation configuration.

Keywords: *Photovoltaic Energy, Wind Energy, Hybrid Generation, Poultry, Rural Property.*

Lista de Siglas e Abreviaturas

ANEEL – Agência Brasileira de Energia Elétrica

BA – Bahia

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CE – Ceará

CERGRAND – Cooperativa de Energização e Desenvolvimento Rural da Grande Dourados

COFINS – Contribuição para Financiamento da Seguridade Social

CONFAZ – Conselho Nacional de Política Fazendária

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito

GD – Geração distribuída

HSP – Hora de sol pleno

ICMS – Imposto sobre circulação de mercadorias e serviços

MME – Ministério de Minas e Energia

MS – Mato Grosso do Sul

PIS – Programas de Integração Social

ProGD – Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica

PRONAF – Programa de Fortalecimento da Agricultura Familiar

PV – Painel Fotovoltaico

REN – Resolução Normativa

RN – Rio Grande do Norte

RS – Rio Grande do Sul

SELIC – Sistema Especial de Liquidação e de Custódia

SFVCR – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

TE – Tarifa de Energia

TIR – Taxa Interna de Retorno

TMA – Taxa Mínima de Atratividade

TUSD - Tarifa de Uso dos Sistemas Elétricos de Distribuição

UC – Unidade Consumidora

VPL – Valor Presente Líquido

Lista de Símbolos

α – Ângulo de Ataque

β – Ângulo de Passo

ρ – Massa Específica do Ar

η – Rendimento

A – Área

c – Velocidade Relativa do Vento

D – Comprimento

E – Energia

E_{CA} – Energia Elétrica Gerada Estimada Diária

E_{FF} – Eficiência do Módulo Fotovoltaico

F – Força

F_S – Fator de Perdas por Sombreamento

G – Irradiância

GW – Giga *Watt*

h – Altura

HSP – Horas de Sol Pleno

J – Joule

K – Kelvin

kg – Quilo grama

kWh – Quilo *Watt* Hora

kWh/m^2 – Quilo *Watt* Hora por Metro Quadrado

l – Comprimento do Condutor

m – Metro

N – Newton

n – Coeficiente de Hellmann

P – Potência

Pa – Pressão Atmosférica

P_N – Potência Nominal

P_R – Desempenho Global do Sistema

Q – Vazão

R_{ar} – Constante Universal dos Gases para o Ar

s – Segundo

T – Temperatura

t – Tempo

u – Velocidade Relativa da pá

v – Velocidade do Vento

V_L – Tensão

W – Watt

Lista de Figuras

Figura 1 – Componentes de um sistema híbrido de geração conectado à rede.	16
Figura 2 – Exemplo de sistema híbrido.	17
Figura 3 – Unidades consumidoras por classe de consumo	24
Figura 4 – Unidades consumidoras por estado	25
Figura 5 – Evolução da Capacidade Instalada de Energia Solar Fotovoltaica .	26
Figura 6 - TOP 10 países com maior capacidade instalada de geração fotovoltaica em 2017	27
Figura 7 – Penetração da FV na demanda de energia elétrica.	28
Figura 8 – Sistema <i>On grid</i>	30
Figura 9 – Corte transversal de uma célula fotovoltaica.....	31
Figura 10 – Células de silício Monocristalino e Policristalino	33
Figura 11 – Potência Eólica Instalada Cumulativa Global entre 2001 e 2016. .	37
Figura 12 – As 10 Maiores Potências Eólicas Instaladas.....	37
Figura 13 – Circulação Global dos Ventos.	40
Figura 14 – Velocidade do Vento a Alturas Diversas.	40
Figura 15 – Circulação da corrente de ar pelas pás do gerador.....	44
Figura 16 – Tipos de Turbinas Eólicas.....	47
Figura 17 – Conversão de Energia em Geradores Eólicos.	47
Figura 18 – Forças aerodinâmicas sobre um aerofólio.	48
Figura 19 – Forças projetadas no plano de rotação.....	50
Figura 20 – Relação entre os ângulos na pá do rotor.	51
Figura 21 – Sistema de controle tipo Estol.....	52
Figura 22 – Curva de potência de um aerogerador.....	53
Figura 23 – Fluxograma das etapas de um projeto de geração eólica.....	54
Figura 24 - Vista superior da granja	56
Figura 25 - Vista Frontal da granja.....	57
Figura 26 - Gráfico da Irradiação Solar no Plano Horizontal	59
Figura 27 - Painel solar Risen 330W - RSM72-6-330P	62
Figura 28 - Variações da corrente, tensão e potência do módulo fotovoltaico nas diferentes irradiações.	64
Figura 29 - Disposição dos módulos fotovoltaicos	66

Figura 30 - Características dos cabos solares	69
Figura 31 - Características dos condutores.....	71
Figura 32 – Média anual da velocidade do vento	73
Figura 33 - Direção da incidência de ventos	73
Figura 34 - Gráfico da incidência dos ventos	75
Figura 35 - Desempenho do gerador	77
Figura 36 - Esquema do sistema eólico	77
Figura 37 - Queda de tensão unitária dos cabos.....	79

Lista de Tabelas

Tabela 1 – UCs por tipo de geração.....	26
Tabela 2 - Capacidade Instalada de Geração Nacional.....	38
Tabela 3 – As 10 Maiores Usinas Eólicas Brasileiras.	38
Tabela 4 – Expansão Contratada da Capacidade Instalada em MW.....	39
Tabela 5 – Escala Anemométrica Internacional de Beaufort.....	42
Tabela 6 - Energia consumida mensalmente	58
Tabela 7 - Irradiação solar média no Plano Horizontal.....	59
Tabela 8 - Cotação dos módulos fotovoltaicos.....	61
Tabela 9 - Eficiência e garantia dos módulos fotovoltaicos.....	62
Tabela 10 - Dados retirados do <i>datasheet</i> do inversor REFUsol 40K.....	65
Tabela 11 - Especificações do painel solar	66
Tabela 12 - Resumo das especificações do aerogerador	76
Tabela 13 - Seção nominal conforme distâncias.....	79
Tabela 14 - Valores de transformadores	80
Tabela 15 – Custos dos materiais necessários para a implementação do sistema de geração eólico	81
Tabela 16 – Custos dos materiais necessários para a implementação do sistema de geração fotovoltaica.	81
Tabela 17 - Investimento inicial, economia anual e taxa interna de retorno dos tipos de geração.....	82
Tabela 18 - Preço do kWh de cada tipo de geração, do sistema híbrido e da concessionária de energia.....	83
Tabela 19 - Custo por lote de frango com energia elétrica nas diferentes configurações do sistema.....	83

Lista de Equações

Equação 1.....	40
Equação 2.....	43
Equação 3.....	43
Equação 4.....	43
Equação 5.....	43
Equação 6.....	43
Equação 7.....	44
Equação 8.....	45
Equação 9.....	45
Equação 10.....	45
Equação 11.....	45
Equação 12.....	46
Equação 13.....	46
Equação 14.....	49
Equação 15.....	49
Equação 16.....	51
Equação 17.....	51
Equação 18.....	51
Equação 19.....	51
Equação 20.....	51
Equação 21.....	51
Equação 22.....	52
Equação 23.....	32
Equação 24.....	55
Equação 25.....	55
Equação 26.....	60
Equação 27.....	60
Equação 28.....	61
Equação 29.....	63
Equação 30.....	63
Equação 31.....	65
Equação 32.....	67

Equação 33.....	67
Equação 34.....	67
Equação 35.....	68
Equação 36.....	68
Equação 37.....	70
Equação 38.....	72
Equação 39.....	72
Equação 40.....	78
Equação 41.....	83

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. TEMA	15
1.1.1. Delimitação do Tema	17
1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS	17
1.3. OBJETIVOS.....	18
1.3.1. Objetivo Geral	18
1.4. JUSTIFICATIVA.....	19
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	20
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E SUA PRESENÇA NO BRASIL.....	21
2.1.1. Regulamentação e Incentivos para sistemas conectados à rede ...	21
2.1.2. Mapeamento da geração distribuída no Brasil	23
2.2. PANORAMAS BRASILEIRO E MUNDIAL DA ENERGIA SOLAR.....	26
2.2.1. Panorama atual de Sistema Fotovoltaico no mundo.....	26
2.2.2. Panorama atual de Sistema Fotovoltaico no Brasil.....	28
2.3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: CLASSIFICAÇÃO E COMPONENTES	29
2.4.1 Painel fotovoltaico	30
2.4.2 Inversor	35
2.4.3 Medidor bidirecional e monitoramento	35
2.4. ENERGIA EÓLICA	36
2.4.1. O Vento	39
2.4.2. Geradores	46
2.5 METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DE RETORNO DE INVESTIMENTO	54

3. DETERMINAÇÃO DE FATORES NECESSÁRIOS PARA GERAÇÃO HÍBRIDA EM UMA GRANJA DE FRANGO DE CORTE.....	56
3.1 DESCRIÇÃO DO ESPAÇO FÍSICO DA GRANJA E ANÁLISE DO HISTÓRICO DE CONSUMO	56
3.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	58
3.2.1 Irradiação solar média anual	58
3.2.2 Potência nominal do conjunto.....	59
3.2.3 Definição do módulo fotovoltaico	61
3.2.4 Área de instalação dos módulos fotovoltaicos	63
3.2.5 Número de módulos fotovoltaicos.....	63
3.2.6 Inversor de frequência	64
3.2.7 Dimensionamento da seção dos condutores	69
3.2.8 Disjuntores.....	71
3.3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA EÓLICO	72
3.3.1 Média anual da velocidade do vento	72
3.3.2 Definição do aerogerador	75
3.3.3 Dimensionamento da seção dos condutores	78
3.3.4 Definição do transformador	80
4. ASPETOS ECONÔMICOS DO EMPREENDIMENTO HÍBRIDO DE GERAÇÃO DE ENERGIA.....	81
5. CONCLUSÃO	84
REFERÊNCIAS.....	86

1. INTRODUÇÃO

1.1. TEMA

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, em 2018 o Brasil ocupa o 8º lugar entre os países em geração eólica, com uma potência total de 9,6GW e previsão futura para agregar mais 8 GW em cerca de 3500 novos empreendimentos.

Somado a isso, a geração através da energia solar no ano de 2018 representa 0,02 % de toda potência instalada da matriz energética brasileira, com uma participação de aproximadamente 3 GW de potência, e pode-se dizer que, entre as fontes alternativas de energia, é a que tem ganhado mais destaque no cenário elétrico nacional (ANEEL, 2018).

Sabendo-se que essas duas fontes renováveis se destacam como alternativas de geração de energia, as mesmas podem ser combinadas para formarem um único sistema de geração, de modo a aprimorar a continuidade de todo o sistema, uma vez que uma fonte pode em algumas situações compensar a falta temporária de outra. A essa característica de complementação de geração através da mescla de duas ou mais fontes de energia denomina-se como sistema híbrido. Os sistemas híbridos são usualmente classificados quanto à interligação com a rede elétrica, prioridade do uso das fontes de energia e configuração (BARBOSA, 2006).

No primeiro item de classificação, os sistemas híbridos são definidos como isolados ou interligados. Os sistemas isolados são aqueles que suprem uma determinada carga de forma totalmente independente do sistema elétrico. Para tal, há a necessidade de uma estrutura de armazenamento para o fornecimento de energia quando houver indisponibilidade de geração por parte das fontes alternativas. Já os sistemas interligados são caracterizados pela entrega da energia gerada à rede elétrica, proporcionando um intercâmbio de energia entre os diversos pontos de geração e consumo (MME, 2008).

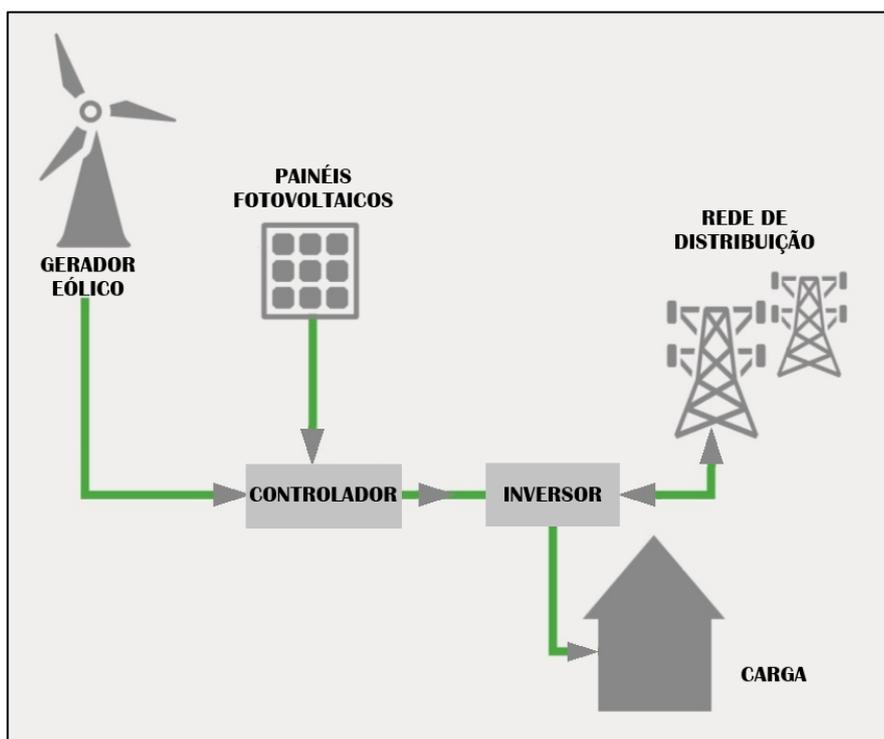
Com relação à prioridade do uso das fontes de energia, tem-se a divisão dos sistemas híbridos baseados em recursos renováveis ou não renováveis. Estes, geralmente compostos por geradores eólico-diesel ou fotovoltaico-diesel. Quanto à configuração dos sistemas híbridos, estes são classificados de acordo com o atendimento à carga como sistemas em série, paralelo ou chaveado. No modo paralelo, as fontes geradoras são conectadas de forma paralela aos barramentos

através de um controlador e um inversor. O modo chaveado é atualmente o mais empregado nos sistemas híbridos, onde há a presença de grupos geradores conectados ao sistema. Nessa configuração, a carga pode ser suprida individualmente, ou pelo grupo gerador, ou pelas fontes alternativas. Porém, não ao mesmo tempo pelas duas fontes. Sendo assim é necessário um controle do chaveamento entre esses dois sistemas de atendimento à carga (MME, 2008).

Atendendo a fatores como a demanda de carga a ser atendida e o potencial de geração elétrica, a partir das fontes eólica e solar, existente na propriedade rural, a implementação de um sistema híbrido de geração pode ser atrativa do ponto de vista financeiro por parte do produtor rural, tendo em vista o investimento requerido para seu funcionamento e a economia que o sistema proporcionaria.

Com base na crescente utilização de fontes alternativas para geração de energia elétrica, e nas definições acima mencionadas, busca-se neste trabalho avaliar a viabilidade de implementação de um sistema híbrido em uma propriedade rural, o qual é definido pela utilização simultânea de gerador eólico e solar acoplados a controladores e inversores CA/CC e conectados à rede, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Componentes de um sistema híbrido de geração conectado à rede.



Fonte: Adaptado de Solar Wind M.E. (2018).

1.1.1. Delimitação do Tema

A proposta deste trabalho é estabelecer parâmetros para análise de viabilidade econômica e técnica de um sistema híbrido, avaliando possíveis ganhos financeiros com a implementação do sistema em um caso de estudo. Levando em consideração o histórico de consumo de energia elétrica de uma granja de frangos de corte localizada no município de Dourados-MS, serão dimensionados geradores eólicos, placas fotovoltaicas e outros equipamentos necessários para a construir o sistema híbrido. A Figura 2 apresenta um sistema híbrido de geração.

Figura 2 – Exemplo de sistema híbrido.



Fonte: Assolar Acessórios Solares.

1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS

Sabendo-se que o Sol fornece anualmente à Terra cerca de $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia, o que corresponde a 10.000 (dez mil) vezes o consumo mundial de energia nesse período, tem-se que a radiação solar representa uma vasta fonte energética com enorme potencial de utilização e conversão em energia elétrica (MME, 2008).

Uma das formas de conversão dessa energia é a utilização de painéis fotovoltaicos, os quais têm seu funcionamento baseado na produção de corrente elétrica quando expostos à luz, para a geração de energia elétrica em ambientes propícios. Para que a geração seja de fato eficiente, fatores como a orientação do painel para um melhor aproveitamento da incidência de irradiação solar e a temperatura da célula fotovoltaica devem ser avaliados ante sua instalação, por isso, um levantamento de dados de incidência solar faz-se necessário, além de um método

de controle de orientação do painel para que sempre possa ser convertida a maior quantidade possível de energia solar em elétrica.

Levando-se em consideração o fato que a geração elétrica do painel solar em determinados dias não será feita sob sua capacidade máxima de conversão, pode-se buscar formas alternativas de complemento à geração minimizada via painel solar, como a adição de uma fonte eólica geradora.

Por ser uma forma de geração de energia com baixíssimo impacto ambiental, o emprego de geradores eólicos em ambientes rurais permite a ocupação do solo para agricultura e agropecuária sem que haja riscos à essas atividades (COSTA, CASOTTI e AZEVEDO, 2009). Tendo em vista essa possibilidade prática, pode-se avaliar e adaptar modelos de geradores de acordo com o perfil da unidade consumidora baseada em diferentes níveis de cargas demandadas. Porém, é de extrema relevância levar em consideração a localização e altura da torre para que sua capacidade de geração seja eficaz, ou seja, buscar instalá-las em lugares onde os ventos sejam consistentes e com velocidades significativas.

A partir dos aspectos acima mencionados, o sistema híbrido pode ser uma boa alternativa para geração em ambientes rurais onde há uma grande exposição solar e susceptibilidade a ventos de boa intensidade, por ser um sistema que pode ser considerado de baixo investimento e sem perdas de áreas produtivas para o produtor rural.

Dessa forma, através do estudo de caso da viabilidade de implementação de um sistema híbrido em uma granja de frangos de corte, visando uma possível redução de gastos e do tempo de retorno do investimento realizado, busca-se dizer se é vantajoso, do ponto de vista de um produtor rural, a utilização desse sistema alternativo para geração de energia elétrica e, conseqüentemente, obter ganhos financeiros com isso.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

Estudar a viabilidade técnica e econômica de implantação de um sistema híbrido em um caso real de uma propriedade rural, levando em consideração fatores como, índices de irradiação solar, incidência de ventos na localidade e principalmente, o custo.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Revisão bibliográfica dos temas a serem abordados no presente trabalho;
- Analisar a possibilidade de geração de energia híbrida no local;
- Estudar os índices de radiação solar e incidência de ventos da propriedade utilizando dados do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB);
- Pesquisar as principais tecnologias de painéis fotovoltaicos e aerogeradores;
- Estabelecer os que melhores se enquadram para o estudo de caso em questão, analisando suas características a partir da folha de dados fornecida por seus fabricantes;
- Verificar a viabilidade econômica da instalação com a utilização de sistemas geradores de energia eólica e solar fotovoltaica;
- Elaborar o projeto elétrico de geração híbrida da propriedade rural.

1.4. JUSTIFICATIVA

A geração distribuída é um ramo em crescimento no Brasil e traz vários benefícios, como por exemplo: maior investimento em energia limpa e renovável, evita perdas e investimentos em linhas de transmissão por ter a geração diretamente ou próximo ao consumidor. O Ministério de Minas e Energia estima que 2,7 milhões de unidades consumidoras terão geração própria até 2030 e o governo está incentivando a geração distribuída. Uma das áreas de foco do governo federal é a agricultura familiar, através do Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF) do Ministério do Desenvolvimento Agrário lançado em 2015 com uma linha de crédito para subsídios de infraestrutura, incluindo geração de energia eólica e fotovoltaica.

A energia elétrica é parte vital na criação de frangos de corte, fazendo-se necessária para a energização de ventiladores incorporados no sistema de controle da temperatura, dos umidificadores de ar das granjas, da iluminação dos galpões e dos alimentadores movidos a motor. O sistema de climatização, composto por ventiladores e umidificadores, representa um dos maiores custos nos aviários e é imprescindível, uma vez que a temperatura necessita ser controlada para otimizar o crescimento das aves (BALDIN,2013).

Haja vista a significância dos custos com energia elétrica na criação de frangos de corte e que a geração distribuída é um mercado em crescimento e com incentivos para sua instalação em zonas rurais, será realizado um estudo de caso para a implantação de um sistema híbrido eólico-solar em uma granja em Dourados-MS.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste trabalho, inicialmente será realizada uma pesquisa bibliográfica com finalidade de obter conhecimento a respeito dos assuntos a serem abordados, posteriormente serão coletados dados de consumo, irradiação solar e potencial eólico de uma propriedade rural. Os dados coletados serão utilizados para dimensionar os equipamentos necessários para a geração de energia fotovoltaica e eólica. Levando em conta o potencial de geração e o custo de implementação do sistema de geração híbrido, serão determinados o retorno estimado dos investimentos e o custo do *kWh* dos diferentes tipos de geração.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso está estruturado da seguinte maneira:

Capítulo 1: **Introdução** sobre o objeto a ser pesquisado, descrevendo problemas, justificativas, procedimentos metodológicos, objetivo geral e específicos;

Capítulo 2: **Revisão Bibliográfica** sobre os temas abordados nesta pesquisa como energia eólica, energia fotovoltaica, geração híbrida, sistemas de geração conectados à rede elétrica.

Capítulo 3: **Determinação de fatores necessários para a geração híbrida em uma granja de frango de corte** com levantamento de dados e análise de consumo, irradiação solar e potencial eólico da granja. Além do dimensionamento dos equipamentos necessários para a instalação.

Capítulo 4: **Aspectos econômicos do empreendimento híbrido de geração de energia** determinando a expectativa de retorno dos investimentos e o valor da tarifa de energia nas diferentes configurações.

Capítulo 5: **Conclusões finais e proposta para trabalhos futuros.**

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E SUA PRESENÇA NO BRASIL

A geração distribuída (GD) é caracterizada pela fonte próxima ao consumidor, produção em pequena escala, potência reduzida e diversas formas de geração. Leva este nome pois, não segue o modelo convencional de geração, que consiste em grandes usinas centralizadas em algumas localidades, e promove a distribuição geográfica da matriz energética da região. Pode ser conectada à rede de distribuição de energia ou conectada somente ao consumidor, caracterizando um sistema isolado. Esse modo de geração tem algumas vantagens em relação a geração centralizada, como por exemplo: redução dos custos e perdas com transmissão e distribuição de energia devido à proximidade da fonte com a carga, diversificação da matriz energética com destaque para as fontes de energia renováveis, aumento da confiabilidade e estabilidade do sistema elétrico, diminuição dos custos com energia dos consumidores e redução da emissão de gases do efeito estufa. As desvantagens da GD estão relacionadas aos custos de implantação arcados pelo consumidor e aos impactos às distribuidoras de energia elétrica, que tem a obrigatoriedade de se adequar à nova forma de geração mesmo com a redução de arrecadação que a GD ocasiona (DIAS, 2005).

2.1.1. Regulamentação e Incentivos para sistemas conectados à rede

Nos últimos anos uma série de medidas do governo federal foram anunciadas para incentivar a geração distribuída de fontes de energia renováveis no Brasil. Foram regulamentações, programas de incentivo, redução ou isenção impostos, como os listados a seguir.

