

DAVI JOSÉ DE GRANDI

COMPARATIVO TÉCNICO-ECONÔMICO ENTRE SISTEMAS DE  
GERAÇÃO EÓLICA, FOTOVOLTAICA E HÍBRIDA EÓLICA  
FOTOVOLTAICA CONECTADOS À REDE EM PROPRIEDADE RURAL

CASCADEL  
PARANÁ – BRASIL  
JUNHO - 2022

DAVI JOSÉ DE GRANDI

COMPARATIVO TÉCNICO-ECONÔMICO ENTRE SISTEMAS DE  
GERAÇÃO EÓLICA, FOTOVOLTAICA E HÍBRIDA EÓLICA  
FOTOVOLTAICA CONECTADOS À REDE EM PROPRIEDADE RURAL

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira

Coorientador: Dr. Carlos Eduardo Camargo

Nogueira

CASCADEL  
PARANÁ – BRASIL  
JUNHO – 2022

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

De Grandi, Davi José

Comparativo técnico-econômico entre sistemas de geração eólica, fotovoltaica e híbrida eólica fotovoltaica conectados à rede em propriedade rural. / Davi José De Grandi; orientador Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira; coorientador Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira. -- Cascavel, 2022.

50 p.

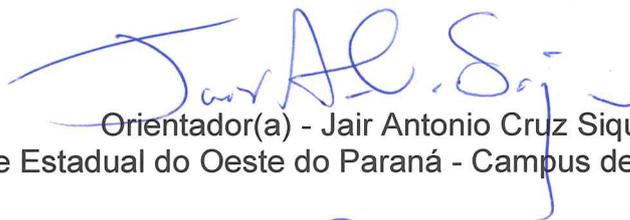
Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2022.

1. energia renovável. 2. solar. 3. aerogeração. I. Siqueira, Dr. Jair Antonio Cruz, orient. II. Nogueira, Dr. Carlos Eduardo Camargo, coorient. III. Título.

**DAVI JOSE DE GRANDI**

Comparativo técnico-econômico entre sistemas de geração eólica, fotovoltaica e híbrida eólica fotovoltaica conectados à rede, em propriedade rural

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes renováveis e racionalização de energia na agroindústria e agricultura, APROVADO pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a) - Jair Antonio Cruz Siqueira  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Maritane Prior  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Silmara Dias Feiber  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus de Toledo (UTFPR)



Fulvio Natercio Feiber  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus de Toledo (UTFPR)

Cascavel, 30 de junho de 2022

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Divisão do setor energético brasileiro (ALVES, ROBERTO, 2010) .....	3
Figura 2: Usina eólica (BURTON et al., 2001).....	6
Figura 3: Distribuição dos ventos no planeta (AMARANTE et al., 2001).....	8
Figura 4: Mapa de velocidade do vento no Paraná a 75 m (CAMARGO E SCHUBERT, 2007) .....	9
Figura 5: Corte esquemático de turbina eólica de eixo horizontal (ANEEL, 2005) ....	10
Figura 6: Irradiação solar média no Brasil (PEREIRA, 2006 apud PINHO; GALDINO, 2014). .....	11
Figura 7: Célula fotovoltaica de silício (PINHO; GALDINO, 2014) .....	12
Figura 8: Localização de Corbélia - PR. (SUPORTE GEOGRÁFICO, 2022) .....	16
Figura 9: Recorte de vista superior da propriedade (GOOGLE, 2022).....	17
Figura 10: Variação da irradiação solar mensal no município de Corbélia (CRESESB, 2022) .....	17
Figura 11: Dados de vento para o local (CRESESB, 2021) .....	18
Figura 12: Módulo fotovoltaico KuMax CS3U-360P (CANADIAN SOLAR, 2021) .....	19
Figura 13: Aerogerador E-20 (RYSE ENERGY, 2022).....	20
Figura 14: Curva de potência do aerogerador E-20. (Ryse Energy 2022) .....	20
Figura 15: Inversor Fronius Eco 25.0-3-S (FRONIUS, 2022) .....	21
Figura 16: String box Cfb-6e-6s-1100dc. (DEHN, 2022) .....	22
Figura 17: Histograma da produção de energia solar .....	28
Figura 18: Saldo acumulado do investimento fotovoltaico durante sua vida útil.....	30
Figura 19: Distribuição de Weibull para a localidade.....	31
Figura 20: Histograma da subprodução de energia solar.....	34