A regulamentação da microgeração e minigeração conectada à rede de distribuição no Brasil é recente, de 17 de abril de 2012, dia em que foi publicada pela ANEEL a Resolução Normativa (REN) nº 482. A partir desta data, o consumidor brasileiro pode optar por gerar sua própria energia e fornecer o excedente para as concessionárias de energia que detém a distribuição na sua região. Além desta, também foi publicada a Resolução Normativa nº 687 em 2015 com o intuito de revisar e aprimorar a resolução anterior. As resoluções normativas permitem a geração por fontes renováveis e cogeração qualificada e separa em duas grandes categorias as

unidades consumidoras (UCs):

Microgeração distribuída: UCs com potência instalada de até 75 kW que utilizem como forma de geração fontes de energia renováveis ou cogeração qualificada (requisitos estabelecidos na REN nº 235/2006).

Minigeração distribuída: UCs possuem potência instalada superior a 75 kW e inferior a 5 MW, exceto fontes hídricas que são consideradas minigeradoras apenas até 3 MW.

A energia gerada excedente não gera lucros ao consumidor, já que a resolução só prevê a compensação de energia, também chamada de créditos de energia. Também não é permitida a venda do excedente de energia gerado para terceiros, o objetivo da REN é a redução dos custos com energia e não a lucratividade dos consumidores. Os créditos podem ser utilizados na própria unidade consumidora ou em outra unidade que tenha a mesma titularidade e seja atendida pela mesma concessionária de energia, o autoconsumo remoto. O consumidor pode compensar os créditos em um prazo de até sessenta meses após a geração do excedente.

Outra configuração, também prevista na resolução normativa, é a reunião de consumidores por meio de cooperativa ou consórcio, considerando a regra de que todos devem ser atendidos pela mesma concessionária, caracterizando uma geração compartilhada. Ou ainda em condomínios, empreendimentos com múltiplas unidades consumidoras no mesmo terreno ou terrenos adjacentes, neste caso os créditos podem ser utilizados tanto para as áreas comuns tanto para divisão equitativa entre as UCs. A REN não se aplica a clientes especiais ou livres, somente consumidores normais.

A potência instalada de micro ou mini geração fica limitada a potência contratada da unidade consumidora na distribuidora de energia, o consumidor pode solicitar aumento de potência disponibilizada a fim de instalar uma geração com potência maior. Quaisquer custos com melhorias ou reforços de redes de distribuição deverão ser arcados pela concessionária à exceção de consumidores que constituam uma cooperativa ou consórcio e no caso de minigeração distribuída.

Os custos de disponibilidade do sistema devem ser pagos pelas UCs mesmo que haja excedente de energia gerada. Consumidores conectados em baixa tensão, abaixo de 2,3 kV, tem os custos de disponibilidade definidos para cada tipo de conexão: 30 kWh para conexões monofásicas, 50 kWh para as bifásicas e 100 kWh

para as trifásicas. As conexões em alta tensão, acima de 2,3 kV, devem pagar a parcela referente à demanda contratada mais a diferença entre a energia consumida e gerada (ANEEL, 2016).

A isenção de impostos para a energia gerada é prevista na lei nº13.169/2015 para os impostos federais (PIS e COFINS). Esta lei determina que somente serão incididos na fatura os impostos referentes ao saldo positivo de energia consumida, ou seja, quando o consumo for maior que a geração. Quanto ao ICMS, imposto estadual, os estados que aderiram ao Convênio do CONFAZ ICMS 16/2015 oferecem a isenção do imposto para a energia gerada, incidindo somente sobre a diferença entre a energia injetada na rede e a consumida. O Convênio não é aplicado para múltiplas UCs (condomínios) e geração compartilhada (cooperativas). Aderiram ao CONFAZ os estados do Acre, Alagoas, Amapá, Amazonas, Bahia, Ceará, Espírito Santo, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Pará, Paraíba, Paraná, Pernambuco, Piauí, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul, Rondônia, Roraima, Santa Catarina, São Paulo, Sergipe, Tocantins e o Distrito Federal. Nos demais estados que não oferecem isenção de imposto, as UCs devem pagar o referente a toda a energia consumida no mês, não importando a quantidade de energia injetada na rede (CONFAZ, 2015).

Em dezembro de 2015 o Ministério de Minas e Energia (MME) lançou o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), o objetivo do programa é ampliar a geração distribuída com fontes renováveis de energia resultando no aumento das energias renováveis na matriz elétrica e energética brasileira e, por consequência, auxiliar no alcance das metas de redução de emissão de gases de efeito estufa. O ProGD promete investir 100 bilhões de reais até 2030, a expectativa é que ao fim do programa tenham aderido 2,7 milhões de unidades consumidoras com geração de 48 milhões de MWh e redução de 29 milhões de toneladas de CO₂. Está previsto no programa aumentar e criar linhas de crédito e financiamento, reduzir impostos e incentivar o desenvolvimento de equipamentos e componentes para a geração de energia, a capacitação de profissionais para trabalhar na área e a atração de investimentos (MME, 2015).

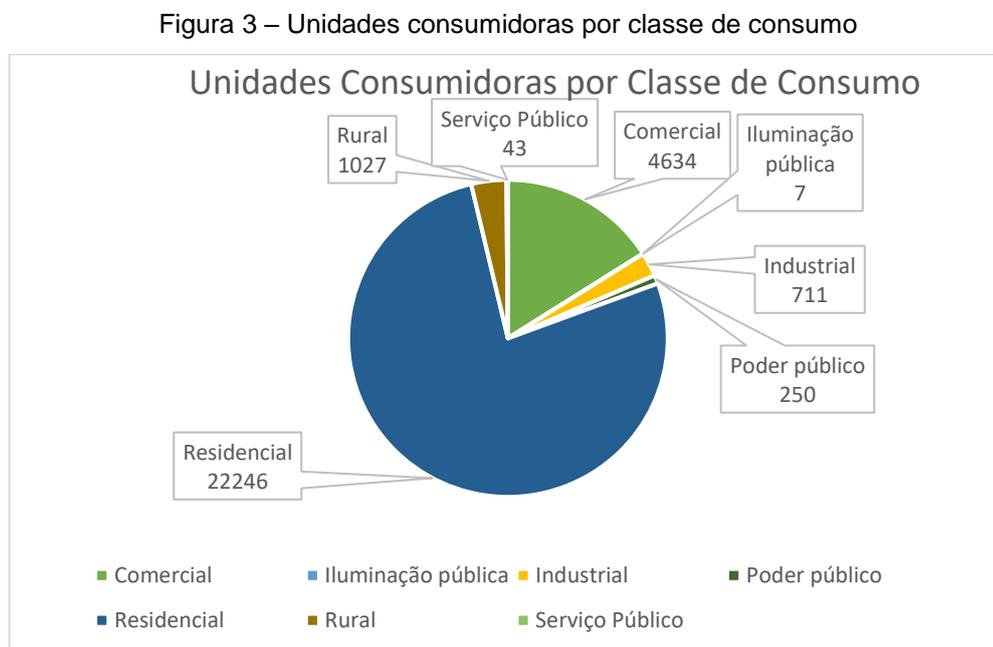
2.1.2. Mapeamento da geração distribuída no Brasil

O Brasil possui um Sistema de Registro de Geração Distribuída (SISGD) onde

as UCs com GD são registradas no pelas concessionárias ou permissionárias de energia. A ANEEL disponibiliza online relatórios da geração distribuída no Brasil onde é possível visualizar a quantidade de unidades consumidoras que recebem os créditos e as unidades geradoras.

Atualmente (22 de maio de 2018) existem 28.918 UCs que possuem usinas geradoras de energia e todas juntas contam com uma potência instalada de 341.054,58 kW. A maioria das unidades, cerca de 26 mil, tem geração própria e compensam a energia somente na própria unidade. Mais de 41 mil UCs diferentes usufruem de créditos de energia. A modalidade que mais utilizada para a compensação é o autoconsumo remoto, onde o titular das faturas é o mesmo. Seguido da geração compartilhada, as cooperativas, que possuem 178 unidades gerando energia e 839 recebendo os créditos. Quanto aos condomínios, apenas uma unidade geradora está cadastrada neste modo e outras cinco UCs utilizam os créditos.

Os consumidores residenciais foram os que mais aderiram a geração distribuída, representando uma parcela de 76,92 % das UCs registradas na ANEEL. A Figura 3 mostra a quantidade de UCs cadastradas por classe de consumo.

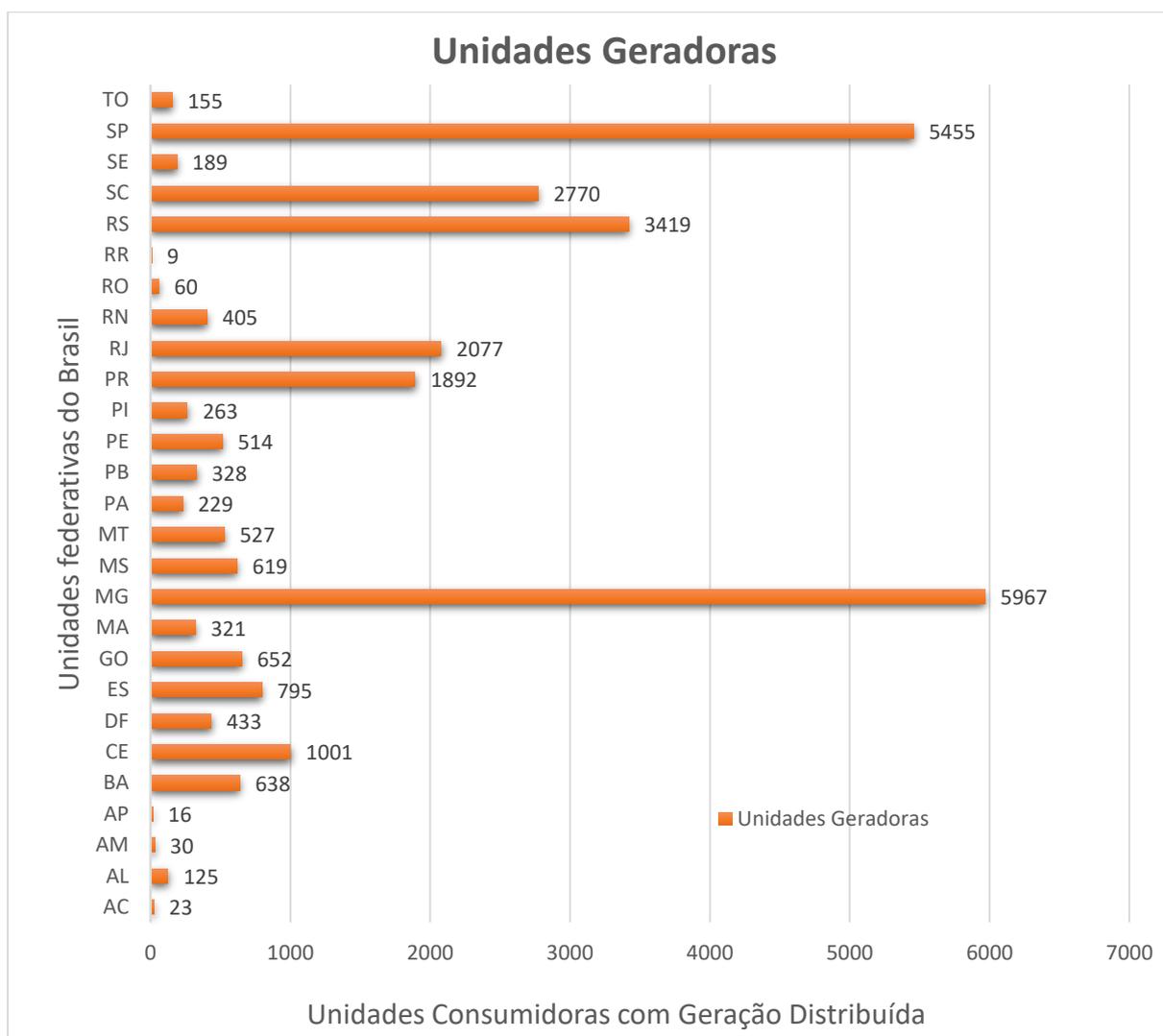


Fonte: Autoria própria, dados: ANEE (2018).

Minas Gerais foi o estado pioneiro na isenção do ICMS para a geração distribuída, por este e outros motivos o estado lidera o número de conexões na rede. A Figura 4 apresenta a quantidade de UCs com geração própria registradas na ANEEL

por estado.

Figura 4 – Unidades consumidoras por estado



Fonte: Autoria própria, dados: ANEEL (2018).

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede lideram a potência instalada por geração distribuída, além de liderarem também a quantidade de usinas instaladas. A Tabela 1 apresenta a quantidade de usinas e a potência instalada por tipo de geração e, também, a porcentagem que cada um representa de toda a geração distribuída no Brasil.

Tabela 1 – UCs por tipo de geração

Tipo de Geração	UCs com geração	UCs que recebem os créditos	Potência Instalada (kW)	% de potência	% de unidades
Central Hidrelétrica	46	6796	43.347,98	12,7	0,2
Usina Eólica	55	98	10.310,1	3,0	0,2
Usina Fotovoltaica	28.727	34.116	262.554,42	77,0	99,3
Usina Termelétrica	90	233	24.842,08	7,3	0,3

Fonte: Autoria própria, dados: ANEEL (2018).

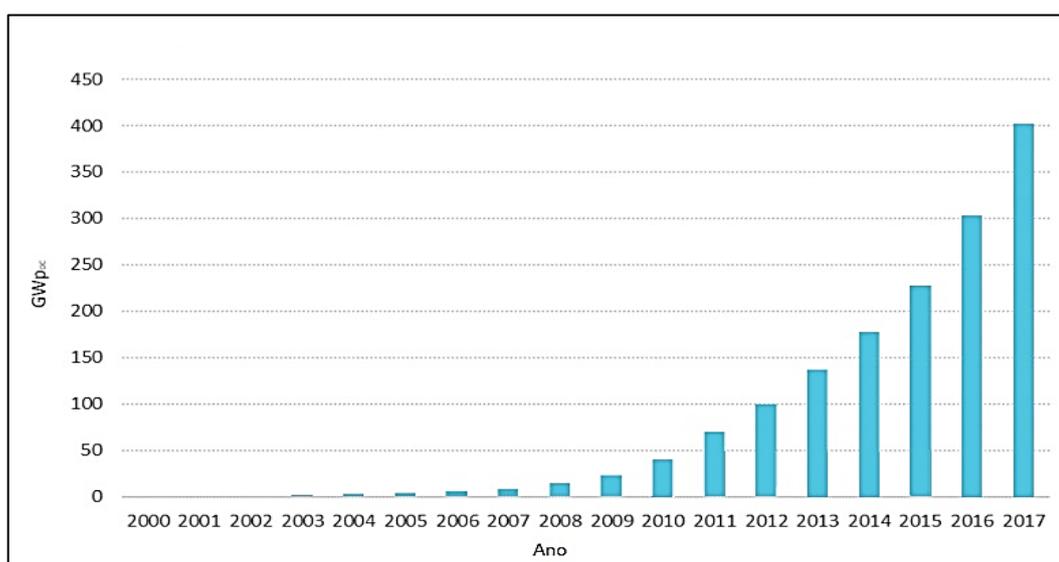
A geração distribuída é uma tendência no Brasil. Somente no ano de 2018 (até a data de 22 maio de 2018) foram 7.610 novas unidades geradoras registradas no Brasil. Dentre elas duas eólicas e 7.587 solares.

2.2. PANORAMAS BRASILEIRO E MUNDIAL DA ENERGIA SOLAR

2.2.1. Panorama atual de Sistema Fotovoltaico no mundo

O mercado mundial fotovoltaico vem crescendo exponencialmente nos últimos anos, atingindo, em 2017, conforme *Internacional Energy Agency* (IEA), a capacidade total instalada de 400 GW_{dc}, como apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Evolução da Capacidade Instalada de Energia Solar Fotovoltaica



Fonte: Adaptado de IEA PVPS (2018).

Pode-se observar que a capacidade de geração de energia solar fotovoltaica vem crescendo significativamente desde 2003, tendo seu maior destaque nos países

européus.

Até o ano de 2015 o mundo possuía uma potência fotovoltaica instalada de 234 GW, que corresponde por 1.65 mil km² de painéis solares. Projeta-se que no ano de 2050, para um cenário moderado, a energia solar corresponda por 11 % da oferta mundial de energia elétrica, em torno de 5.000 TWh e a área coberta pelos painéis representará 8 mil km² (MME, 2016).

Países como China, Estados Unidos e Japão dominam no ranking mundial dentre os 10 países com maior capacidade instalada de geração fotovoltaica. Como pode-se averiguar na Figura 6.

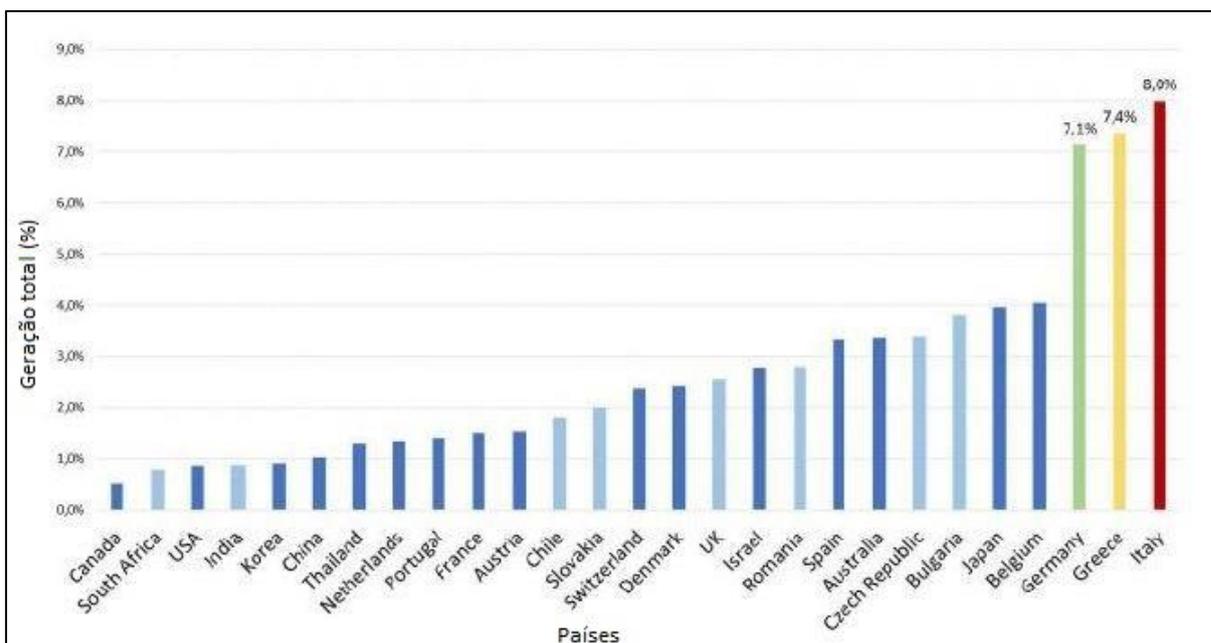
Figura 6 - TOP 10 países com maior capacidade instalada de geração fotovoltaica em 2017

1		China	131 GW
2		USA	51 GW
3		Japan	49 GW
4		Germany	42 GW
5		Italy	19,7 GW
6		India	18,3 GW
7		UK	12,7 GW
8		France	8 GW
9		Australia	7,2 GW
10		Spain	5,6 GW

Fonte: Captura de Global PV Markets, IEA PVPS (2017).

De um total de 344,5 GW, estes 3 países detêm aproximadamente 67 % da capacidade instalada de geração fotovoltaica mundial. Já o Brasil, em 2017, atingiu 1,15 GW de capacidade instalada. Avaliando agora a porcentagem em relação à geração total da utilização da fonte solar na matriz energética de um país, tem-se a Figura 7.

Figura 7 – Penetração da FV na demanda de energia elétrica.



Fonte: IEA (2015).

Pode-se fazer um comparativo entre a capacidade instalada e os percentuais que a energia solar fotovoltaica representa da demanda total do país por eletricidade. Concluindo que os países que maior representam a fonte solar em relação à demanda são Itália, Grécia e Alemanha. Estados Unidos e China, líderes mundiais em capacidade instalada, a fonte solar não apresenta grande relevância para atendimento da demanda total do país por eletricidade.

2.2.2. Panorama atual de Sistema Fotovoltaico no Brasil

O globo terrestre é dividido em 3 zonas térmicas: Tropical, Temperada, Polar ou Glacial. As zonas térmicas são, basicamente, a intensidade em que os raios solares incidem em diferentes lugares da Terra em determinados períodos do ano conforme sua disponibilidade geográfica no globo terrestre.

Grande parte do território brasileiro fica localizado na zona térmica tropical - entre o trópico de Câncer e trópico de Capricórnio, neste meio se encontra a Linha do Equador, onde a luz atinge de forma perpendicular, portanto nesta zona a luz solar se dispõe de forma praticamente vertical em sua superfície. Apenas 8 % do território brasileiro está localizado na Zona Temperada, onde os raios incidem à superfície de forma relativamente inclinada, portanto, as temperaturas são mais amenas (ESTADOS E CAPITAIS DO BRASIL, 2017).

A partir do Primeiro Simpósio Brasileiro De Energia Solar no ano de 1958, o desenvolvimento tecnológico no Brasil acerca de Energia Solar vem crescendo, tanto que nos anos 70 chegou a equiparar-se ao que ocorria nos países de vanguarda no mundo, incentivado pela crise internacional do petróleo.

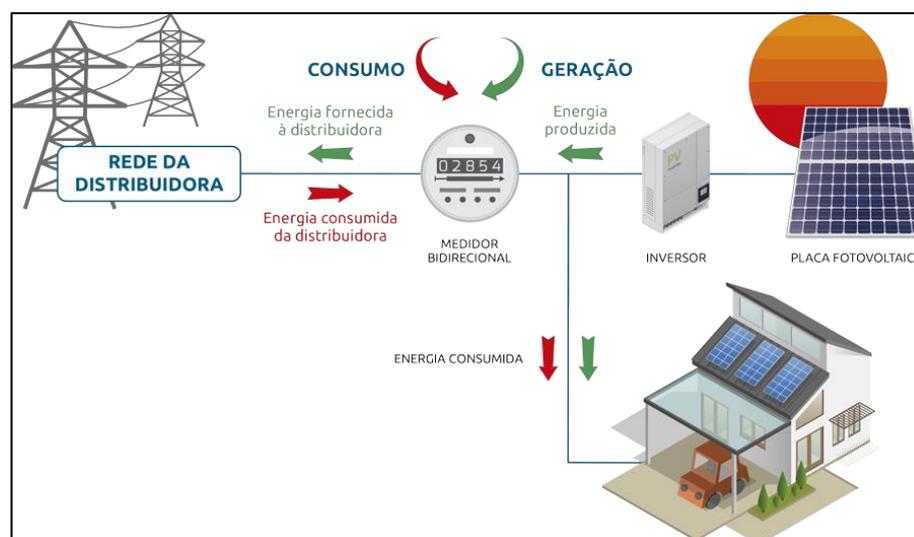
De acordo com Pereira, E. B. et al. (2006), a média anual de irradiação global apresenta uma boa uniformidade no Brasil, com médias relativamente altas em todo o território. Os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro (1500-2.500 Wh/m²) são superiores aos da maioria dos países europeus, como Alemanha (900-1250 Wh/m²), França (900-1650 Wh/m²) e Espanha (1200-1850 Wh/m²), locais onde projetos de aproveitamentos solares são amplamente disseminados.

2.3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: CLASSIFICAÇÃO E COMPONENTES

Segundo Pinho e Galdino (2014), um sistema fotovoltaico completo pode ser dividido em três grupos principais:

- Grupo gerador: composto pelos módulos fotovoltaicos, que convertem a energia solar em elétrica, suas interligações e estruturas;
- Grupo de condicionamento de potência: composto pelos conversores de corrente, seguidores de potência máxima (SPPM), inversores, controladores de carga (no caso em que há armazenamento), dispositivos de proteção, supervisão e controle;
- Grupo de armazenamento: composto pelas baterias e demais formas de armazenamento de energia.

Um sistema fotovoltaico é um modelo em que os componentes de seu conjunto funcionam de forma a realizar a captação da energia solar, e sua conversão em eletricidade. Podem ser classificados em dois modelos, sistemas isolados (*off-grid*) ou conectados à rede (*on-grid*). Neste trabalho será utilizado o sistema *On-Grid*, este tipo de sistema fotovoltaico precisa, necessariamente, estar conectado à rede de distribuição de energia e dispensam o uso das baterias e dos controladores de carga, o que faz com que seu conjunto tenha preços menores. A Figura 8 esquematiza o sistema.

Figura 8 – Sistema *On grid*

Fonte: Enel Soluções (2018).

Tal sistema é composto por:

- Painéis solares fotovoltaicos: captam os raios solares e os transformam em energia elétrica de corrente contínua;
- Inversor: são usados para converter a energia de corrente contínua em para corrente alternada, compatível com a rede elétrica local e com a maioria dos equipamentos de uso doméstico;
- Medidor Bidirecional: mede a energia que é injetada na rede elétrica pela residência;
- Monitoramento: utilizados para monitorar e medir a geração de energia solar.

Por não possuírem dispositivo de armazenamento, toda a energia excedente produzida é enviada de volta à rede convencional de energia elétrica, no entanto, se a energia gerada não for suficiente, a rede elétrica compensa o que faltar. No final das contas paga-se a diferença entre a energia consumida da rede elétrica e o que foi produzida pela unidade consumidora.

2.4.1 Painel fotovoltaico

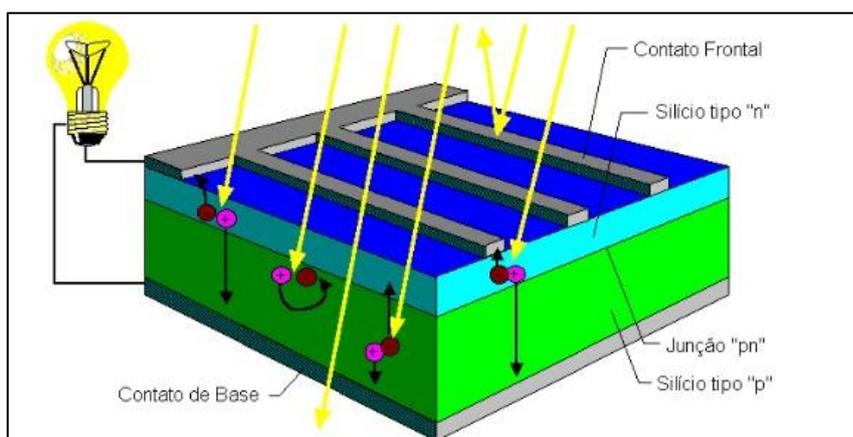
Uma célula fotovoltaica é a responsável pela conversão da radiação solar em eletricidade. Para a geração e potências elétricas elevadas, associam-se várias células, e as encapsulam para proteção, formando assim um módulo fotovoltaico. O conjunto destes módulos leva o nome de painel fotovoltaico e estes constituem a primeira parte do sistema, sendo estes os responsáveis no processo de captação da

irradiação solar e a sua transformação em energia elétrica. Os módulos comerciais diferem entre si por vários fatores, como material, a capacidade de gerar potencial, área, etc. E esses fatores alteram diretamente nos valores de acordo com o tipo de célula fotovoltaica utilizada.

Células fotovoltaicas são fabricadas com material semicondutor, ou seja, material com características intermédias entre um condutor e um isolante. O cristal de silício puro não possui elétrons livres, e portanto, é mal condutor elétrico. Para alterar isto, utilizamos o método de dopagem, que consiste em inserir impurezas no material semicondutor. Essas impurezas podem ser do tipo n (elementos penta valentes, que possuem cinco ligações em sua camada de valência, como Fosforo, Arsênio e Antimônio) ou do tipo p (elementos trivalentes, como Boro, Alumínio, Gálio e Índio).

Cada célula solar compõe-se de camada fina de material tipo N e outra com maior espessura de material tipo P, conforme Figura 9.

Figura 9 – Corte transversal de uma célula fotovoltaica.



Fonte: CRESESB (2006).

Ao serem unidas na região pn, forma-se um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício tipo n que ocupam os vazios da estrutura do silício tipo p. Ao incidir luz sobre a célula fotovoltaica, os fótons chocam-se com outros elétrons da estrutura do silício fornecendo-lhes energia e transformando-os em condutores. Devido ao campo elétrico gerado pela junção pn, os elétrons são orientados e fluem da camada p para a camada n.

Através de um condutor externo, ligando a camada negativa à positiva, gera-se corrente elétrica e enquanto a luz do sol incidir na célula, este curso irá se manter. A intensidade da corrente virá na mesma proporção conforme a intensidade da luz incidente. Por causa disto a energia fotovoltaica pode ser considerada inesgotável,

pois produz energia elétrica em resposta à energia luminosa incidente no dispositivo fotovoltaico.

Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico é necessário ter conhecimento de alguns fatores, como: tensão nominal sistema, potência exigida pela carga, horas de utilização da carga para definir em kWh a energia exigida em um dia pela carga, localização geográfica necessária para definir o ângulo de inclinação de painéis e índice de radiação do mesmo. O cálculo de estimativa de energia gerada pelo sistema fotovoltaico é dado conforme a equação 23.

$$W_{arranjo} (kWh) = HSP \times P_{MAX_{painel}} \times N \quad (23)$$

Onde:

P → Potência máxima do painel escolhido [kW];

HSP → Horas de sol pleno por dia [h];

N → Número de painéis;

W → A energia gerada pelo arranjo [kWh].

As horas de sol pleno (HSP) representam o número médio diário de horas em que o Sol brilharia em sua potência máxima convencional, que é de 1 kW/m². Em Dourados – MS onde a radiação solar média anual é de 4,90 kWh/m².dia as HSP são iguais a 4,9 horas. Esse dado é encontrado no site do CRESESB (2018) que apresenta os índices de radiação solar de todo o território brasileiro baseados no Atlas Brasileiro de Energia Solar.

Os painéis podem ser ligados em série ou paralelo, no caso de serem ligados em série a tensão nominal do sistema é definida pela soma das tensões de cada um dos painéis e em paralelo a tensão do sistema é a mesma dos painéis.

De acordo com Pinho e Galdino (2014, p.50), as principais tecnologias de fabricação dessas células podem ser divididas em três gerações. A primeira geração inclui as cadeias produtivas do silício monocristalino (m-Si) e do silício policristalino (p-Si). Os dois juntos representam a melhor eficiência comercialmente disponível e são tecnologias presentes em 85% do mercado mundial.

- **Célula Solar de Silício Monocristalino**

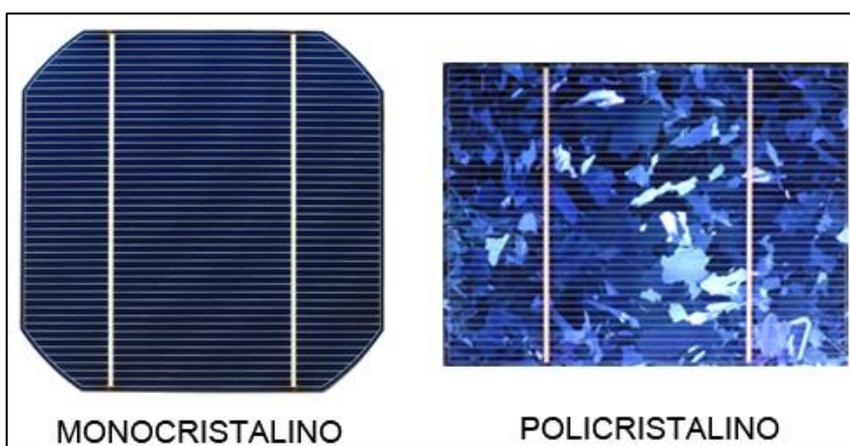
São fabricados a partir da extração de um único cristal de silício ultrapuro, (lingotes de silício de forma cilíndrica), este por sua vez é fatiado fazendo assim lâminas de silício individuais, que são então tratadas e transformadas em células fotovoltaicas. O painel solar é composto por uma matriz de células fotovoltaicas em formações de série e paralelo. Possui uma eficiência de 14 a 22% (PORTAL SOLAR, 2018).

- **Célula Solar de Silício policristalino**

No policristalino, os cristais de silício são fundidos em um bloco, desta forma, preservando a formação de múltiplos. Quando este bloco é cortado e fatiado, é possível observar esta formação múltipla de cristais. Logo que fundidos, eles são serrados em blocos quadrados e fatiados em células assim como no monocristalino, porém, com um pouco mais de facilidade em sua produção. Ele é semelhante aos monocristalino tanto no desempenho quanto no tempo de degradação, exceto pelas células possuírem uma eficiência de 13 a 18% (PORTAL SOLAR, 2018).

A segunda geração é caracterizada pelos filmes finos, os quais podem ser produzidos com silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). Possuem uma menor participação no mercado, pelo fato de possuírem menor eficiência que a primeira, problemas de vida útil, disponibilidade de materiais e, no caso do cádmio, toxicidade. A Figura 10 apresenta as células fotovoltaicas mais utilizadas fabricadas com silício monocristalino e policristalino.

Figura 10 – Células de silício Monocristalino e Policristalino



Fonte: Portal Solar (2017) (adaptado)

- **Célula Solar de Silício Amorfo (a-Si)**

Como a geração de energia elétrica desta célula fotovoltaica é baixa, primeiramente seu emprego servia apenas para aplicações de escalas pequenas, como por exemplo, em calculadoras. Contudo, recentes inovações permitiram que esta tecnologia seja utilizada também em aplicações de larga escala.

Através de uma técnica de fabricação chamada de "empilhamento", várias camadas de células solares de silício amorfo podem ser combinadas, o que resultam em taxas mais elevadas de eficiência, tipicamente apresentando eficiência de 6 a 9%. O empecilho deste processo é que o mesmo se apresenta economicamente caro (PORTAL SOLAR, 2017).

- **Célula Solar de Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio (CIGS)**

As células solares de Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio mostraram o maior potencial em termos de eficiência, contêm menos quantidades do cádmio (material tóxico que é encontrado em células solares de CdTe) e seus índices de eficiência normalmente operam na faixa de 10 a 12%. Diferentemente do silício amorfo, as células de CIGS não sofrem degradação sob a ação da luz. Mas é necessário um selamento robusto, para evitar a degradação do óxido de zinco, o que inutilizaria o módulo. Infelizmente o índio por ser um material raro, altamente requisitado pela indústria de smartphones (principal componente das telas táteis (touchscreen), faz com o que o seu custo não se encontre tão a baixo quanto o do silício (PORTAL SOLAR, 2017).

- **Célula Solar de Telureto de Cádmio (CdTe)**

Assim como as células de CIGS, as células de CdTe não se degradam sob a ação da luz. Telureto de cádmio é a única tecnologia de painéis solares de película fina que superou o custo/eficiência de painéis solares de silício cristalino em uma parcela significativa do mercado mundial de painéis solares. As células fotovoltaicas de CdTe são fabricadas em um substrato de vidro, com uma camada de condutor transparente como contato frontal, onde geralmente é utilizado o óxido de estanho e índio (OTI). A principal dificuldade para a fabricação de módulos fotovoltaicos é a toxicidade do cádmio que é tóxico somente durante o processo de fabricação, o que exige procedimentos rigorosos de controle (PORTAL SOLAR, 2017).

A terceira geração ainda se encontra em fase de pesquisa e testes e é caracterizada pelas células fotovoltaica multijunção e célula fotovoltaica para concentração (CPV – *Concentrated Photovoltaics*), células sensibilizadas por corante (DSSC – *Dye-Sensitized Solar Cell*) e células orgânicas ou poliméricas (OPV – *Organic Photovoltaics*). Embora possua custo mais elevado, demonstra uma eficiência superior comparada às anteriores.

2.4.2 Inversor

O inversor solar é um equipamento eletrônico que converte a corrente elétrica contínua (CC) em alternada (CA) no sistema fotovoltaico. É praticamente um adaptador de energia para o sistema fotovoltaico, também garante a segurança de todo o sistema, e é responsável pela otimização de energia produzida.

O processo de inversão energética consiste em prover, logo na saída do inversor, uma tensão ou corrente alternada. Para isso utiliza-se uma corrente ou tensão contínua para alimentar essa saída. No meio do processo, o aparelho conta com interruptores ou chaves eletrônicas, que podem ser transistores do tipo IGBT (Transistor Bipolar de Porta Isolada), IGCT (Portão Integrado Controlado) ou MOSFET (Transistor de efeito de Campo Metal — óxido — semiconductor) (SOLAR VOLT, 2014).

2.4.3 Medidor bidirecional e monitoramento

O medidor bidirecional é o responsável por contabilizar a quantidade de energia elétrica consumida pela residência, e a quantidade de energia injetada na rede da concessionária. Quando o sistema fotovoltaico produz energia excedente, além do necessário, o ponteiro literalmente gira no sentido inverso (por isso o conceito de leitura bidirecional), desta forma, é calculado o desconto na conta de luz, subtraindo-se a energia consumida da injetada.

De acordo com a resolução 482/2015, a instalação pode contar com um medidor bidirecional ou dois medidores unidirecionais (um para aferir a energia elétrica ativa consumida e outro para a gerada) (PORTAL SOLSTÍCIO ENERGIA, 2016). Depois de instalada a medição, a distribuidora é quem fica responsável por sua operação e manutenção, incluindo os custos que isso possa envolver.

Já o sistema de monitoramento é um sistema eletrônico de comunicação que permite o monitoramento remoto e o acompanhamento em tempo real do sistema fotovoltaico a qualquer hora do dia. Através dele é possível identificar eventuais

problemas que existam no sistema, permitindo assim, ações preventivas e reparos imediatos.

Os dados são captados pelo inversor de frequência e enviados via *wi-fi* em tempo real para o site do fabricante do inversor ou também para aplicativos de smartphones. Através de uma senha cadastrada, o usuário poderá acompanhar as informações do seu sistema como geração em kWh, economia gerada e rendimento (ENEL SOLUÇÕES, 2016).

2.4. ENERGIA EÓLICA

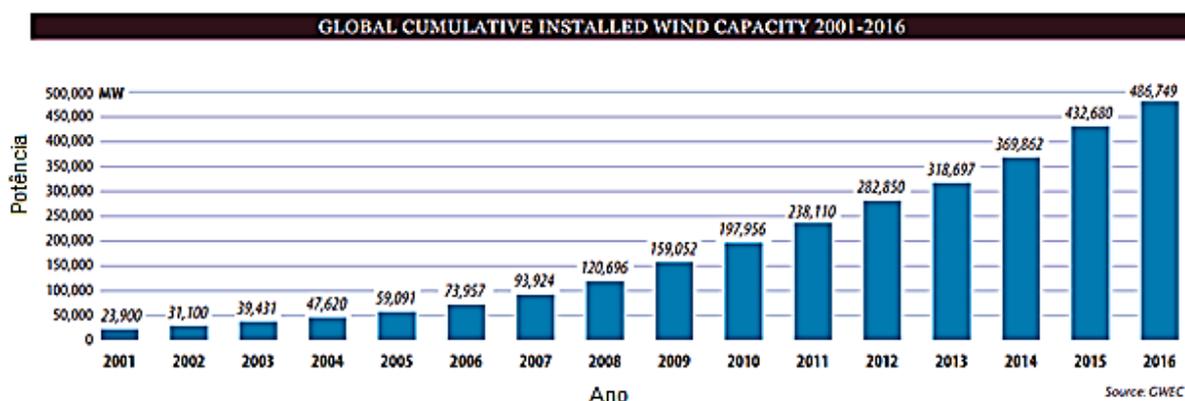
A utilização do vento para a geração de energia elétrica através de aerogeradores teve seu início a partir do século XIX na Dinamarca e nos Estados Unidos, mas foi principalmente entre a década de 1980 e 1990 que a instalação de aerogeradores despontou como uma fonte alternativa de energia, chegando a aproximadamente 1,8 GW de potência instalada nos Estados Unidos, devido ao incentivo proporcionado pelo governo norte-americano (TESTER *et al.* 1997).

Já no final da década de 1990, o mercado para esta fonte renovável de geração de energia se diversificou, tornando-se uma fonte relevante de contribuição para matriz energética de muitos países não só da Europa, surgindo fabricantes e instalações em países como China, Índia e alguns países da América do Sul.

Embora o crescimento do uso da geração eólica fez-se de maneira expressiva em vários países por meio de políticas de incentivos e promoções para a adoção de fontes renováveis de energia em suas matrizes energéticas, a geração de eletricidade através da força dos ventos correspondeu à apenas 3% de toda a potência instalada no planeta no ano de 2014, com um pouco mais de 369 GW (*Global Wind Energy Council*, 2015).

Em 2016, houve um aumento significativo em relação a 2014 em termos globais, em que se passou a ter mais de 486 GW de potência instalada mundialmente alavancada, principalmente, pela crescente produção chinesa que, em único ano, instalou parques com capacidade total superior a 30 GW de potência, como mostra a Figura 11 (*Global Wind Energy Council*, 2017).

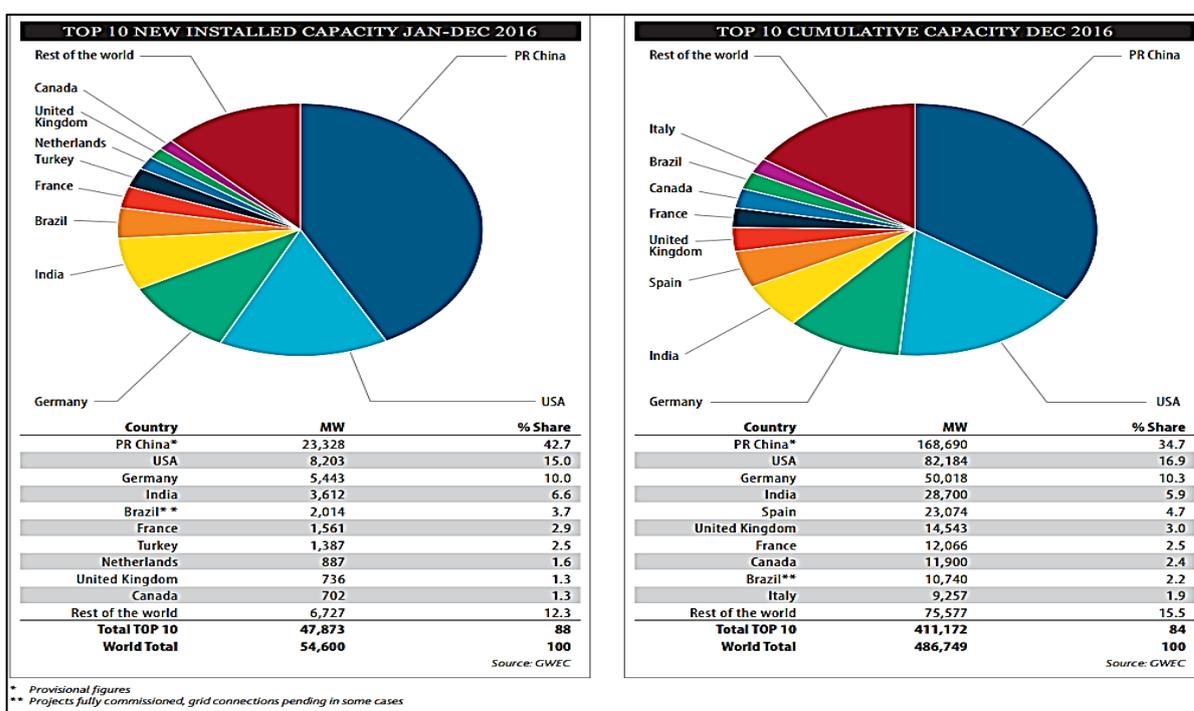
Figura 11 – Potência Eólica Instalada Cumulativa Global entre 2001 e 2016.



Fonte: Adaptado de *Global Wind Energy Council* (2017).

Nesse cenário de ascensão de utilização de fontes renováveis para a composição do potencial energético, o Brasil tem ganhado destaque entre os países que adotam a geração eólica como integrante de suas matrizes energéticas, com um acréscimo de potência eólica de 33 % em 2016, compondo o grupo dos dez países com maior capacidade produtiva quando trata-se da geração através dos ventos; como indica a Figura 12 (MME, 2017).

Figura 12 – As 10 Maiores Potências Eólicas Instaladas.



Fonte: *Global Wind Energy Council* (2017).

Com o total de 413 usinas e uma capacidade instalada superior a 10 GW de

potência, o Brasil consegue suprir cerca de 7 % de toda sua demanda de eletricidade apenas utilizando a geração eólica para tal. A maior contribuição para o sistema é proveniente dos parques eólicos localizados nos estados do Nordeste: Bahia (17,3 %), Ceará (15,2 %) e Rio Grande do Norte (32,7 %); e no estado do Rio Grande do Sul (16 %), com uma correspondência desses quatro estados de 81,1 % de toda a capacidade instalada nacional, concentrando as maiores usinas brasileiras em seus territórios, como apresentam a Tabela 2 e Tabela 3 (MME, 2017).

Tabela 2 - Capacidade Instalada de Geração Nacional.

Fonte	Nº Usinas ¹	Capacidade instalada (CI) (MW)	Geração Distribuída (MW)	Total (MW)	Estrutura %	Acréscimo N-(N-1) (MW)
Hidrelétrica	1.259	96.925	5	96.930	64,5	5.278
UHE	220	91.499		91.499	60,9	5.133
PCH	453	4.941		4.941	3,3	55
CGH	586	484	5	490	0,3	90
Gás Natural	156	12.965		12.965	8,6	537
Biomassa	504	14.001		14.001	9,3	744
Dos quais bagaço	399	10.903		10.903	7,3	371
Óleo (fóssil)	2.220	8.877		8.877	5,9	307
Dos quais OC	41	4.057		4.057	2,7	-84
Carvão Mineral	13	3.389		3.389	2,3	0
Nuclear	2	1.990		1.990	1,3	0
Gás Industrial ²	37	1.925		1.925	1,3	237
Eólica	413	10.124	5	10.129	6,7	2.495
Biogás	29	119		119	0,1	40
Solar	44	24	61	84	0,02	52
Desconhecidas	30	150	12	162	0,10	5
TOTAL	4.707	150.338	83	150.421	100,0	9.545
Importação contratada				5.850		
Disponibilidade total				156.271		

¹ Exclui GD (8.840), ² Inclui gás de refinaria, de alto forno, de coqueria, de aciaria e de enxofre

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2017).

Tabela 3 – As 10 Maiores Usinas Eólicas Brasileiras.

Nº	Nome	Capacidade (MW)	UF	Operação inicial e plena	Fator capacidade
1	Praia Formosa	105	CE	2009	0,29
2	Alegria II	101	RN	2011	0,31
3	Parque Eólico Elebrás Cidreira 1	70	RS	2011	0,36
4	Miassaba 3	68	RN	2014	0,31
5	Rei dos Ventos 3	60	RN	2014	0,34
6	Rei dos Ventos 1	58	CE	2014	0,35
7	Canoa Quebrada	57	RN	2010	0,42
8	Eólica Icaraizinho	55	CE	2009	0,43
9	Alegria I	51	RN	2010	0,34
10	Parque Eólico de Osório	50	RS	2006	0,28
	Outras	9.449	-	-	-
	Brasil	10.124	-	-	0,41

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2017).

Sabendo-se que para os próximos dois anos houve uma contratação de mais de 4 GW de potência apenas na geração eólica, evidenciada pela e, analisando a configuração do cenário brasileiro e internacional para a adoção de fontes alternativas de energia, percebe-se que a modalidade de geração provenientes de recursos eólicos vem ganhando notoriedade para a composição de uma matriz energética nacional sólida e confiável.

Tabela 4 – Expansão Contratada da Capacidade Instalada em MW.

Fonte	2017	2018	2019
Hidráulica	3.133	4.235	2.747
Eólica	1.195	2.821	1.434
Solar	256	1.581	210
Outras	654	8	340
Total	5.238	8.645	4.731

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2017).

Portanto, embasados nesta premissa, da vasta disponibilidade de recursos eólicos para a manutenção e elevação da capacidade produtiva energética no país, busca-se aliar aos dados apresentados a motivação para o emprego desta fonte alternativa de energia em ambientes com pouca densidade demográfica, para um melhor aproveitamento desses recursos. Para tal, o estudo das características dos ventos e das localidades são de fundamental importância para a implementação de projetos de parques eólicos.

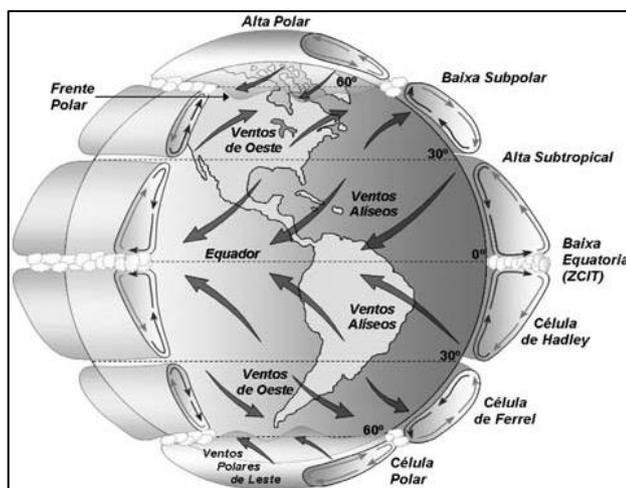
Posto isso, dar-se-á prosseguimento ao trabalho com a exposição dos princípios essenciais das características do elemento motriz analisado: o vento.

2.4.1. O Vento

Resultantes da circulação do ar na atmosfera terrestre devido ao movimento rotacional da Terra, ao aquecimento de massas de ar provocado pela irradiação solar, entre outros eventos físicos (como a força de Coriolis), os ventos possuem apenas uma fração capaz de ser aproveitada, sobre a superfície terrestre, para a exploração e geração de eletricidade.

Através de sua origem de formação, os ventos distinguem-se por suas características próprias com especificidades de temperatura e intensidade de acordo com sua região de formação. Como mostra a Figura 13, o Brasil é acometido em quase sua totalidade pelos ventos Alísios que convergem para a Linha do Equador.

Figura 13 – Circulação Global dos Ventos.



Fonte: Martins *et al.* (2008).

Sabendo-se que a velocidade do vento aumenta conforme a altura, seguindo a Equação 1, denomina-se Perfil Vertical do Vento esse fenômeno característico.

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^n \quad [m/s] \quad (1)$$

Onde v_2 e v_1 são, respectivamente, as velocidades do vento determinadas em uma altura h_2 e h_1 , e n o Coeficiente de Hellmann, parâmetro dependente da rugosidade do terreno, usualmente adotado como 0,14 para atmosferas estáveis (Rohatgi e Nelson, 1994). Através da Equação 1 e da adoção de $n = 0,14$, alguns valores de padrões mundiais registraram-se para as velocidades dos ventos a determinadas alturas do solo, como mostra a Figura 14.

Figura 14 – Velocidade do Vento a Alturas Diversas.

Altura [m]	Velocidade do Vento [m/s]
50	12.6
40	12.2
30	11.7
20	11
10	10
5	8.8
0	

Fonte: Adaptado de Rohatgi e Nelson (1994).

A fim de se identificar o potencial eólico de uma determinada área para a elaboração de um projeto de geração, a análise e o estudo de dados obtidos através de estações meteorológicas e de atlas eólicos de uma região tem grande importância para o desenvolvimento de projetos de sistemas eólicos, inclusive para se dispor de uma pré análise sobre a viabilidade econômica do empreendimento.

Além da avaliação dos dados obtidos por atlas e estações meteorológicas, a identificação de certas características topográficas do terreno e de fatores bióticos por especialistas pode corroborar para especificar áreas com maiores probabilidades de incidência de ventos de altas velocidades, tendo em vista que este elemento é capaz de causar impactos significantes no ambiente como, por exemplo, na formação de dunas e na curvatura e inclinação da vegetação local (MME, 2017).

Em complemento a essas características para a análise da incidência de ventos de uma região pode-se utilizar a Escala Anemométrica Internacional de Beaufort apresentada na Tabela 5.

Essa escala classifica indicações visuais na superfície terrestre de acordo com a faixa de velocidade do vento incidente, podendo-se ter uma breve estimativa dessa velocidade por meio das consequências observadas.

Tabela 5 – Escala Anemométrica Internacional de Beaufort.

Escala Anemométrica Internacional de Beaufort				
Número na Escala	Nomenclatura	Velocidade [m/s]	Velocidade [km/h]	Indicações Visuais
00	Calmaria	0,0 – 0,2	< 1	Fumaça sobe verticalmente
01	Aragem	0,3 – 1,5	1 – 5	Desvio de fumaça
02	Brisa Leve	1,6 – 3,3	6 – 11	Ventos sentidos no rosto. Cataventos movimentam-se
03	Brisa Suave	3,4 – 5,4	12 – 19	Bandeiras agitam-se; folhas e galhos agitam-se
04	Brisa Moderada	5,5 – 7,9	20 – 28	Poeira e papéis soltos elevam-se
05	Brisa Forte	8,0 – 10,7	29 – 38	Árvores pequenas e folhagens oscilam; formam-se ondas com cristas em lagos
06	Vento Brando	10,8 – 13,8	39 – 49	Galhos grandes agitam-se; dificuldade no uso de guarda-chuvas
07	Vento Forte	13,9 – 17,1	50 – 61	Dificuldade de caminhar contra o vento
08	Ventania	17,2 – 20,7	62 – 74	Galhos de árvores são quebrados; impossibilidade de caminhar
09	Ventania Forte	20,8 – 24,4	75 – 88	Arrancamento de telhados e coberturas
10	Tempestade	24,5 – 28,4	89 – 102	Árvores são derrubadas; danos consideráveis em edificações
11	Tempestade Violenta	28,5 – 32,6	103 – 117	Danos generalizados
12	Furacão	> 32,7	> 118	Devastação

Fonte: Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura - CEPAGRI.

Além da análise da velocidade do vento na localidade, outros fatores componentes desse elemento devem ser considerados para um estudo mais

detalhado sobre a viabilidade de geração eólica.

Uma dessas propriedades é a densidade volumétrica do ar, a qual é definida pela Equação 2.

$$\rho = \frac{P_a}{R_{ar} \cdot T} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (2)$$

Onde:

R_{ar} → Constante Universal dos Gases para o Ar = 287,053 $[\frac{J}{kg} \cdot K]$;

P_a → Pressão Atmosférica $[N/m^2]$;

T → Temperatura Ambiente $[K]$.

A densidade volumétrica do ar é de extrema importância, pois é através da sua determinação que se calcula a potência eólica capaz de ser aproveitada por um gerador.

Sabendo-se que a fonte de energia utilizada para a geração de eletricidade provém da energia cinética do vento expressa pela Equação 3, que a vazão corresponde a variação do volume de um fluido que desloca-se a uma certa velocidade por uma geometria cilíndrica é dada pela Equação 4, e que, em regime permanente e incompressível, o fluxo de massa pode ser expresso pela Equação 5, pode-se reescrever a equação da energia cinética em função da vazão e da variação de massa conforme explicita a Equação 6.

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \text{ [J]} \quad (3)$$

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{d[A \cdot D]}{dt} = \frac{d[A \cdot v \cdot t]}{dt} = A \cdot v \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (4)$$

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot v \text{ [kg/s]} \quad (5)$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot A \cdot v \cdot t) \cdot v^2 \text{ [J]} \quad (6)$$

Onde:

m → Massa do ar $[kg]$;

D → Comprimento da geometria cilíndrica $[m]$;

A → Área da geometria cilíndrica $[m^2]$;

$v \rightarrow$ Velocidade do vento [m/s];

$\rho \rightarrow$ Massa específica do ar [kg/m^3].

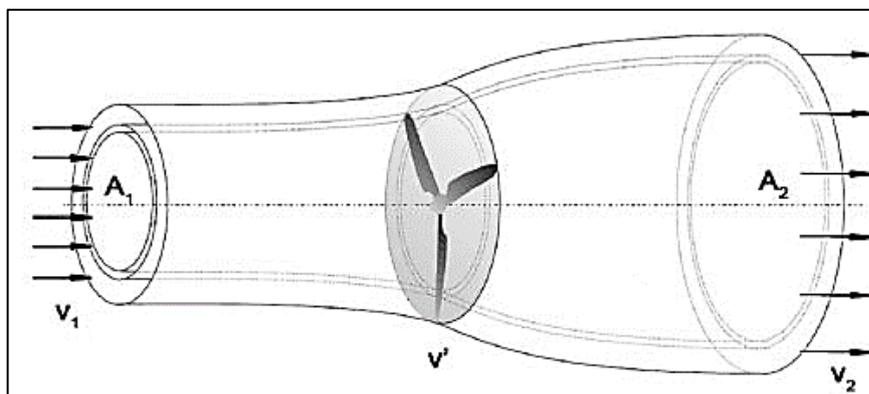
A partir da Equação 6, a potência eólica produzida pelo vento expressa pela variação da energia no tempo é definida pela Equação 7.

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{d\left[\frac{1}{2}(\rho \cdot A \cdot v \cdot t) \cdot v^2\right]}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad [W] \quad (7)$$

Vê-se uma grande dependência da energia proveniente do vento com a velocidade que este elemento é capaz de circular entre as pás do gerador. Considerando uma duplicação da velocidade, o efeito acarreta uma elevação de oito vezes a energia originária capaz de ser convertida (Picolo *et al.*, 2014).

Embora haja essa dependência, a potência total produzida pelo vento não pode ser totalmente aproveitada para a conversão em energia elétrica. Conforme a equação de continuidade de Bernoulli e do efeito de dispersão do ar ao passar pelo rotor do gerador, forma-se um tubo circular de corrente representado pela Figura 15 (Schumann, 2014).

Figura 15 – Circulação da corrente de ar pelas pás do gerador.



Fonte: Picolo, Bühler e Rampinelli (2014).

Como a vazão de um fluido permanece constante ao longo desse deslocamento, tem-se que, ao converter a energia cinética do vento, a turbina eólica reduzirá a velocidade deste na saída do rotor, o que resulta no aumento do diâmetro do tubo de vazão, representado pela figura acima (Schumann, 2014).

Dessa forma, a potência passível de ser convertida para geração de eletricidade corresponde à diferença do fluxo de ar antes e depois de sua passagem

pelas pás do gerador, descrita pela Equação 8.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_1 \cdot v_1^3 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_2 \cdot v_2^3 \quad [W] \quad (8)$$

Em que:

$\rho \rightarrow$ Massa específica do ar [kg/m^3];

$A_1 \rightarrow$ Área do tubo de vazão antes do rotor [m^2];

$v_1 \rightarrow$ Velocidade do vento antes do rotor [m/s];

$A_2 \rightarrow$ Área do tubo de vazão depois do rotor [m^2];

$v_2 \rightarrow$ Velocidade do vento depois do rotor [m/s].

Retomando-se a premissa de escoamento em regime permanente e incompressível feito pelo ar, de acordo com a equação de continuidade de Bernoulli, tem-se a Equação 9 (Picolo *et al.*, 2014).

$$\rho \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho \cdot A' \cdot v' = \rho \cdot A_2 \cdot v_2 \quad (9)$$

Onde:

$\rho \rightarrow$ Massa específica do ar [kg/m^3];

$A' \rightarrow$ Área varrida pelas pás do rotor [m^2];

$v' \rightarrow$ Velocidade do vento [m/s].

Isolando-se a área do tubo após a passagem do vento pelo rotor e substituindo o resultado em (8), chega-se à Equação 10 em função da área varrida pela turbina do gerador.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_1 \cdot v_1 \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad [W] \quad (10)$$

Usando-se da igualdade apresentada em (9) e sabendo-se que a velocidade v' é a média aritmética das velocidades antes e depois da passagem pelo rotor, pode-se escrever a equação de potência de um gerador eólico através de (12).

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A' \cdot \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad [W] \quad (11)$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A' \cdot v_1^3 \cdot \left\{ \frac{\left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right]}{2} \right\} [W] \quad (12)$$

Na equação 11, o termo entre chaves é denominado Coeficiente de Betz, e assume o valor máximo quando a relação $\frac{v_2}{v_1}$ é igual a $\frac{1}{3}$, fazendo com que todo o termo citado se resuma em $\frac{16}{27}$ ou no valor de 0,593. Dessa forma, a máxima potência eólica capaz de ser convertida em energia elétrica é expressa por:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A' \cdot v_1^3 \cdot \left(\frac{16}{27}\right) [W] \quad (13)$$

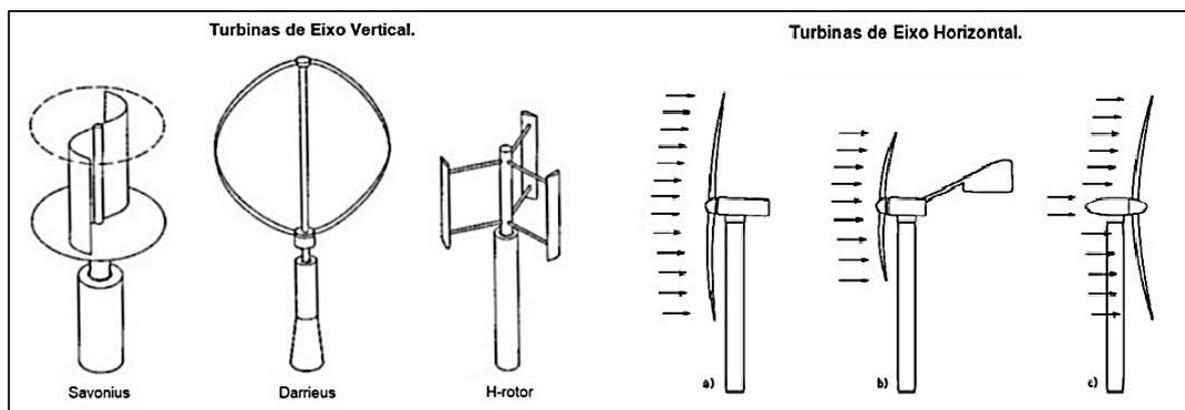
2.4.2. Geradores

Dada a expressão da potência eólica máxima (equação 13), a possibilidade de aproveitamento de toda essa capacidade é totalmente dependente das características intrínsecas do gerador escolhido e da velocidade do vento no local de instalação desse gerador.

Sabe-se que a geração de energia elétrica por geradores eólicos ocorre em dois processos distintos: converte-se, inicialmente, a energia cinética do vento em energia mecânica através da rotação do rotor e, posteriormente, a energia mecânica é transformada em elétrica pela conexão de um gerador elétrico na saída do eixo do rotor (PICOLO *et al.*, 2014).

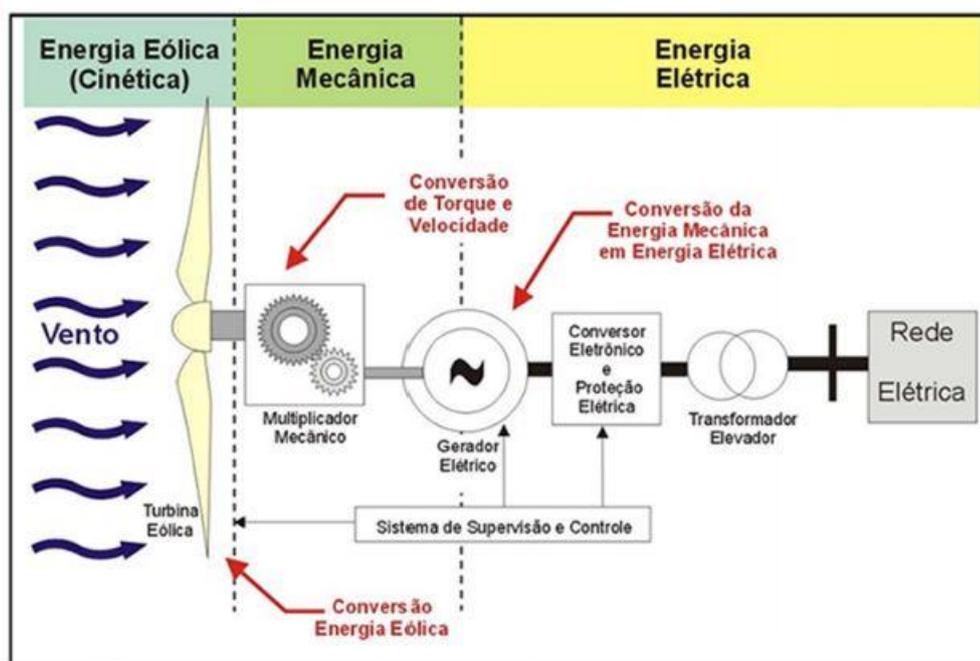
Embora podendo ser classificados como de eixo horizontal ou vertical, como mostra a Figura 16, os geradores eólicos têm princípios de funcionamento semelhantes. Através da movimentação do rotor ocasionada pela passagem do vento por suas pás, uma caixa multiplicadora é ativada que eleva a frequência de rotação do eixo, o qual é conectado a um gerador elétrico e transfere essa velocidade para a produção de eletricidade, como indica a Figura 17. Porém há preferência por turbinas de eixo horizontal devido aos esforços mecânicos que são inferiores aos de eixo vertical (MÜLLER, 2015).

Figura 16 – Tipos de Turbinas Eólicas.



Fonte: Adaptado de Beller (2009).

Figura 17 – Conversão de Energia em Geradores Eólicos.



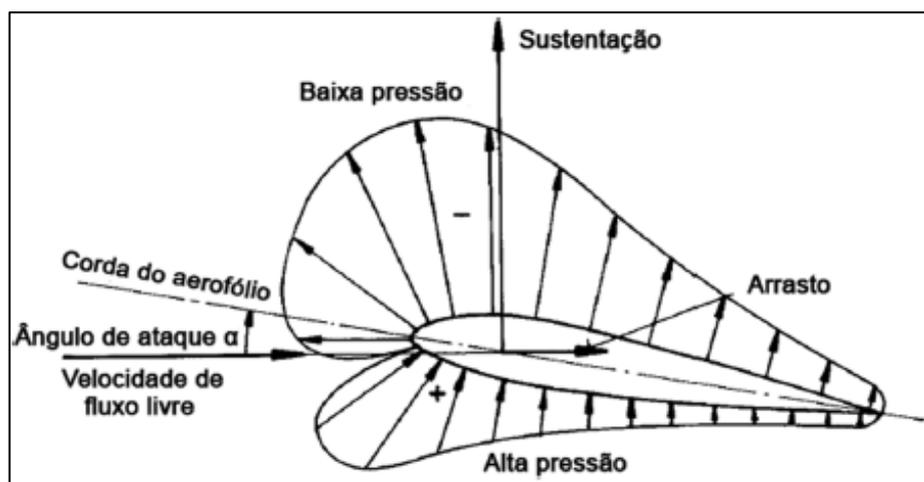
Fonte: Picolo, Bühler e Rampinelli (2014).

A fim de que haja o maior aproveitamento de toda a potência passível de ser extraída da energia eólica, as pás do rotor da maioria dos aerogeradores de eixo horizontal de grande porte possuem um sistema de controle de posicionamento de modo a buscar a contraposição das pás à direção incidente do vento, formando-se ângulos entre os vetores resultantes e o plano da pá do aerogerador, denominados de ângulos de ataque e ângulos de passo.

Para a compreensão de como os ventos atuam sobre as pás de um rotor eólico de eixo horizontal, faz-se uso da teoria de aerofólios estacionários aplicada a uma de suas pás. A passagem do vento a uma dada velocidade sobre a pá do aerogerador

faz com que uma força atue sobre esta pá, de forma que sua decomposição possa ser feita em duas componentes: Uma paralela em relação à direção do vento incidente, denominada força de arrasto (F_x); e outra perpendicular às linhas de fluxo de vento, denominada de força de sustentação (F_y), como demonstra a Figura 18, formando assim, regiões com baixas ou altas pressões sobre o perfil da pá do aerogerador.

Figura 18 – Forças aerodinâmicas sobre um aerofólio.



Fonte: Picolo, Bühler e Rampinelli (2014).

A força de sustentação pode ser explicada considerando-se a diferença de velocidade do vento nas duas faces da pá, formando-se diferentes zonas de pressão sobre o aerofólio, de modo a gerar uma resultante perpendicular à direção de seu movimento. Considerando-se que o vento, ao chocar-se contra a pá do rotor, divide-se e percorre tanto a face superior quanto a inferior do aerofólio, devido à curvatura da pá tem-se que o trajeto percorrido na parte superior é maior do que na parte oposta. Desse modo, a velocidade do vento na face superior é maior do que na face inferior, o que gera a diferença de pressão e, conseqüentemente, a força de sustentação na pá. A sustentação de um perfil de asa varia conforme a variação no ângulo de ataque do vento e sua velocidade, pois quanto maior o ângulo de ataque, maior será a velocidade vertical do ar (PICOLO *et. al.*, 2014).

Já a força de arrasto é caracterizada como a força a qual um corpo sólido fica sujeito quando há variação de velocidade de um fluido ao longo de seu trajeto enquanto percorre este corpo, que se opõe ao seu movimento, provocada pela tensão de cisalhamento em sua superfície. Observando a Figura 15, é possível notar que a

pá do rotor fica sujeita a uma pressão menor em sua parte traseira, do que na parte dianteira. Justamente essa diferença de pressão acarreta uma força resultante sobre a pá orientada na direção do escoamento de ar (PICOLO *et. al.*, 2014).

Essas duas forças acima mencionadas que atuam sobre a pá do rotor, e sua respectiva resultante são descritas através das equações 14 para a força de sustentação e por (15), para a de arrasto.

$$F_y = F \cdot \cos(\alpha) = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_y \quad (14)$$

$$F_x = F \cdot \sin(\alpha) = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_x \quad (15)$$

Onde:

$A \rightarrow$ Área de incidência do vento [m^2];

$v \rightarrow$ Velocidade do vento [m/s];

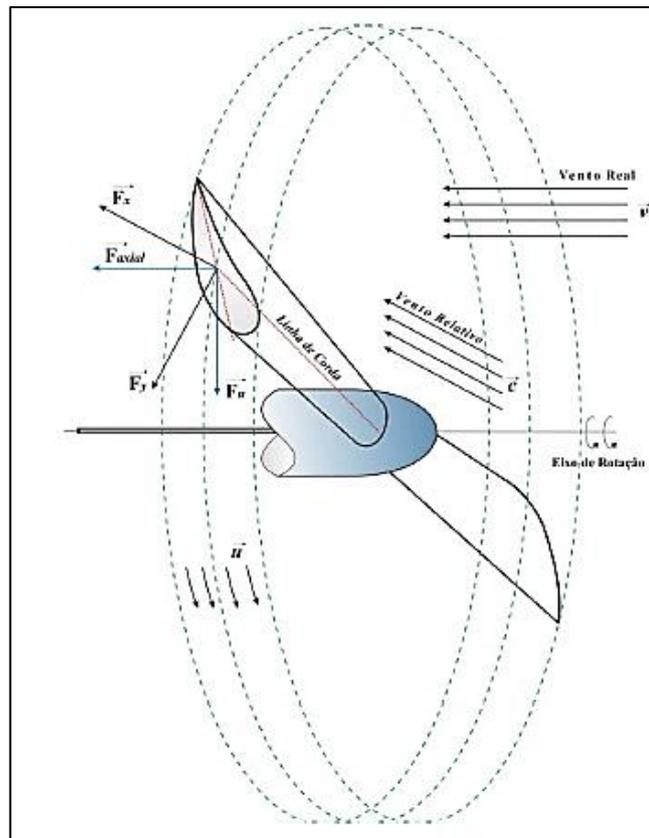
$\rho \rightarrow$ Massa específica do ar [kg/m^3];

$C_x \rightarrow$ Coeficiente de arrasto determinado experimentalmente;

$C_y \rightarrow$ Coeficiente de sustentação determinado experimentalmente.

Ainda em relação às forças atuantes em uma pá de aerogerador, quando esta encontra-se em movimento, adota-se o conceito de força útil (\vec{F}_u) e força axial (\vec{F}_a), que são as forças de sustentação e arrasto projetadas no plano de rotação do aerogerador, respectivamente, como mostra a Figura 19.

Figura 19 – Forças projetadas no plano de rotação.



Fonte: Tibola (2009).

Onde:

$u \rightarrow$ Velocidade de giro da pá $[\frac{m}{s}]$;

$v \rightarrow$ Velocidade do vento $[\frac{m}{s}]$;

$c \rightarrow$ Velocidade relativa do vento $[\frac{kg}{m^3}]$;

$F_x \rightarrow$ Força de arrasto $[N]$;

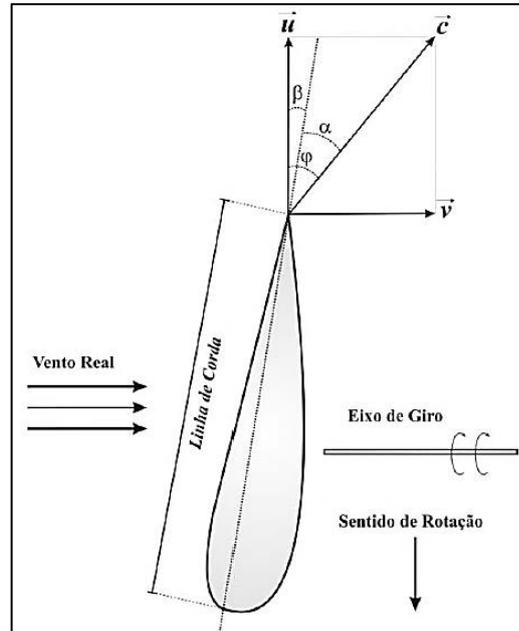
$F_y \rightarrow$ Força de sustentação $[N]$;

$F_a \rightarrow$ Força axial $[N]$;

$F_u \rightarrow$ Força útil $[N]$.

Com a projeção dessas duas forças, pode-se estipular o rendimento do gerador através da relação entre a força útil e a axial, considerando-se também a composição angular formada entre a direção de vento relativo e o plano de rotação do aerogerador, exemplificado pela Figura 20 (TIBOLA, 2009).

Figura 20 – Relação entre os ângulos na pá do rotor.



Fonte: Tibola (2009).

Sabendo-se que, no modo estacionário, a força de sustentação é dada por (14); e que a força de arrasto é descrita por (15), para o modo dinâmico as equações assumem as formas descritas por (16) e (17), respectivamente.

$$F_y = F \cdot \cos(\alpha) = \frac{1}{2} \rho A c^2 C_y [N] \quad (16)$$

$$F_x = F \cdot \sin(\alpha) = \frac{1}{2} \rho A c^2 C_x [N] \quad (17)$$

Para tal, tem-se que essas forças projetadas no plano de rotação do rotor, denominadas força útil e força axial, respectivamente, são descritas em (18) e (19).

$$F_u = F \cdot \frac{\sin(\varphi - \alpha)}{\sin^2(\varphi) \cdot \cos(\alpha)} \cdot \frac{1}{2} \rho A v^2 C_y [N] \quad (18)$$

$$F_a = F \cdot \frac{\cos(\varphi - \alpha)}{\sin^2(\varphi) \cdot \cos(\alpha)} \cdot \frac{1}{2} \rho A v^2 C_y [N] \quad (19)$$

A partir da decomposição das forças no plano de rotação do rotor, deduz-se o rendimento do aerogerador com as equações de (20) a (22):

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (20)$$

$$\eta = \frac{F_u \cdot u}{F_a \cdot v} \quad (21)$$

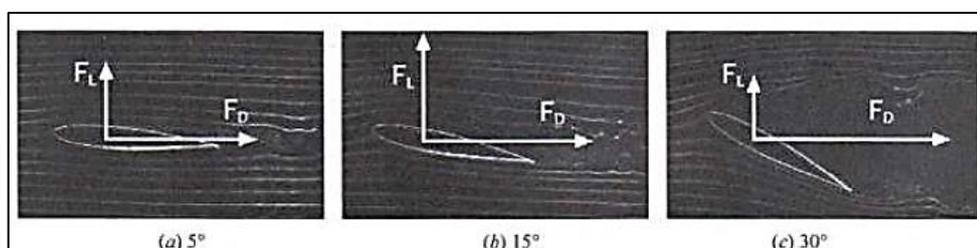
$$\eta = \operatorname{tg}(\varphi - \alpha) \cdot \frac{u}{v} \quad (22)$$

Para atingir-se os níveis de potência e rendimento máximos, o controle de velocidade de um aerogerador pode ser feito de duas maneiras distintas, denominadas “*pitch*” e estol. Este podendo ser passivo ou ativo (TIBOLA, 2009).

Através de um mecanismo capaz de rotacionar as pás do aerogerador em seu próprio eixo longitudinal, o sistema “*pitch*” de controle possibilita variar o ângulo de passo das pás (β) em relação ao vento, de modo a procurar sempre a melhor relação entre este ângulo e o ângulo de ataque para proporcionar a máxima potência sem que haja a necessidade de atuação de freios ou outros mecanismos de controle (MELO, 2012).

Já o controle por estol é destinado a turbinas com pás fixas. Através do efeito de estol que é a criação de turbulência do vento após a passagem pela pá do aerogerador, a força de sustentação sobre a pá diminui, o que limita a velocidade que o rotor pode atingir para não provocar danos ao gerador, como mostra a Figura 21 (TIBOLA, 2009).

Figura 21 – Sistema de controle tipo Estol.



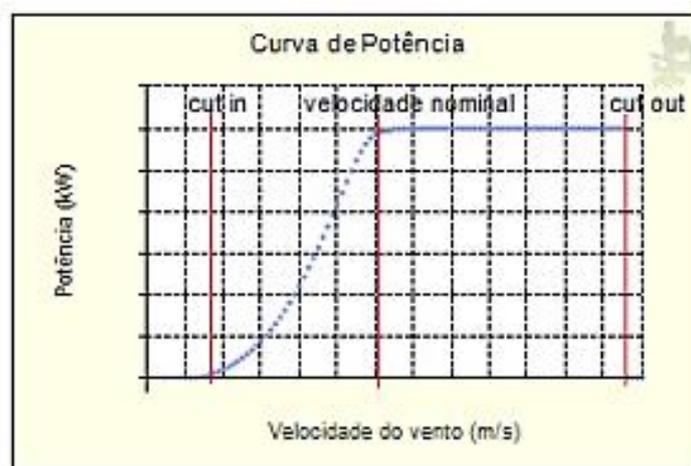
Fonte: Melo (2012).

No modo passivo desse sistema, as pás são projetadas de modo que, no momento em que uma velocidade máxima é ultrapassada, uma zona de turbulência seja criada e, através de uma ligeira torção longitudinal, diminui-se a sustentação sobre a pá. Já no modo ativo, dispositivos mecânicos fazem com que haja um giro sincronizado para limitar a velocidade de rotação imposta pela velocidade de vento nominal definida em projeto, movimentando as pás, modificando o ângulo de ataque (TIBOLA, 2009).

Também, é baseado nos tipos de controle de velocidade e nas características aerodinâmicas das pás do aerogerador previamente citadas que é traçada a curva de

potência, exibida pela Figura 22.

Figura 22 – Curva de potência de um aerogerador.



Fonte: Tolmasquim, Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2016).

Embora a qualquer velocidade de vento exista energia cinética, os geradores eólicos operam a partir de uma dada velocidade mínima para que haja aproveitamento da energia eólica para a geração de eletricidade, e deixam de operar a uma velocidade máxima para evitar danos à sua estrutura. Velocidades essas denominadas de velocidade de partida (ou “*cut-in*”), e velocidade de corte (“*cut-off*”), respectivamente.

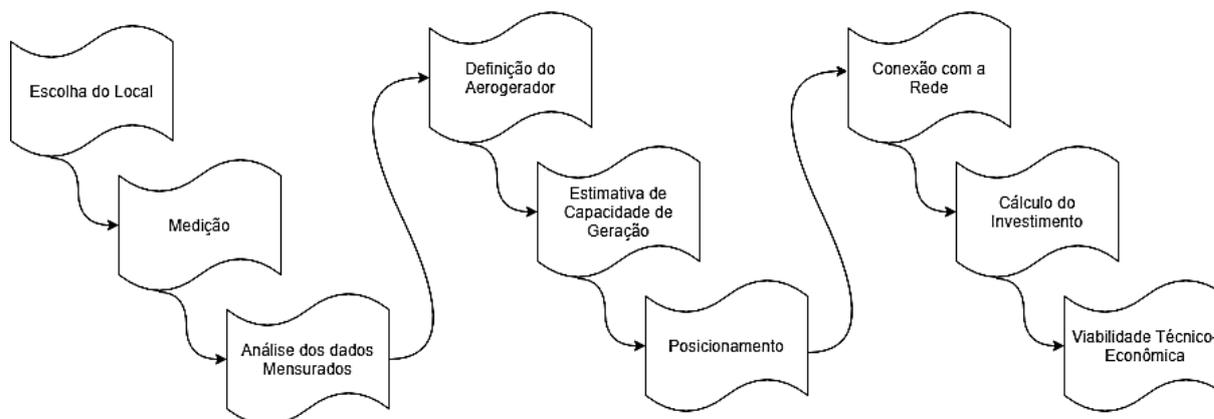
Dessa forma, o sistema de controle do gerador atua acionando o rotor quando a velocidade de partida é atingida, até chegar na velocidade nominal, onde o gerador opera em sua capacidade máxima de geração. Quando essa velocidade é ultrapassada, o sistema de controle desliga o gerador para evitar danos à máquina.

Uma vez decorrida toda a explanação teórica sobre a obtenção e utilização dos recursos eólicos para a produção de energia elétrica na matriz energética nacional, o escopo deste trabalho estipula a combinação da geração eólica à geração solar descrita na seção 2.4, retomando-se o tema de geração híbrida.

Com base nesses aspectos, os próximos passos para o estudo da viabilidade econômica e técnica seguirão por meio de análises de dados de índices de irradiação solar e de atlas eólico na localidade escolhida, tal como no emprego de cálculos para determinar a rentabilidade do empreendimento para o produtor rural, e a determinação dos melhores equipamentos a serem utilizados para corresponder à otimização do aproveitamento dos recursos solar e eólico para a geração de energia elétrica. A Figura 23 apresenta um fluxograma das etapas a serem seguidas para a execução de

um projeto de geração eólica.

Figura 23 – Fluxograma das etapas de um projeto de geração eólica



Fonte: Autoria própria (2018).

2.5 METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DE RETORNO DE INVESTIMENTO

Na engenharia econômica existem vários métodos para analisar investimentos, o Retorno Sobre o Investimento (ROI) e o *Payback* são formas simples de se calcular retornos financeiros, mas não muito efetivas pois não consideram a depreciação do dinheiro ao passar do tempo. Um método mais completo e muito utilizado para determinar a viabilidade econômica de um projeto de investimento é a Taxa Interna de Retorno (TIR), a taxa é medida em percentual e mostra a rentabilidade de um investimento comparado com aplicações financeiras. Para um projeto ser considerado exequível no ponto de vista econômico a TIR deve ser maior que a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), essa taxa representa o mínimo retorno financeiro em percentual que um investidor exige para aceitar um novo investimento. No Brasil é muito comum utilizar a taxa SELIC (Sistema Especial de Liquidação e Custódia), que é a taxa básica de juros da economia no país, como base para a TMA. A TIR está relacionada com outros conceitos da matemática financeira, como:

- Fluxo de Caixa (FC) – O fluxo de caixa apresenta os investimentos e retornos de um projeto. Se faz necessário definir um período de lançamento de valores no fluxo de caixa, geralmente são considerados intervalos de tempo mensais ou anuais. No caso de um projeto de microgeração híbrida os retornos são representados pela projeção da redução dos gastos com energia elétrica.

- Valor Presente Líquido (VPL) – O valor presente líquido é a somatória de um fluxo de caixa levando em consideração as taxas de juros e a depreciação do

dinheiro com o passar do tempo. Esse método permite trazer para a data presente os valores de fluxo de caixa previstos utilizando a TMA. O cálculo do VPL é realizado conforme a equação 24, onde N é a quantidade de períodos em que se deseja fazer o cálculo. O período depende dos lançamentos do fluxo de caixa, no caso de uma fatura de energia elétrica o período é de um mês. O fluxo de caixa no período zero é igual à soma dos investimentos iniciais (PUCCINI, 2011).

$$VPL = \sum_{n=0}^{n=N} \frac{FC_t}{(1+TMA)^n} \quad (24)$$

Quando a equação do VPL é igualada a zero ela resulta na TIR como mostra a equação 25.

$$0 = -\textit{investimento inicial} + \sum_{n=1}^{n=N} \frac{FC_t}{(1+ITR)^n} \quad (25)$$

Esse cálculo é complicado de ser realizado sem o auxílio de ferramentas computacionais pois resulta em polinômios de graus mais elevados. O *software* Excel possui uma fórmula pronta para o cálculo do TIR e será utilizado posteriormente neste trabalho. Pretende-se com a utilização desse método obter uma projeção do retorno financeiro esperado do projeto de geração híbrida (PUCCINI, 2011).

3. DETERMINAÇÃO DE FATORES NECESSÁRIOS PARA GERAÇÃO HÍBRIDA EM UMA GRANJA DE FRANGO DE CORTE

3.1 DESCRIÇÃO DO ESPAÇO FÍSICO DA GRANJA E ANÁLISE DO HISTÓRICO DE CONSUMO

A Granja está localizada a 10 km do centro de Dourados no Mato Grosso do Sul. Nela são criados aproximadamente 150 mil frangos por lote, estes ficam alojados em 4 galpões aviários. Os galpões têm 150 m de comprimento e 12 metros de largura, totalizando 7200 m² de área total construída. A Figura 24 apresenta uma foto de satélite da propriedade.

Figura 24 - Vista superior da granja



Fonte: Google Maps (2018).

Segundo o proprietário da granja cada ciclo de criação de frango dura aproximadamente 45 dias até o abate e após esse período é necessário realizar uma limpeza e desinfestação dos galpões para receber os novos frangos, essa etapa dura 15 dias. Todo esse processo tem uma duração média de 60 dias, totalizando 6 ciclos de criação de frango por ano.

A ventilação dos galpões é feita por um sistema de pressão negativa. Neste processo o ar é forçado para fora dos galpões por meio de exaustores, criando uma

diferença de pressão entre o ar interno e externo ao galpão (EMBRAPA, 2000). Os comedouros, bebedouros e o sistema de iluminação são automáticos. A instalação conta ainda com sistema de pesagem automática da ração que sai dos silos. A Figura 25 apresenta a vista lateral de um galpão, onde é possível observar dois silos junto ao mesmo.

Figura 25 - Vista Frontal da granja



Fonte: Autoria própria (2018).

A propriedade é eletrificada pela Cooperativa de Energização e Desenvolvimento Rural da Grande Dourados (CERGRAND), onde a tensão entre fases da instalação é 380 V. A cooperativa oferece uma tarifa especial para criadores de frango de corte no valor de R\$ 0,50197/kWh.

Para dar-se início aos cálculos dos componentes do sistema eólico-fotovoltaico do estudo de caso em questão, foram levantados por meio das faturas de energia elétrica, os valores de consumo mensal em kWh. A Tabela 6 apresenta a energia consumida mensalmente e o valor pago da fatura nos meses de setembro de 2017 a agosto de 2018.

Tabela 6 - Energia consumida mensalmente

Mês de Referência	kWh	Valor Pago
set/17	7.672	R\$ 4.176,84
out/17	9.067	R\$ 4.968,25
nov/17	8.945	R\$ 5.549,57
dez/17	5.852	R\$ 3.284,90
jan/18	11.620	R\$ 6.227,07
fev/18	11.180	R\$ 5.776,70
mar/18	6.469	R\$ 3.333,72
abr/18	8.153	R\$ 4.270,46
mai/18	9.687	R\$ 5.286,40
jun/18	7.132	R\$ 4.205,46
jul/18	8.771	R\$ 5.635,17
ago/18	8.231	R\$ 5.304,30

Fonte: Autoria própria (2018).

Como o intuito da proposta é reduzir os custos da granja com energia elétrica, a análise da viabilidade econômica se dará pelo consumo médio mensal dos últimos 12 meses observados nas faturas da unidade consumidora. Os parâmetros de entrada para a determinação da geração média anual prevista para o conjunto de módulos fotovoltaicos e do gerador eólico podem ser constatados diretamente nas faturas, somando-se os valores de consumo e dividindo-os pelo período de 12 meses. Assim foi obtido um consumo médio mensal aproximado de 8565 kWh e de 17130 kWh por lote de frango.

É válido lembrar que ao longo do tempo o perfil do consumidor pode mudar em decorrência do aumento ou diminuição do consumo médio mensal. Dependendo de diversos fatores, como modernização de equipamentos, ampliação das instalações e demandas do mercado de frangos de corte. O objetivo do proprietário é suprir até 80% do consumo médio mensal com o sistema de geração híbrida.

3.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

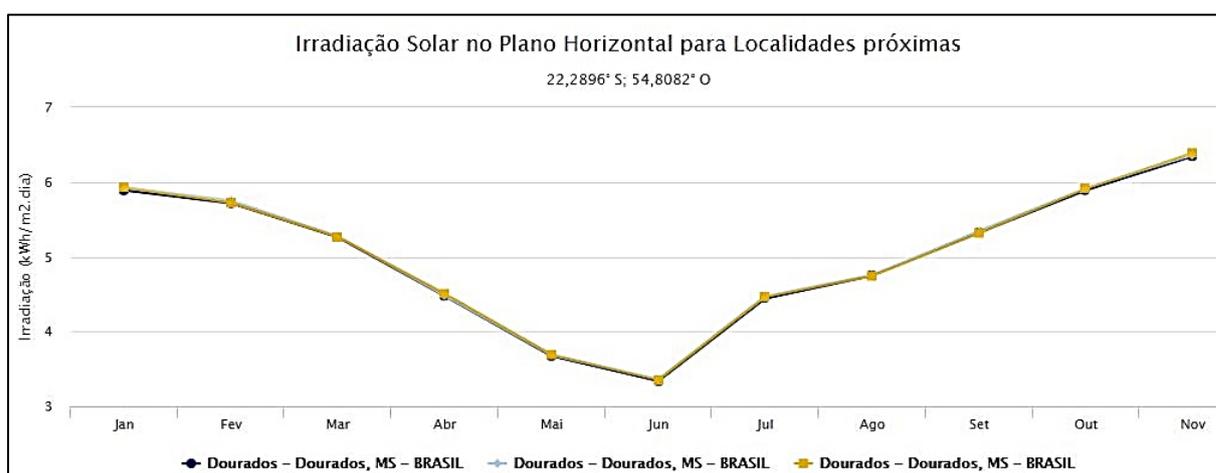
3.2.1 Irradiação solar média anual

A informação necessária para definir o número do conjunto de módulos de um sistema fotovoltaico é a irradiação solar do local (H_t), sendo sua unidade o kWh/m².

Com a utilização do programa *Google Earth* obtém-se a latitude e a longitude aproximada do local em questão, latitude: 22,2896° Sul e longitude: 54,8082° Oeste.

Inserindo os valores obtidos no sistema de dados *SunData v 3.0* (www.cresesb.cepel.br) são encontradas medições da irradiação em 3 localidades próximas à propriedade, gerando-se gráficos da irradiação solar diária média nesses locais mostrados na Figura 26.

Figura 26 - Gráfico da Irradiação Solar no Plano Horizontal



Fonte: *SunData/CRESESB* (2018).

Os índices de irradiação mensal e sua média anual podem ser conferidos detalhadamente na Tabela 7.

Tabela 7 - Irradiação solar média no Plano Horizontal

Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m².dia]														Média	Delta		
			Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov			Dez	
Dourados	MS	BRASIL	22,301° S	54,849° O	4,4	5,89	5,72	5,26	4,48	3,67	3,34	3,47	4,44	4,75	5,32	5,89	6,34	4,88	3,01	
Dourados	MS	BRASIL	22,301° S	54,749° O		6,2	5,93	5,76	5,28	4,48	3,68	3,36	3,50	4,48	4,76	5,35	5,92	6,36	4,90	3,00
Dourados	MS	BRASIL	22,201° S	54,849° O		10,7	5,93	5,72	5,27	4,51	3,69	3,35	3,49	4,46	4,74	5,32	5,91	6,39	4,90	3,04

Fonte: *SunData/CRESESB* (2018).

Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico será considerada a média anual do parâmetro de irradiação, através da latitude e longitude que mais se aproxima de nossos dados de localização, no caso, a segunda opção. Desta forma obtém-se a irradiação solar média $H_t = 4,90 \text{ kWh/m}^2$.

3.2.2 Potência nominal do conjunto

Para a determinação da potência nominal do sistema fotovoltaico utilizou-se o consumo médio mensal que determina a quantidade de energia que se deseja gerar.

Desta forma, como visto anteriormente, o consumo médio mensal é de aproximadamente 8565 kWh, e a energia elétrica diária gerada estimada foi calculada por meio da Equação 26.

$$E_{diária} = \frac{E_{média} \cdot 12}{365} \quad (26)$$

Onde:

$E_{diária}$ → Energia elétrica diária gerada estimada [kWh];

$E_{média}$ → Consumo médio [kWh];

12 → Quantidade de meses em um ano;

365 → Total de dias em um ano.

$$E_{diária} = \frac{8565 \cdot 12}{365} = 281,589 \text{ [kWh]}$$

Como Tiepolo (2015, p.113) apresenta a equação da energia elétrica gerada estimada por um sistema fotovoltaico, que pode definir o painel quanto a sua produtividade em condições de diferentes potências nominais e irradiância solar. A energia pode ser conferida na Equação 27.

$$E_{CA} = P_N \cdot \frac{H_t}{G} \cdot P_R \cdot F_S \quad (27)$$

Onde:

E_{CA} → Energia elétrica gerada estimada diária, mensal ou anual [kWh];

P_N → Potência nominal do conjunto de módulos [kWp];

H_t → Irradiância diária numa superfície de inclinação ótima em kWh/m^2 ;

G → Irradiância que determina a potência nominal dos módulos em condições padrão de teste, normalmente $1.000 \text{ W}/m^2$;

P_R → Desempenho global do Sistema (também chamado de Taxa de Desempenho – TD, o qual será adotado neste trabalho);

F_S → Fator de perdas por sombreamento, sendo zero (“0”) quando o sistema fotovoltaico conectado à rede (SFVCR) não recebe luz, e igual a um (“1”) quando não houver sombra incidente sobre o sistema.

A potência nominal do conjunto é calculada por meio do parâmetro P_N . Para tal

arbitrou-se o desempenho global do sistema de 80% de toda a energia anual gerada pelo conjunto e considerou-se que os módulos possuem irradiação suficiente para que operem em sua potência nominal ($G = 1 \text{ kW/m}^2$). Para o fator de perdas por sombreamento foi utilizado fator igual a 1, ou seja, essas perdas foram desconsideradas. Reescrevendo a equação 27 e isolando o parâmetro P_N , foi obtida a potência nominal do conjunto através da Equação 28 abaixo.

$$P_N = \frac{E_{CA} \cdot G}{H_t \cdot P_R \cdot F_S} \quad (28)$$

$$P_N = \frac{281,589 \cdot 1}{4,90 \cdot 0,8 \cdot 1} = 71,834 \text{ [kWp]}$$

Como o objetivo não é suprir a demanda total, mas sim até 80% desta com os dois tipos de geração, tem-se que o valor estipulado para a geração fotovoltaica é de 75%. Resultando uma potência nominal do conjunto igual a 53,875 kWp.

3.2.3 Definição do módulo fotovoltaico

O módulo fotovoltaico a ser utilizado no projeto foi escolhido por meio de uma pesquisa de mercado. Os critérios levados em consideração foram: o preço, o tempo de garantia e a eficiência de cada um. Quanto maior for a potência nominal menor o número de módulos necessários para atingir a potência nominal do conjunto, assim foram pesquisados apenas painéis com potência maior que 300 Wp. Os módulos encontrados estão dispostos na Tabela 8 abaixo.

Tabela 8 - Cotação dos módulos fotovoltaicos

Modelo	Potência (Wp)	Loja	Preço
PAINEL SOLAR RISEN 330W - RSM72-6-330P	330	Minha Casa Solar	R\$ 689,00
PAINEL SOLAR CANADIAN 330W - CS6U-330P	330	NeoSolar	R\$ 719,00
PAINEL SOLAR GLC 325W - GCL-P6/72	325	NeoSolar	R\$ 719,00
PAINEL SOLAR CANADIAN 325W - CS6U-325P	325	Minha Casa Solar	R\$ 729,00
PAINEL SOLAR CANADIAN 325W - CS6U-325P	325	Energia Total	R\$ 819,00
PAINEL SOLAR CANADIAN 330W - CS6U-330P	330	Energia Total	R\$ 835,00

(continua)

(continuação)

Modelo	Potência (Wp)	Loja	Preço
PAINEL SOLAR CANADIAN 330W - CS6U-330P	330	Atacado Solar	R\$ 870,00
PAINEL SOLAR GLC 325W - GCL-P6/72	325	Atacado Solar	R\$ 960,00
PAINEL SOLAR CANADIAN 330W - CS6U-330PBR	330	Minha Casa Solar	R\$ 1.109,00

Fonte: Minha Casa Solar, NeoSolar, Energia Total e Atacado Solar (2018).

Em seguida foram comparados o tempo de garantia e a eficiência dos três painéis mais baratos listados na Tabela 9.

Tabela 9 - Eficiência e garantia dos módulos fotovoltaicos

Modelo	Eficiência	Garantia
PAINEL SOLAR RISEN 330W - RSM72-6-330P	17,10%	12 anos de garantia do produto e 25 anos para redução de potência maior que 20%
PAINEL SOLAR CANADIAN 330W - CS6U-330P	16,97%	10 anos de garantia do produto e 25 anos para redução de potência maior que 20%
PAINEL SOLAR GLC 325W - GCL-P6/72	17,00%	10 anos de garantia do produto e 25 anos para redução de potência maior que 20%

Fonte: Minha Casa Solar e NeoSolar (2018).

Analisando a Tabela 9 é possível observar que o painel solar Risen 330W - RSM72-6-330P é o mais eficiente e com maior período de garantia, o mesmo será utilizado no projeto e pode ser conferido Figura 27.

Figura 27 - Painel solar Risen 330W - RSM72-6-330P



Fonte: RISEN (2018).

3.2.4 Área de instalação dos módulos fotovoltaicos

Segundo Marinusk, *et. al* (2004) a área necessária para a instalação dos módulos fotovoltaicos é calculada através da razão entre a potência nominal do sistema e a eficiência do painel fotovoltaico, conforme a equação 29.

$$A = \frac{P_N}{E_{FF}} \cdot 100 \quad (29)$$

Onde:

A → Área de painéis [m^2];

P_N → Potência nominal do conjunto de módulos [kWp];

E_{FF} → Eficiência do painel [%].

$$A = \frac{53,875}{17,1} \cdot 100 = 315,05 [m^2]$$

O módulo escolhido tem eficiência de conversão igual a 17,1%. Assim, a área de instalação mínima é de 315,05 m^2 e a instalação. O telhado de cada um dos galpões tem uma área disponível de 1800 m^2 , portanto o espaço físico para a instalação dos painéis não será um problema.

3.2.5 Número de módulos fotovoltaicos

Para obter o número de módulos a serem utilizados na instalação foi calculada a razão entre a potência nominal do conjunto e a potência nominal de cada módulo, no caso do painel escolhido, 330 Wp. Como pode-se averiguar na Equação 30 abaixo.

$$N_{módulos} = \frac{P_N}{P_{módulos}} \quad (30)$$

Onde:

$N_{módulos}$ → Número de módulos;

P_N → Potência nominal do conjunto de módulos [Wp];

$P_{módulos}$ → Potência nominal de cada módulo [Wp].

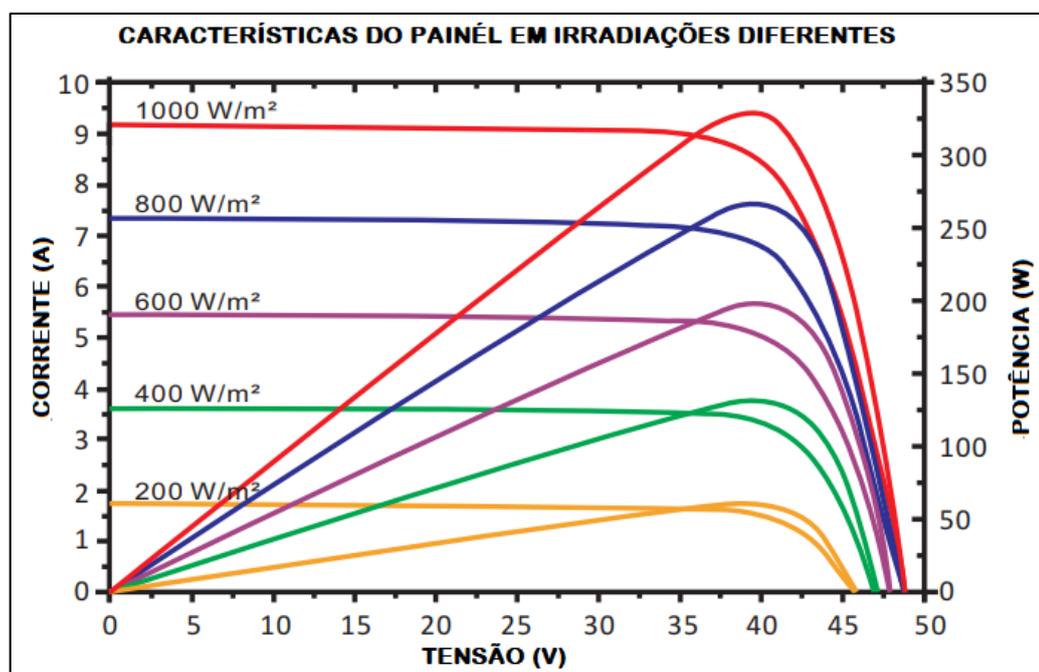
$$N_{Módulos} = \frac{53875}{330} = 163,25 \cong 160$$

Para o modelo Risen 330W – RSM72-6-330P adotado, têm-se o número arredondado de módulos igual a 160, obtendo-se assim a potência nominal do sistema de 52,800 kWp.

3.2.6 Inversor de frequência

A potência nominal do inversor a ser utilizado no sistema fotovoltaico é determinada pelo Fator de Dimensionamento de Inversores (FDI). O fator consiste na razão entre a potência nominal do inversor e dos módulos e idealmente deve estar entre 0,75 a 0,85. Os fabricantes aconselham utilizar este fator porque os módulos dificilmente operam na potência nominal, visto que a irradiância se aproxima de 1000W/m² perto das 12h00, mas raramente atinge este valor e no restante das horas de sol fica abaixo disto (PINHO; GALDINO, 2014). O comportamento da potência do painel nas diferentes irradiâncias está apresentado na Figura 28.

Figura 28 - Variações da corrente, tensão e potência do módulo fotovoltaico nas diferentes irradiações.



Fonte: Datasheet painel solar Risen 330W- RSM72-6-330P

A Equação 31 é utilizada para determinar a faixa de potência ideal do inversor.

$$P_{Nca} = FDI * P_{FV} \quad (31)$$

Onde:

P_{Nca} → Potência nominal do inversor (kW);

P_{FV} → Potência nominal do sistema fotovoltaico (kW);

FDI → Fator de dimensionamento do inversor.

$$0,75 * 52,800 < P_{Nca} < 0,85 * 52,800 [kW]$$

Utilizando a faixa ideal do fator de dimensionamento foi encontrada a faixa de potência desejada do inversor: $39,6 \text{ kW} < P_{Nca} < 44,8 \text{ kW}$. O inversor que trouxe um melhor custo-benefício, ou seja, que atendeu aos requisitos necessários para o estudo de nosso caso foi o REFUsol 40K. Os dados do inversor retirados do *datasheet* estão listados na Tabela 10.

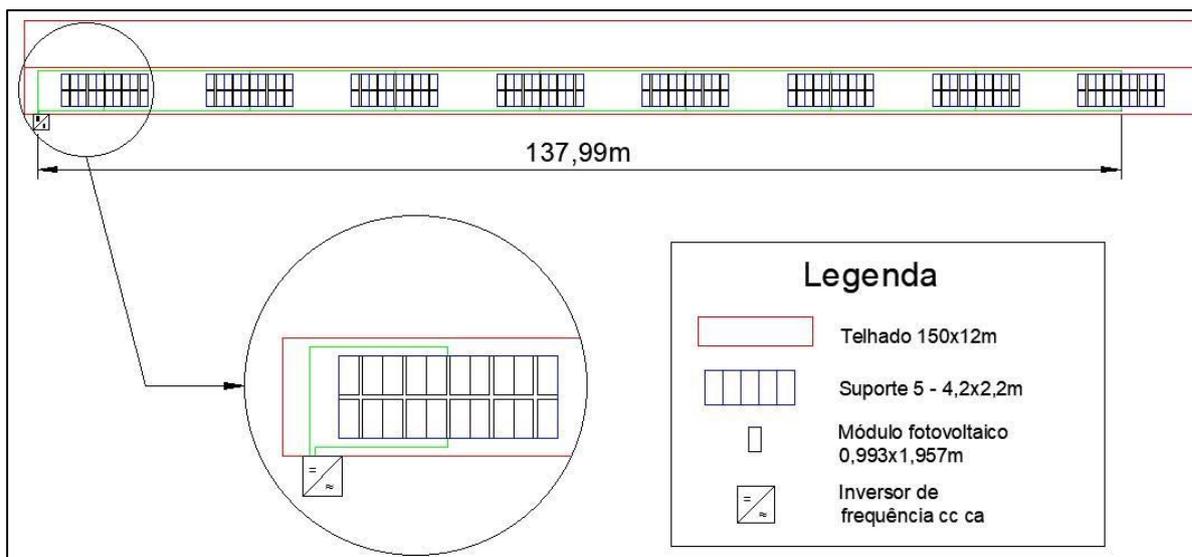
Tabela 10 - Dados retirados do *datasheet* do inversor REFUsol 40K

DADOS DE ENTRADA TRIFÁSICO 380V:	DADOS DE SAÍDA TRIFÁSICO 380V:
Potência FV máxima recomendada 60 kWp	Potência nominal de saída 40 kW
Alcance da MPPT 250~900 VCC	Conexão de rede AC / Fases de alimentação - L1, L2, L3, N, PE
Área de tensão MPP 490~850 VCC	Fator de Potência Nominal/Faixa - 1 / 0,8i ... 0,8c
Tensão máx. de entrada 1000 VCC	Tensão nominal 400 VCA (3 NPE 220V + N)
Alimentação de tensão de partida 350 VCC	Faixa de tensão - 320~480 VCA
Corrente CC Operacional máxima 84 A	Frequência nominal / Faixa de Frequência 50, 60 / 45 ... 65Hz
Corrente máx. de curto-circuito dos módulos solares 160 A	Corrente máx. de saída 3x59 A
Número entradas CC 1 x Plus, 1x Minus	THD máximo < 3%
Conexão de alavanca de joelho Phoenix Contact T-LOX TW50	Eficiência máxima 98,2%
Cabos de entrada CC de 10 a 50mm ² (alumínio / cobre)	Origem da alimentação (W) / Perdas em stand-by (W) - 40 / < 0,5

Fonte: REFUsol (2018).

Os módulos serão dispostos em 8 fileiras conectadas em paralelo, cada fileira terá 20 painéis conectados em série. O *layout* está esquematizado na Figura 29. A tensão na entrada do inversor é igual a soma das tensões dos 20 módulos em série, a corrente é igual a soma das correntes de cada uma das fileiras.

Figura 29 - Disposição dos módulos fotovoltaicos



Fonte: Autoria própria (2018).

Um módulo fotovoltaico irá apresentar características elétricas semelhantes às das células, tais como: tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, corrente de máxima potência, tensão de máxima potência e ponto de máxima potência.

Dessa maneira, podemos determinar se nosso inversor de frequência escolhido está apto para o sistema utilizando os cinco parâmetros que especificam um módulo sobre as seguintes condições de irradiância, temperatura e massa de ar respectivamente: 1000 W/m², 25°C e AM 1,5. As especificações do painel estão dispostas na Tabela 11, os dados foram retirados do *datasheet*.

Tabela 11 - Especificações do painel solar

Potência máxima do painel	330 Wp
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	46,3 V
Corrente de curto circuito (I_{sc})	9,25 A
Tensão de máxima potência (V_{mpp})	38,1 V
Corrente de máxima potência (I_{mpp})	8,7 A
Eficiência do módulo	17,10%

Fonte: *Datasheet* do painel solar Risen 330W - RSM72-6-330P

Primeiramente compara-se a tensão máxima de circuito aberto (V_{oc}) do arranjo de módulos com a tensão máxima que o inversor pode suportar ($V_{máx}$), a tensão V_{oc} deve ser inferior à tensão $V_{máx}$ do inversor, quando não há a circulação de corrente elétrica este limite deve ser respeitado devido aos riscos de danos aos componentes. Como em cada fileira do arranjo estão dispostos 20 painéis em série, multiplica-se o

número de módulos pelo valor de tensão de circuito aberto do *datasheet*. O cálculo é realizado por meio da Equação 32.

$$V_{m\acute{a}x} = N_{m\acute{o}dulos} \cdot V_{oc} \quad (32)$$

Onde:

$V_{m\acute{a}x}$ → Tensão máxima suportada pelo inversor [V];

$N_{m\acute{o}dulos}$ → Número de módulos;

V_{oc} → Tensão máxima de circuito aberto [V].

$$V_{m\acute{a}x} = 20.46,3 = 926 [V] < 1000 [V]$$

Seguindo a mesma linha de raciocínio, considerando o número de fileiras de módulos fotovoltaicos em paralelo, obtêm-se a corrente máxima que o inversor deve suportar, através do parâmetro I_{mpp} do *datasheet* do painel, constatado na Equação 33.

$$I_{m\acute{a}x} = N_{fileiras} \cdot I_{mpp} \quad (33)$$

Onde:

$I_{m\acute{a}x}$ → Corrente máxima suportada pelo inversor [A];

$N_{fileiras}$ → Número de fileiras;

I_{mpp} → Corrente de máxima potência [A].

$$I_{m\acute{a}x} = 8.8,7 = 69,6 [A] < 84 [A]$$

O mesmo cálculo é realizado utilizando a corrente de curto circuito dos módulos (I_{sc}) para determinar se atende à máxima suportada pelo inversor, $I_{ccm\acute{a}x}$. A Equação 34 apresenta a relação entre as duas correntes.

$$I_{ccm\acute{a}x} = N_{fileiras} \cdot I_{sc} \quad (34)$$

Onde:

$I_{ccm\acute{a}x}$ → Corrente máxima de curto circuito suportada pelo inversor [A];

$N_{fileiras}$ → Número de fileiras;

I_{sc} → Corrente de curto circuito [A].

$$I_{ccm\acute{a}x} = 8.9,25 = 74 [A] < 160 [A]$$

Prosseguindo, por meio do parâmetro V_{mpp} , na Equação 35 foi verificada a máxima tensão de operação dos módulos. A faixa de tensão do Rastreador do Ponto de Máxima Potência (MPPT) indica que o ponto de máxima e mínima tensão requeridos pelo controlador presente no inversor.

$$V_{mp} = N_{m\acute{o}dulos} \cdot V_{mpp} \quad (35)$$

Onde:

V_{mpp} → Tensão no ponto de máxima potência por módulo [V];

$N_{m\acute{o}dulos}$ → Número de módulos;

V_{mp} → Tensão de máxima potência [V].

$$V_{mp} = 20 \times 38.1 = 762 [V] \rightarrow 490 < 762 < 850 [V]$$

Por fim, foi verificada através da Equação 36 a máxima potência a qual o inversor pode ser submetido, sem que o mesmo sofra avarias. A potência do mesmo deve ser igual ou superior à potência total do conjunto de módulos do sistema.

$$P_{m\acute{a}x} = N_{m\acute{o}dulos} \cdot P_{m\acute{o}dulos} \quad (36)$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$ → Potência máxima suportada pelo inversor [W];

$N_{m\acute{o}dulos}$ → Número de módulos;

$P_{m\acute{o}dulos}$ → Potência nominal de cada módulo [Wp].

$$P_{m\acute{a}x} = 160.330 = 52,800 [kW] < 60 [kW]$$

Após verificados e averiguados que os parâmetros atendem e respeitam as faixas de valores, chega-se à conclusão de que o inversor REFUsol 40K está adequado para o sistema fotovoltaico dimensionado.

3.2.7 Dimensionamento da seção dos condutores

Em instalações de sistemas fotovoltaicos os cabos ficam expostos ao tempo, por isso necessitam de uma cobertura especial, que suporte grandes variações de temperatura, umidade, exposição intensa ao sol e aos raios UV. A Figura 30 apresenta as características físicas e elétricas de um modelo de cabos próprio para o uso em instalações solares.

Figura 30 - Características dos cabos solares

 EXZHELLENT® SOLAR 1.8 kV CC CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E ELÉTRICAS:							
Seção Nominal mm ²	Cor da Cobertura	Diâmetro Externo Nominal mm	Peso Aproximado kg/km	Raio Mín. de Curvatura mm	Resistência Elétrica C.C. Máx. do Condutor a 20 °C Ω/km	Ampacidade (1) A	Queda de Tensão (2) em C.C. V/A/km
1,5	■ ■ ■ ■ ■	5,4	35	22	13,7	25	38,17
2,5	■ ■ ■ ■ ■	5,9	45	24	8,21	34	22,87
4	■ ■ ■ ■ ■	6,6	60	26	5,09	45	14,18
6	■ ■ ■ ■ ■	7,4	80	30	3,39	57	9,445
10	■ ■ ■ ■ ■	8,8	120	35	1,95	79	5,433
16	■ ■ ■ ■ ■	10,1	180	40	1,24	105	3,455
25	■ ■ ■ ■ ■	12,5	300	50	0,795	140	2,215
35	■ ■ ■ ■ ■	14,0	395	56	0,565	174	1,574
50	■ ■ ■ ■ ■	16,3	555	65	0,393	219	1,095
70	■ ■ ■ ■ ■	18,7	790	75	0,277	273	0,7717
95	■ ■ ■ ■ ■	20,8	1.030	83	0,210	328	0,5851
120	■ ■ ■ ■ ■	23,0	1.250	92	0,164	385	0,4569
150	■ ■ ■ ■ ■	25,7	1.550	129	0,132	443	0,3678
185	■ ■ ■ ■ ■	28,7	1.910	144	0,108	506	0,3009
240	■ ■ ■ ■ ■	32,3	2.450	162	0,0817	606	0,2276
300	■ ■ ■ ■ ■	35,6	3.050	178	0,0654	700	0,1822
400	■ ■ ■ ■ ■	40,6	4.050	203	0,0495	842	0,1379

(1) Dois cabos encostados um ao outro, na horizontal, ao ar livre, temperatura ambiente de 60 °C, temperatura no condutor de 120 °C.
 (2) Na temperatura de operação de 120 °C.

Fonte: GENERAL CABLE (2018).

No projeto elétrico será necessário utilizar cabos com duas bitolas diferentes. Um para a conexão entre os painéis nas fileiras e outro para a conexão entre as fileiras e o inversor. Segundo o *datasheet*, a máxima corrente entre os módulos é de 8,87 A, o que resulta em uma seção nominal de 1,5 mm² segundo a Figura 30. Porém, a seção recomendada pela *Risen*, fabricante dos painéis, para os cabos de conexão é de 4 mm². Como o arranjo fotovoltaico tem 8 fileiras em paralelo, a corrente total na entrada

do inversor resulta em 69,6 A. Consultando a Figura 30 pode-se concluir que a seção nominal do cabo para a conexão das fileiras e do inversor deve ser de no mínimo 10 mm². Não é necessário aplicar fatores de correção de temperatura ou agrupamento visto que o cabo é fabricado especialmente para ser utilizado em altas temperaturas e não serão agrupados mais que dois cabos.

A queda de tensão não pode ultrapassar 5% da tensão máxima do arranjo. O cálculo de queda de tensão pode ser realizado utilizando a Equação 37 (NBR 5410, 2008).

$$\Delta V\% = \frac{\Delta V_{UNIT} \cdot I \cdot l}{V} \cdot 100\% \quad (37)$$

Onde:

ΔV → Queda de tensão [V];

ΔV_{UNIT} → Queda de tensão unitária do condutor [V/A.km];

I → Corrente máxima [A];

l → Comprimento do condutor [km].

$$\Delta V_{10mm^2} = \frac{5,433 \cdot 69,6 \cdot 0,150}{762} = 7,443\%$$

$$\Delta V_{16mm^2} = \frac{3,455 \cdot 69,6 \cdot 0,150}{762} = 4,733\%$$

Para o condutor de 10 mm² a queda de tensão é superior à exigida pela norma NBR 5410. Portanto a seção nominal a ser utilizada deve ser de 16 mm² para a conexão com o inversor.

Após o inversor, até o quadro geral, a corrente é alternada e os cabos serão agrupados em eletrodutos enterrados no solo. A corrente máxima na saída do inversor é igual à 59 A por fase e pode ser consultada na Tabela 10 (dados do inversor). A Figura 31 a seguir apresenta cabos da marca *Prysmian* com isolamento termoplástico, o método de instalação dos cabos é o "D" (eletrodutos enterrados no solo).

Figura 31 - Características dos condutores

CAPACIDADE DE CONDUÇÃO DE CORRENTE												
TABELA 2 - (*) CAPACIDADES DE CONDUÇÃO DE CORRENTE, EM AMPÈRES, PARA OS MÉTODOS DE REFERÊNCIA, A1, A2, B1, B2, C e D DA TABELA 1 FIOS E CABOS ISOLADOS EM TERMOPLÁSTICO, CONDUTOR DE COBRE.												
<p>➤ • Cabo Superastic, Cabo Superastic Flex, Fio Superastic, Cabo Sintenax, Cabo Sintenax Flex e Afumex 750V; • 2 e 3 condutores carregados; • Temperatura no condutor: 70 °C; • Temperaturas: 30 °C (ambiente) e 20 °C (solo).</p>												
seções nominais (mm ²)	métodos de instalação definidos na tabela 1											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
[1]	2 condutores carregados [2]	3 condutores carregados [3]	2 condutores carregados [4]	3 condutores carregados [5]	2 condutores carregados [6]	3 condutores carregados [7]	2 condutores carregados [8]	3 condutores carregados [9]	2 condutores carregados [10]	3 condutores carregados [11]	2 condutores carregados [12]	3 condutores carregados [13]
0,5	7	7	7	7	9	8	9	8	10	9	12	10
0,75	9	9	9	9	11	10	11	10	13	11	15	12
1	11	10	11	10	14	12	13	12	15	14	18	15
1,5	14,5	13,5	14	13	17,5	15,5	16,5	15	19,5	17,5	22	18
2,5	19,5	18	18,5	17,5	24	21	23	20	27	24	29	24
4	26	24	25	23	32	28	30	27	36	32	38	31
6	34	31	32	29	41	36	38	34	46	41	47	39
10	46	42	43	39	57	50	52	46	63	57	63	52
16	61	56	57	52	76	68	69	62	85	76	81	67
25	80	73	75	68	101	89	90	80	112	96	104	86
35	99	89	92	83	125	110	111	99	138	119	125	103

Fonte: PRYSMIAN GROUP (2018).

Não é necessário utilizar fatores de correção de temperatura ou de agrupamento visto que os condutores que partem do inversor até o quadro geral não serão agrupados com outros circuitos e a temperatura do solo na região de Dourados é historicamente inferior a 20°C (NASCIMENTO *et. al*, 2016). Além disso, o quadro geral está localizado próximo ao inversor e não será necessário calcular a queda de tensão no trecho. Assim, o cabo a ser utilizado pelo critério de ampacidade poderia ser o de 16 mm², porém, neste caso será utilizado o de 25 mm², com corrente máxima igual a 86 A, para ser possível fazer a proteção adequada pelo disjuntor. Os cálculos serão apresentados no subitem 3.2.8 Disjuntores.

3.2.8 Disjuntores

Para proteger os cabos e desenergizar o inversor em casos de manutenção serão necessários 8 disjuntores, um para cada fileira de 20 módulos fotovoltaicos conectados em série.

Também será utilizado um disjuntor tripolar no quadro geral para conexão dos cabos provenientes do inversor. Cada disjuntor de corrente contínua deve proteger os cabos de 4 mm² das fileiras. Conforme a Equação 38 a corrente nominal do disjuntor deve ser maior que a máxima corrente do conjunto (8,7 A), porém menor que a corrente máxima do cabo (45 A). A corrente nominal do disjuntor deve ser 15% maior

que a corrente de projeto do circuito para evitar interrupções indesejadas, assim como apresenta a Equação 39 (MAMEDE, 2001).

$$I_p \leq I_{dp} \leq I_z \quad (38)$$

$$I_{dp} \geq I_p * 1,15 \quad (39)$$

Onde:

I_p → Corrente de projeto do circuito [A];

I_{dp} → Corrente nominal do disjuntor [A];

I_z → Corrente máxima do cabo [A].

$$8,7 \leq 13 \leq 45 [A]$$

$$13 \geq 8,7 * 1,15 = 10,005 [A]$$

O disjuntor de corrente contínua escolhido apresenta corrente nominal igual a 13 A, tensão de operação nominal igual a 800 V e tensão suportável por impulso igual a 6 kV.

$$70 \geq 59 * 1,15 = 67,85 [A]$$

De acordo com a Equação 39 o disjuntor de corrente alternada a ser instalado no quadro geral deve ter corrente nominal superior a 67,85 A. Conforme dados tabelados o cabo de 16 mm² tem capacidade máxima de corrente igual a 67 A não é possível fazer a proteção adequada deste cabo, por isso será utilizado um cabo de 25 mm² de seção nominal e corrente de 86 A.

$$59 \leq 70 \leq 86 [A]$$

O escolhido foi um disjuntor tripolar de corrente nominal igual a 70 A e tensão de operação de 380 V fase-fase e 220 V fase-terra.

3.3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA EÓLICO

3.3.1 Média anual da velocidade do vento

Nesta etapa do trabalho, analisar-se-ão os dados oriundos de medições de

potencial eólico para a região de Dourados-MS, a fim de que seja possível estimar a capacidade produtiva do sistema híbrido escolhido para o empreendimento.

Visitando-se o Atlas Online do Potencial Eólico Brasileiro no site da CEPEL, pode-se obter os dados eólicos referentes às últimas simulações realizadas no ano de 2013 pelo órgão.

Como mostra a Figura 32, tem-se que a velocidade média anual do vento a uma altura de 30 m do solo para a região é de, aproximadamente, 4 m/s.

Figura 32 – Média anual da velocidade do vento

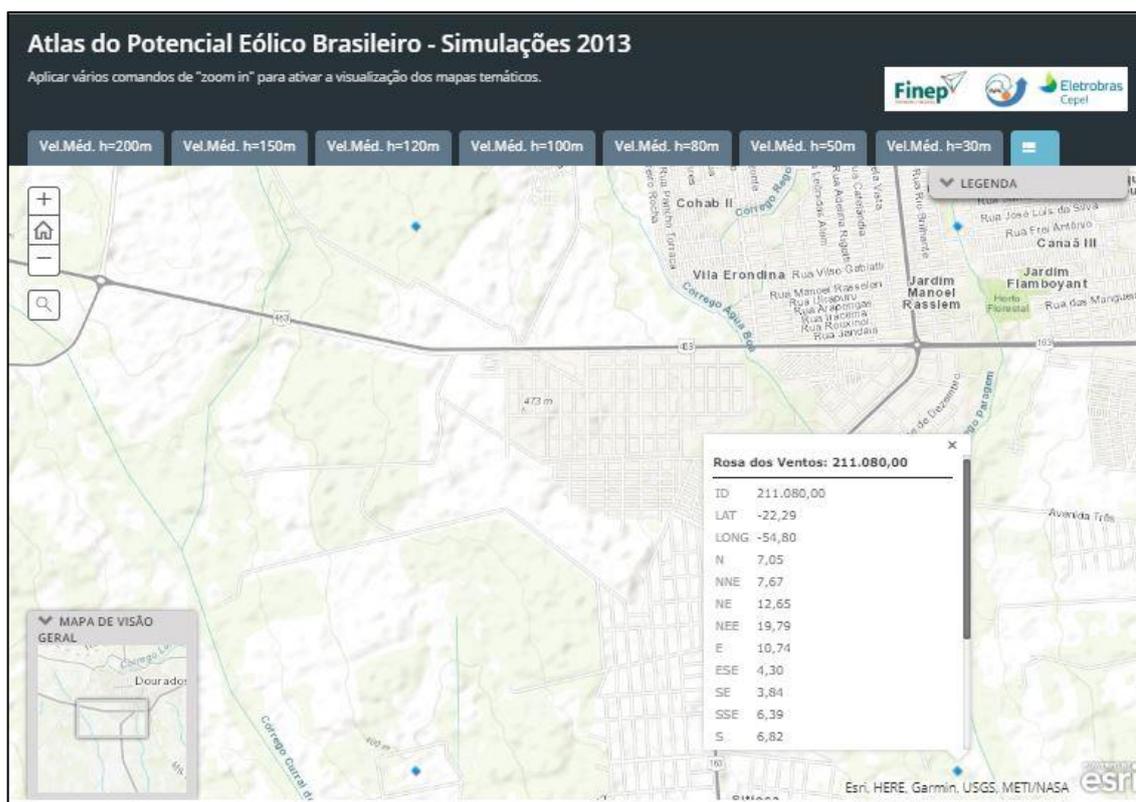


Fonte: CEPEL (2018).

Além da velocidade média, pode-se obter outros dados relevantes para a determinação do potencial eólico através do acesso ao Atlas Online como, por exemplo, a rosa dos ventos para qualquer localidade brasileira, ou seja, a direção em que ocorre a maior incidência de ventos em um determinado ponto.

Sabendo-se que a propriedade rural escolhida se situa nas coordenadas geográficas $-54,80^\circ$ de longitude e $-22,29^\circ$ de latitude, tomou-se como ponto de análise aquele mais próximo dessas coordenadas, apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Direção da incidência de ventos

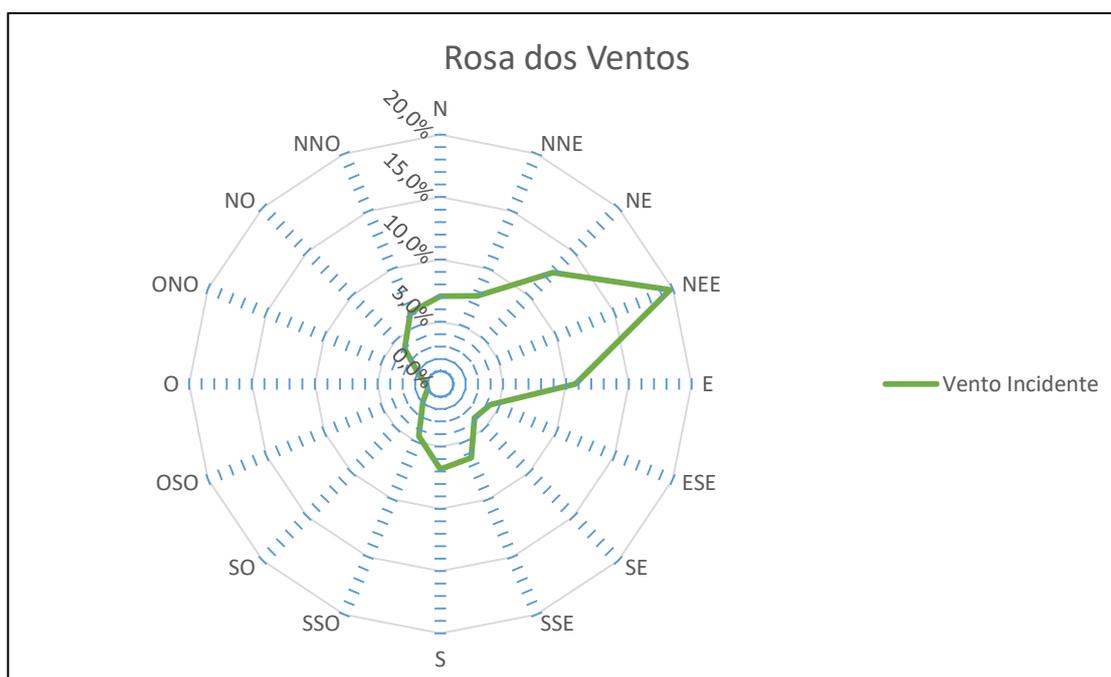


Fonte: CEPEL (2018).

Os valores exibidos no quadro destacado da Figura 33 representam o identificador do ponto, suas coordenadas geográficas (latitude e longitude) em graus, e o percentual médio de incidência de vento para todas as direções, respectivamente. Dessa forma, analisando-se os valores, pode-se concluir que o ponto subcolateral Lés-nordeste é a direção onde há a predominância de vento com cerca de 20% de incidência.

Com todos os valores do quadro, é possível elaborar o gráfico apresentado na Figura 34 para a melhor visualização do real significado desses dados, que indicam qual deve ser o posicionamento do aerogerador para o maior aproveitamento da energia eólica disponível na localidade.

Figura 34 - Gráfico da incidência dos ventos



Fonte: A autoria própria (2018).

O acesso ao Atlas Online permite, então, concluir as três primeiras etapas referentes à obtenção, mensuração e análise de dados do fluxograma da Figura 23.

3.3.2 Definição do aerogerador

Prosseguindo-se com os estudos, tem-se agora o estágio da escolha do aerogerador para a determinação da potência passível de ser gerada pela fonte eólica. Por tratar-se da implementação de um gerador eólico em uma propriedade rural de característica avicultora combinada a um sistema de geração fotovoltaica – configurando-se um sistema híbrido –, os aerogeradores para esse uso são considerados de pequeno porte com faixa de potência operacional que variam entre 350 W a 100 kW (DUTRA *et. al.*, 2015).

Como a propriedade possui um consumo médio mensal de 8.564,92 kWh de energia, procurou-se adotar aerogeradores com potência nominal de valores intermediários. Analisando-se catálogos de fabricantes de aerogeradores nacionais, não foi encontrada uma turbina que opere com velocidade de vento nominal inferior a 5 m/s. Tendo em vista essa adversidade, buscou-se determinar uma máquina que atenda as especificidades da planta escolhida, não só de uma perspectiva técnica, mas levando em consideração os aspectos econômicos do custo deste gerador.

Isso posto, escolheu-se o modelo *Skystream Land* da marca *Southwest*

Windpower cuja velocidade inicial de geração de energia é da ordem de 3,5 m/s, e velocidade nominal de 9,0 m/s. Outros dados do gerador escolhido, encontram-se na Tabela 12 abaixo composta pelas informações coletadas no site da empresa Energia Pura e de seu *datasheet*.

Tabela 12 - Resumo das especificações do aerogerador

Modelo do Gerador	Skystream Land
Diâmetro do Rotor [m]	3,72
Área do Rotor [m ²]	10,87
Energia Nominal Gerada [kWh/mês]	400
Potência Nominal [kW]	2,40
Velocidade Nominal [m/s]	9,00
Preço Unitário [R\$]	55.200 ¹

Fonte: Autoria própria (2018).

Observando-se a Tabela 12, nota-se que a capacidade máxima de geração de energia mensal do aerogerador (400 kWh/mês) representa cerca de 5% de todo o consumo do aviário. Realizando-se uma análise isolada deste elemento em comparação ao consumo médio, tem-se que sua contribuição não possui grande impacto na redução de custos, uma vez que é sabido que a velocidade de vento incidente para a região de Dourados-MS é inferior à velocidade nominal exigida pela máquina.

Porém, há de se considerar o complemento oriundo dos painéis fotovoltaicos no sistema de geração híbrido para determinar o real valor de contribuição da fonte eólica, e também o percentual estipulado para suprir a demanda total, uma vez que o objetivo da utilização do sistema eólico-solar não é atender 100% da energia consumida pela propriedade.

Além dos dados nominais fornecidos pelo fabricante do gerador eólico, acessando o site da empresa Energia Pura pode-se encontrar o *datasheet* e os gráficos de desempenho do gerador escolhido, como exhibe a Figura 35.

¹ O valor apresentado refere-se à estimativa de preço do aerogerador com custos de torre e demais serviços, uma vez que apenas a parte da turbina da máquina é de R\$ 35.000,00 (preço obtido por contato telefônico com a empresa Energia Pura que não forneceu um orçamento sobre os demais serviços necessários à instalação).

Figura 35 - Desempenho do gerador



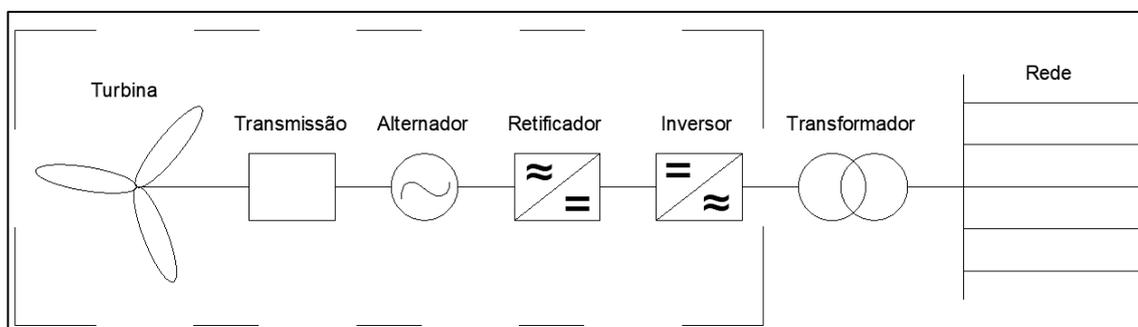
Fonte: Energia Pura (2018).

A partir do gráfico, observa-se que, para uma velocidade média de 4,0 m/s, a energia gerada pela fonte eólica é de, aproximadamente, 100 kWh mensais.

Desse modo, podemos concluir mais três etapas do fluxograma da Figura 19, referentes à escolha do gerador, sua estimativa de geração e seu posicionamento.

Para a parte de integração com a rede elétrica, tem-se na Figura 36 a representação da configuração de um sistema eólico de geração, destacando-se os elementos componentes do aerogerador.

Figura 36 - Esquema do sistema eólico



Fonte: Autoria própria (2018).

Observando-se o *datasheet* do gerador eólico, este é um equipamento com inversor de corrente alternada integrado à máquina, com tensão de saída na ordem de 120/208 V trifásicos com saída para duas fases e sugere-se sua instalação a distâncias horizontais superiores a 75 m de um obstáculo. Como a propriedade é alimentada pela concessionária em tensão 220/380 V trifásicos, necessita-se de um transformador para promover a conexão adequada à rede.

3.3.3 Dimensionamento da seção dos condutores

Para o dimensionamento dos condutores, o próprio *datasheet* do fabricante sugere as seções nominais dos cabos a ser utilizados de acordo com a configuração do circuito, ou seja, se monofásico ou trifásico e, por imposições construtivas da máquina, a menor seção passível de ser conectada à saída do gerador é de 10 mm². Porém, pode-se usar o critério de ampacidade dado pela Equação 40 para tal.

$$I_N = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L} [A] \quad (40)$$

Sendo:

I_N → Corrente [A]

P → Potência máxima [W];

V_L → Tensão trifásica de saída [V]

Dimensionando o condutor pela Equação 40, tem-se que a corrente máxima na saída da máquina escolhida é dada por:

$$I_N \cong \frac{3000}{208}$$

$$I_N \cong 8,66 [A]$$

Sabendo-se que o método de instalação dos condutores é feito por eletroduto enterrado no solo (método D segundo a NBR 5410), pelo critério de ampacidade e considerando-se os fatores de correção de temperatura e agrupamento como unitários, um condutor de 2,5 mm² seria capaz de atender à corrente fornecida pelo gerador. Entretanto, pelo critério de queda de tensão apresentado pela Equação 37 vê-se que esse condutor não cumpriria o objetivo de transmissão de energia adequadamente, sendo então especificado o cabo de 10 mm² para a conexão dos terminais do gerador ao quadro elétrico da propriedade, como demonstram os cálculos abaixo:

$$\Delta V = \frac{\Delta V_{UNIT.I.I}}{V} \cdot 100 [\%] \quad (37)$$

$$\Delta V_{(2,5 \text{ mm}^2)} = \frac{14,8 \cdot 8,33 \cdot 0,150}{208} \cong 8,89\%$$

$$\Delta V_{(10 \text{ mm}^2)} = \frac{3,8 \cdot 8,33 \cdot 0,150}{208} \cong 2,28\%$$

Figura 37 - Queda de tensão unitária dos cabos

QUEDA DE TENSÃO

TABELA 18 - QUEDA DE TENSÃO EM V/A. km
CABO SINTENAX, CABO SINTENAX FLEX E VOLTALENE

> Cabo Sintenax, Cabo Sintenax Flex e Voltalene.

seções nominais

(mm²)

instalação ao ar livre^(C)

cabos unipolares^(D)

circuitos

cabo unipolar (circuito monofásico)

cabos bipolares (circuito trifásico)

cabos unipolares e bipolares (circuito monofásico^(B))

cabos tri e tetrapolares (circuito trifásico)

s=10cm **s=20cm** **s=2D** **s=10cm** **s=20cm** **s=2D** **FP-0,8** **FP-0,95** **FP-0,8** **FP-0,95** **FP-0,8** **FP-0,95** **FP-0,8** **FP-0,95** **FP-0,8** **FP-0,95** **FP-0,8** **FP-0,95** **FP-0,8** **FP-0,95**

1,5	23,6	27,8	23,7	27,8	23,4	27,6	20,5	24,0	20,5	24,1	20,3	24,0	20,2	23,9	23,3	27,6	20,2	23,9
2,5	14,6	17,1	14,7	17,1	14,4	17,0	12,7	14,8	12,7	14,8	12,5	14,7	12,4	14,7	14,3	16,9	12,4	14,7
4	9,3	10,7	9,3	10,7	9,1	10,6	8,0	9,3	8,1	9,3	7,9	9,2	7,8	9,2	9,0	10,6	7,8	9,1
6	6,3	7,2	6,4	7,2	6,1	7,1	5,5	6,3	5,5	6,3	5,3	6,2	5,2	6,1	6,0	7,1	5,2	6,1
10	3,9	4,4	3,9	4,4	3,7	4,3	3,4	3,8	3,4	3,8	3,2	3,7	3,2	3,7	3,6	4,2	3,1	3,7
16	2,6	2,8	2,6	2,8	2,4	2,7	2,2	2,4	2,3	2,5	2,1	2,4	2,0	2,3	2,3	2,7	2,0	2,3
25	1,73	1,83	1,80	1,86	1,55	1,76	1,52	1,59	1,57	1,62	1,40	1,53	1,32	1,49	1,50	1,71	1,31	1,48

Fonte: PRYSMIAN GROUP (2018).

Ainda que demonstrado a possibilidade do emprego do condutor de 10 mm², como a distância estipulada entre o quadro elétrico e o gerador é de 150 m, o fabricante determina a utilização de condutores de seção nominal maior que a mencionada acima. Neste caso, para eleger uma maior flexibilidade ao proprietário, utilizou-se o condutor de seção nominal de 25 mm² para distâncias de até 168 m, como exibe a Tabela 13.

Tabela 13 - Seção nominal conforme distâncias

Voltagem do Sistema	Comprimento Máximo do cabo	10mm ²	16mm ²	25mm ²
120/240 VCA, Fase Dividida	198 m	22,9m	-----	175 m
120/240 VCA, Fase Dividida	13 m	22,9 m	110 m	-----
120/208 VCA, Trifásico	168 m	22,9 m	-----	145 m
120/208 VAC, 3 Trifásico	114 m	22,9 m	91 m	-----

Fonte: Datasheet Skystream Land (2018).

3.3.4 Definição do transformador

Já para o transformador, procurou-se equipamentos de potência máxima de 5 kVA, uma vez que a curva de desempenho apresentada pela Figura 35 demonstra que a capacidade máxima do aerogerador é inferior a essa potência. Fez-se então uma tabela com diversos tipos de transformadores e fornecedores contatados e escolheu-se o de menor valor para atender às exigências do gerador, como mostra a Tabela 14.

Tabela 14 - Valores de transformadores

Tipo de Transformador	Marca do Transformador	Potência [kVA]	Preço Unitário[R\$]
Transformador Monofásico	Indusul	3,0	567,40
Auto Transformador	Tecnotrafo	3,5	2.096,97
Transformador Isolador	União Transformadores	5,0	1.580,00

Fonte: Autoria própria (2018).

Para a proteção do aerogerador, determinou-se o disjuntor de 20 A, respeitando-se o critério de proteção dado pela Equação 38, onde $I_p < 1,15 \cdot I_p < I_z \Rightarrow 8,66 < 9,96 < \mathbf{20}$. Portanto, o disjuntor em questão atende as especificações necessárias.

Através dos processos de dimensionamento é possível, então, finalizar a etapa referente à ligação com a rede, podendo-se prosseguir para a etapa de cálculo dos investimentos do empreendimento, não só para o sistema eólico de geração, mas também para o fotovoltaico, que seguem no próximo capítulo deste trabalho. Após isso, conclui-se a última etapa de viabilidade técnico-econômica através da rentabilidade de todo o sistema híbrido de geração.

4. ASPETOS ECONÔMICOS DO EMPREENDIMENTO HÍBRIDO DE GERAÇÃO DE ENERGIA.

Para determinar o rendimento financeiro da instalação de geração híbrida é necessário calcular o investimento inicial total do sistema eólico e do sistema fotovoltaico. As Tabelas 19 e 20 apresentam todos os materiais utilizados para montar os sistemas. Além dos materiais, foi estipulada uma taxa de 30% para gastos com mão-de-obra e outros materiais não previstos no projeto, resultando em R\$ 217.035,13 para o sistema fotovoltaico e R\$ 82.068,70 para o sistema eólico. Os gastos foram separados por sistema, pois o objetivo é determinar a rentabilidade de cada um deles além do total do empreendimento.

Tabela 15 – Custos dos materiais necessários para a implementação do sistema de geração eólico

Sistema Eólico			
Material	Loja	Preço Unitário	Quantidade
Aerogerador Skystream Land	Energia Pura	R\$ 55.200,00	1 [un]
Transformador monofásico	Indusul	R\$ 567,40	2 [un]
Disjuntor Bipolar 20 ^a	Leroy Merlin	R\$ 46,90	1 [un]
Cabo sintenax flex 10 mm ²	Eletromac	R\$ 4,95	68,7 [m]
Cabo sintenax flex 25 mm ²	Eletromac	R\$ 10,68	600 [m]
Preço Total			R\$ 63.129,77

Fonte: Autoria própria (2018).

Tabela 16 – Custos dos materiais necessários para a implementação do sistema de geração fotovoltaica.

Sistema Fotovoltaico			
Material	Loja	Preço Unitário	Quantidade
Módulo RISEN RSM72-6-330P	Minha Casa Solar	R\$ 689,00	160 [un]
Cabo Exzhellent Solar 4 mm ²	NeoSolar	R\$ 3,99	300 [m]
Cabo Exzhellent Solar 16 mm ²	NeoSolar	R\$ 29,96	300 [m]
Inversor Solar Refusol 40Kw	RNA imports	R\$ 19.939,00	1 [un]
Cabo sintenax flex 25 mm ²	Eletromac	R\$ 10,68	40 [m]
Disjuntor 13 A 1kV CC	NeoSolar	R\$ 319,00	8 [un]
Disjuntor tripolar 70 A 220/380 V	Leroy Merlin	R\$ 121,90	1 [un]
Suporte 4 painéis - 330 Wp	Minha Casa Solar	R\$ 586,00	40 [un]
Preço Total			R\$ 166.950,10

Fonte: Autoria própria (2018).

A geração mensal de energia eólica do gerador é dada pelo *datasheet*. A Figura

35 apresenta o desempenho do aerogerador, nela é possível observar que a geração média mensal é de aproximadamente 100 kWh, resultando em uma geração anual de 1200 kWh. O sistema fotovoltaico tem uma potência de 52,8 kW e em Dourados a média de horas de sol pico é igual a 4,9 conforme a Tabela 7.

Utilizando a Equação 23 é possível determinar a energia gerada diariamente, multiplicando por 365 dias é obtida a energia gerada anualmente pelos módulos fotovoltaicos:

$$E_{kWh} = 52,8 * 4,9 * 365 = 94.432,8 \text{ kWh/ano}$$

Como existe perdas no inversor e podem existir períodos em que as horas de sol pico são inferiores à média, utiliza-se um fator de rendimento igual a 80%. A energia gerada anualmente com este rendimento é igual a 75.546,24 kWh/ano.

A taxa interna de retorno do investimento foi calculada conforme a Equação 25 utilizando um período de 10 anos e o valor de tarifa utilizado foi o aplicado atualmente pela concessionária de energia, ou seja, R\$ 0,50197/kWh.

$$0 = -investimento\ inicial + \sum_{n=1}^{n=N} \frac{FC_t}{(1 + ITR)^n} \quad (25)$$

O valor da tarifa utilizado é apenas o de uso de energia elétrica (TE), pois a parcela da tarifa de utilização do sistema de distribuição (TUSD) continuará sendo paga mesmo com a compensação de energia. A Figura 17 apresenta a economia anual e o investimento inicial de cada sistema.

Tabela 17 - Investimento inicial, economia anual e taxa interna de retorno dos tipos de geração.

	Fotovoltaica	Eólica	Total
Investimento Inicial	R\$ 217.035,13	R\$ 82.068,70	R\$ 230.079,87
Economia Anual	R\$ 37.921,94	R\$ 602,36	R\$ 38.524,31
TIR	12%	-31%	5%

Fonte: Autoria própria (2018).

A TIR anual resultante do empreendimento todo em um período de 10 anos foi de 5%, se for levado em consideração apenas o sistema fotovoltaico o retorno é superior, igual a 12% ao ano. Comparando este valor com a taxa SELIC atual, igual a

6,5%, o empreendimento só é rentável utilizando somente energia fotovoltaica como forma de geração. A TIR do sistema eólico ficou negativa pois após um período de 10 anos o retorno do empreendimento não seria igual ou superior ao investimento inicial.

Utilizando o cálculo de *Payback* simples, tempo necessário para os retornos se igualarem aos investimentos, foi possível determinar que o sistema fotovoltaico teria um *Payback* de 5 anos e 8 meses, enquanto que para o sistema eólico o *Payback* seria de mais de 120 anos.

Outra maneira de averiguar a rentabilidade do sistema a ser implementado é determinar o preço do kWh de cada tipo de geração, para tal utilizou-se novamente o período de 10 anos. A Equação 41 apresenta o preço do kWh em função da geração no período estimado e o valor dos investimentos iniciais.

$$Tarifa = \frac{Investimentos\ Iniciais}{Geração\ anual \times T_{anos}} \quad (41)$$

A Tabela 18 apresenta o valor do kWh para cada um dos sistemas e o valor pago atualmente para a concessionária.

Tabela 18 - Preço do kWh de cada tipo de geração, do sistema híbrido e da concessionária de energia

Sistema Fotovoltaico	Sistema Eólico	Sistema Total	TE Concessionária
R\$ 0,28729	R\$ 6,83906	R\$ 0,3897	R\$ 0,50197

Fonte: Autoria própria (2018).

O preço da tarifa utilizando as duas formas de geração é 35% mais caro que o preço utilizando somente a geração fotovoltaica. A Tabela 19 apresenta o custo com energia elétrica de cada lote de frango considerando os diferentes preços do kWh, o consumo de cada ciclo é de 17.130 kWh.

Tabela 19 - Custo por lote de frango com energia elétrica nas diferentes configurações do sistema.

Sistema Fotovoltaico	Sistema Eólico	Sistema Total	Concessionária
R\$4.921,23	R\$117.151,96	R\$6.675,50	R\$8.598,66

Fonte: Autoria própria (2018).

5. CONCLUSÃO

A partir deste trabalho, pôde-se analisar a viabilidade técnica de instalação de um sistema de geração híbrido eólico-solar em uma propriedade rural considerando, principalmente, os aspectos econômicos referentes à implementação desse empreendimento.

Efetuada-se a análise isolada entre a geração eólica e a fotovoltaica, percebe-se que, devido à baixa velocidade do vento na região onde encontra-se a propriedade estudada, a contribuição da fonte eólica no sistema de geração tem impacto muito inferior em relação à fonte fotovoltaica, o que torna o investimento no uso de aerogeradores para a produção de energia elétrica algo pouco atrativo do ponto de vista econômico para o produtor rural, apresentando um tempo elevadíssimo para o retorno desse investimento, mesmo que seu custo inicial total seja menor comparado à outra fonte.

A utilização da fonte eólica para a geração de energia na propriedade, como pôde ser observado, tem uma modesta participação de aproximadamente 1,17% de toda a demanda de energia do imóvel, o que torna o custo por seu kWh gerado 26 vezes maior do que o kWh gerado pela a energia solar.

A geração fotovoltaica, tratando-se de um investimento inicial total 2,5 vezes maior em relação à geração eólica, tem seu emprego justificado por sua alta capacidade de produção de energia, suprimindo boa parte da energia consumida pela propriedade como fonte única de geração. O alto índice de irradiância e a possibilidade de uso de uma grande quantidade de painéis fotovoltaicos ao longo da cobertura dos galpões, promovendo o aproveitamento máximo das horas de pleno sol que correspondem a mais de 1/6 do dia para a região de Dourados, permitem uma elevada produção de energia elétrica, suprimindo cerca de 75% da demanda mensal da propriedade. Valor muito próximo ao aporte estipulado pelo proprietário para que todo o sistema híbrido fosse capaz de atender.

Como ambas as fontes não carecem de manutenção periódica de seus componentes (exceto a limpeza dos painéis para a fonte fotovoltaica) e possuem garantia e vida útil longa, a utilização de um sistema híbrido para geração de energia é rentável devido ao tempo de retorno dos investimentos ser considerado baixo e o preço do kWh ser inferior ao aplicado pela concessionária de energia. Mas, quando comparado a outros investimentos, utilizando como base a taxa SELIC, o investimento

em geração híbrida é pouco atrativo. Assim, nota-se que, para a propriedade analisada, a utilização de somente energia fotovoltaica é a configuração mais aconselhável do ponto de vista econômico, pois a geração de energia eólica, pela baixa velocidade do vento na localidade que não favorece este tipo de geração, causa uma influência negativa na rentabilidade do empreendimento do sistema híbrido na localidade.

É possível, entretanto, estudar a possibilidade de utilizar o sistema de exaustão dos barracões existentes a fim de redirecionar o ar exaurido para o rotor do aerogerador a uma velocidade média superior aos 4 m/s, promovendo uma geração maior do que a estimada neste trabalho, podendo ser alocado até mesmo mais do que um gerador eólico para o aproveitamento adequado do sistema de exaustão.

Além disso, como a base do estudo deste trabalho teve como princípio um modelo de geração conectado à rede, é possível realizar um estudo para implementação de um modelo de geração off-grid para a propriedade, incluindo a participação de investimentos por parte da concessionária de distribuição de energia visto que, em razão das indenizações passíveis de serem aplicadas a avicultores e demais produtores agropecuários onde a falta do fornecimento de energia pode gerar drásticas consequências, como a morte de animais, há a possibilidade de que o investimento nesta alternativa de geração por parte da concessionária seja considerável rentável, a fim de evitar futuros litígios e ressarcimentos em caso de falha na distribuição de energia.

Outra sugestão para trabalhos futuros seria a análise econômica do aproveitamento dos rejeitos dos frangos do aviário para a geração de energia, denominados camas de frango, através de um gerador movido a biogás. O biogás é um dos subprodutos da cama de frango misturada com água e colocada em um biodigestor por aproximadamente 40 dias. No biodigestor, bactérias se alimentam da cama de frango e formam os subprodutos. Após esse processo o biogás é levado ao gerador de energia elétrica por tubulações para ser consumido e gerar energia elétrica.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **Norma Brasileira - Instalações Elétricas de Baixa Tensão NBR 5410:2004**. Versão corrigida, 2008.

AEROGERADOR SKYSTREAM LAND. **Energia Pura**, 2018. Disponível em <https://www.energiapura.com/portfolio_posts/aerogerador-skystream-land/>. Acesso em: 05 nov. de 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica. 2. ed, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Outorgas e Registro de Geração**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/scg/gd>> Acesso em 22/05/2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2015.

BALDIN, Vitor. **Geração de energia na avicultura de corte a partir da cama de aviário**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013.

BARBOSA, Claudomiro Fábio de. **Avaliação Tecnológica, Operacional e de Gestão de Sistemas Híbridos para Geração de Eletricidade na Região Amazônica**. - 210f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará. Belém, 2006.

BELLER, Christina. Urban Wind Energy - State of the Art 2009. Risø DTU – **National Laboratory for Sustainable Energy**, Risø-R-1668(EN). Lyngby, Copenhagen, 2009.

CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPEL. **Atlas eólico brasileiro simulações 2013**. Disponível em: <novoatlas.cepel.br/index.php/atlas-online/>. Acesso em 28 set. 2018.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS À AGRICULTURA – CEPAGRI. **Vendavais**. Disponível em: <<https://www.cpa.unicamp.br/artigos-especiais/vendavais.html>>. Acesso em 10 mai. 2018.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA - CRESESB. **Energia Solar Princípios e Aplicações**. 2006. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf>. Acesso em 13 jun. 2018.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA - CRESESB. **Potencial Solar - SunData v 3.0**. 2018. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>>. Acesso em 13 jun. 2018.

CENTRO DE TECNOLOGIA DO GÁS E ENERGIAS RENOVÁVEIS – CTGAS-ER. **Aspectos Técnicos da Energia Eólica**. CTGAS-ER. Natal, 2012.

CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA FAZENDÁRIA – CONFAZ. **Convênio ICMS 16**. Brasília, 22 de abril de 2015. Disponível em: <www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2015/CV016_15> Acesso em 10 mai. 2018.

COSTA, Rafael Alves da; CASOTTI, Bruna Pretti; AZEVEDO, Rodrigo Luiz Sias de. **Um panorama da indústria de bens de capital relacionados à energia eólica**. Rio de Janeiro, BNDES Setorial, n. 29, p. 229-277, mar. 2009.

DUTRA, Ricardo Marques; PERERIA, Marcio Gianini; MONTEZANO, Bruno E. M. **Aerogeradores de pequeno porte: percepção dos produtores**. Out. 2015

NASCIMENTO, Wellington Ferreira; *et al.* Efeitos da Temperatura sobre a Soja e Milho

ENEL SOLUÇÕES. **Tudo sobre energia solar: Sistema de Monitoramento**. Disponível em: <<https://www.ensolucoes.com.br/blog/2016/03/tudo-sobre-energia-solar-parte-4-sistema-de-monitoramento-3/>>. Acesso em: 30 mai. 2018.

FLANDOLI, F. **Planejamento do Sistema Solar e Dimensionamento**. 2018. Disponível em: <https://eletricistaconsciente.blob.core.windows.net/media/2018/03/Fasciculo_6B.pdf>. Acesso em: 10 out. 2018.

GENERAL CABLE. **Cabos para instalações de energia solar fotovoltaica.** Disponível em: <<https://www.generalcable.com/assets/documents/LATAM%20Documents/Brazil%20Site/Catalogo-ExZHellent-Solar.pdf?ext=.pdf>>. Acesso em: 1 nov. 2018.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL – GWEC. **Global Wind Statistics 2016.** fev. 2017. Disponível em: <https://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats_2016_EN_WEB.pdf>. Acesso em 15 mar. 2018.

HAUSCHILD, Luciano. **Avaliação de estratégias de operação de sistemas híbridos fotovoltaico-eólico-diesel.** 117f. Dissertação (Mestrado) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

INOVACARE SOLAR, 2018. **Distribuidor Growatt no Brasil - Tecnologia.** Disponível em: <<http://www.inovacare.solar/tecnologia>>. Acesso em 30 mai. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **IEA-PVPS Snapshot2018 Edition-Figures.** Disponível em: <<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=32>>. Acesso em 12 fev. 2018.

MAILLO, L. R.; **Dimensionamento da seção ótima de cabos em sistemas FV: estudo de caso.** Disponível em: <<https://www.procobre.org/pt/wp-content/uploads/sites/4/2018/03/fv03-secao-otima-cabos-fotovoltaico.pdf>>. Acesso em 10. out 2018.

MAMEDE, João. **Instalações elétricas industriais.** 6. Ed. Belo Horizonte: LTC, 2001.

MARINOSKI, D. L.; SALAMONI, I. T.; RÜTHER, R. **Pré-dimensionamento de sistema solar fotovoltaico: Estudo de caso do edifício sede do CREA-SC – I Conferência latino-americana de construção sustentável.** X Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. São Paulo, SP, Brasil, 18 a 21 de jul. 2004.

MARTINS, F. R., GUARNIERI, R. A., PEREIRA, E. B. Aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São José dos Campos, v. 30, n. 1, p. 1304-01 – 1304-13, 2008.

MELO, Marcelo Silva de. **Energia Eólica: Aspectos Técnicos e Econômicos**. 154f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

MINHA CASA SOLAR. **High Performance Polycrystalline Module**. Disponível em: <<https://recursos.minhacasasolar.com.br/MediaCenter/Datasheet-Painel-Solar-330W-Risen-Solar-RSM72-6-330P-em-ingl%C3%AAs.pdf>>. Acesso em 27 out. 2018.

MINHA CASA SOLAR. **Painel Solar 330W Risen Solar – RSM72-6-330P**. Disponível em: <<https://www.minhacasasolar.com.br/produto/painel-solar-330w-risen-solar-rsm72-6-330p-79313>>. Acesso em: 12 jun. 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Brasil lança Programa de Geração Distribuída com destaque para energia solar**. Disponível em: http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/programa-de-geracao-distribuida-preve-movimentar-r-100-bi-em-investimentos-ate-2030. Acesso em: 21 abr. 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Energia Solar no Brasil e Mundo**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/17+-+Energia+Solar+-+Brasil+e+Mundo+-+ano+ref.+2015+%28PDF%29/4b03ff2d-1452-4476-907d-d9301226d26c?version=1.3>>. Acesso em: 10 mai. 2018.

MÜLLER, Matheus do Nascimento. **Projeto de uma turbina eólica de eixo horizontal**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.

NASCIMENTO, Wellington Ferreira; *et al.* Efeitos da Temperatura sobre a Soja e Milho no Estado de Mato Grosso do Sul. **8º ECAECO**. Pontaporã, n. 8, p. 1-15, 2016. Disponível em: <<http://www.anaisonline.uems.br/index.php/ecaeco/article/view/3132>>. Acesso em: 9 out. 2018.

PATEL, Mukund R. **Wind and Solar Power System**. CRC Press LLC. Boca Raton, Florida, 2006.

PEREIRA, E. B. ET AL. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. Brasil: INPE, 2006.

PICOLO, A. P., BÜHLER, A. J., RAMPINELLI, G. A. Uma abordagem sobre a energia

eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 36, n. 4, p. 4306-01 – 4306-13, 2014.

PINHO, João Tavares. **Sistemas Híbridos, Soluções Energéticas para a Amazônia**. Ministério de Minas e Energia (MME). Brasília, 2008.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, 2014.

PORTAL BRASIL. Cidadania e Justiça: **Programa incentiva pequenos agricultores a gerarem energia eólica e solar**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/cidadania-e-justica/2015/11/programa-facilita-custo-de-energia-solar-e-eolica-para-agricultores-familiares>> Acesso em: 20 abr. /2017.

PORTAL SOLAR. **Tipos de Painel Solar Fotovoltaico**. Disponível em: <<http://.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 10 mai. 2018.

PORTAL SOLSTÍCIO ENERGIA, 2016. Entenda: **Medidor e Sistema de Monitoramento**. Disponível em: <<https://www.solsticioenergia.com/2016/09/15/o-que-sao-medidor-monitoramento/>>. Acesso em: 30 mai. 2018.

PUCCINI, Abelardo De Lima. **Matemática Financeira - Objetiva e Aplicada**, 9ª Ed. Elsevier – Campus, 2011.

PRYSMIAN GROUP. **Catálogos & Utilitários**. Disponível em: <https://br.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Guia_Dimensionamento_Baixa_Tensao.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2018.

ROHATGI, J. S., NELSON, Vaughn. **Wind Characteristics – an analysis for the generation of Wind power, Alternative Energy Institute**. West Texas A&M University, Texas, 1994.

SCHUMANN, Jó Henrique Palma. **Procedimento para avaliação do potencial eólico. Estudo de caso: Região do entorno do reservatório da Usina Hidroelétrica de Estreito**. 94f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Itajubá.

Itajubá, 2014.

SILVA, Eduardo Teixeira da; JÚNIOR, Carlos Reisser; AZEVEDO, Rodrigo M. **Estudo da geração distribuída em rede rural monofilar de retorno por terra (MRT) e os impactos socioeconômicos ambiental.** Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, Florianópolis, v. 4, p. p.588-600, dez. 2015. ISSN 2238-8753.

SOLAR VOLT. **Inversor Solar: Tudo Que Você Precisa Saber.** Disponível em: <http://www.solarvoltenergia.com.br/inversor-solar/>. Acesso em: 30 mai.2018.

TESTER, Jefferson W.; MODELL, Michael. ***Thermodynamics and its Applications.*** Nova Jersey: Editora Prentice Hall, USA, 1997.

TIEPOLO, Gerson Máximo. **Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no estado do Paraná.** 2015. Tese (doutorado), Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas – PPGEPS, Curitiba, 2015.

TIBOLA, Gabriel. **Sistema eólico de pequeno porte para geração de energia elétrica com rastreamento de máxima potência.** 285f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica.** Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro, 2016.

WALTER, Arnaldo. **Fomento à geração elétrica com fontes renováveis de energia no meio rural brasileiro: barreiras, ações e perspectivas.** Em: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL. 3. Campinas, 2000.