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações técnicas do módulo fotovoltaico.....	19
Tabela 2: Especificações técnicas do Aerogerador E-20 .....	20
Tabela 3: Especificações técnicas do inversor Fronius Eco 25.0-3-S.....	21
Tabela 4: Especificações técnicas da string box Cfb-6e-6s-1100dc .....	22
Tabela 5: Consumo de energia mensal do imóvel (kWh/mês) .....	22
Tabela 6: Dimensionamento do sistema fotovoltaico .....	28
Tabela 7: Custo sistema fotovoltaico.....	29
Tabela 8: <i>Payback</i> descontado do sistema fotovoltaico .....	30
Tabela 9: Produção de energia do sistema eólico.....	32
Tabela 10: Custo do sistema eólico .....	32
Tabela 11: <i>Payback</i> descontado do sistema eólico.....	33
Tabela 12: Dimensionamento do subsistema fotovoltaico .....	34
Tabela 13: Custo do sistema híbrido.....	35
Tabela 14: <i>Payback</i> descontado do sistema híbrido .....	36

DE GRANDI, Davi José. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, junho de 2022. **Comparativo técnico-econômico entre sistemas de geração eólica, fotovoltaica e híbrida eólica fotovoltaica conectados à rede em propriedade rural.** Professor Orientador: Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi verificar qual dos três sistemas de geração de energia renovável (eólica, fotovoltaica e híbrido eólica fotovoltaica) conectados à rede de distribuição, apresentou maior eficiência economicamente em uma propriedade rural no município de Corbélia – PR. A propriedade possui dois aviários, que juntos abrigam 47.700 aves. Para atender a demanda dos aviários, foram instalados 248 módulos fotovoltaicos de 360 W que possuem capacidade de geração de 126.239 kWh/mês. Para a avaliação dos sistemas de geração de energia, foi avaliado o sistema fotovoltaico presente na propriedade e dimensionado um sistema eólico e outro híbrido eólico-fotovoltaico para o local, bem como levantados todos os custos de cada um. Foram analisados ainda os dados de geração destes e calculado o custo evitado de cada alternativa por meio do método do prazo de retorno descontado (*payback* descontado), que apresenta o tempo necessário para o investimento gerar retorno financeiro. Como resultado, observou-se que somente o sistema fotovoltaico foi economicamente viável, apresentando tempo de retorno de 10 anos e saldo financeiro de R\$ 496.431,51 ao final da garantia de 25 anos do sistema. O sistema eólico não obteve retorno, apresentando saldo negativo de R\$ -595.936,55 ao final de sua vida útil de 20 anos; tampouco a solução híbrida, que ao final da vida útil de também 20 anos, teve retorno negativo com saldo de R\$ -18.298,03.

**PALAVRAS-CHAVE:** energia renovável; solar; aerogeração; rede.

DE GRANDI, Davi José. Western Paraná State University, June 2022. **Technical-economic comparison between wind, photovoltaic and hybrid photovoltaic-wind power generation on-grid system, in rural property.** Teacher advisor: Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira.

## **ABSTRACT**

This paper aimed to verify which on-grid renewable energy system, considering three options (wind, photovoltaic and hybrid photovoltaic-wind) is the most suitable for a rural property in Corbélia – PR. This property consists in two chicken coops that keep 47.700 birds and have a system of 248 solar panels, 360 W each, which generates 13.472,35 kWh/month of energy. After designing a wind energy system and a hybrid photovoltaic-wind one, as well surveying all the costs related, the data was analyzed and their avoided costs calculated, using the discounted payback period methodology, that shows the period necessary for each solution to start giving profit. As results, only the photovoltaic system is economically viable, it starts giving profit after 10 years and its financial balance is 496.431,51 by the end of its 25 years warranty. The wind energy system did not return its investment, presenting a negative R\$ 595.936,55 balance by the end of its 20 years lifespan; as well as the hybrid solution, whose balance at its 20 years lifespan's end is R\$ -18.298,03.

**KEYWORDS:** renewable energy, solar; wind generation, grid.

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1.	Objetivos.....	2
1.1.1.	Objetivo Geral.....	2
1.1.2.	Objetivos Específicos.....	2
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>3</b>
2.1.	Setor energético nacional.....	3
2.2.	Impacto ambiental na produção energética.....	4
2.3.	Energias renováveis.....	5
2.4.	Energia eólica.....	6
2.4.1.	Dinâmica dos ventos.....	7
2.4.2.	Captação de energia eólica.....	9
2.5.	Energia solar.....	10
2.5.1.	Células fotovoltaicas.....	12
2.5.2.	Degradação de células fotovoltaicas.....	13
2.5.3.	Coletores solares.....	13
2.6.	Sistemas híbridos.....	13
2.6.1.	Potencial de um sistema híbrido na localidade.....	15
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>16</b>
3.1.	Localização da área experimental.....	16
3.2.	Características da irradiação Solar Anual no Local do Experimento.....	17
3.3.	Características da Velocidade do Vento no Local do Experimento.....	18
3.4.	Especificações Técnicas dos Equipamentos Utilizados no Experimento.....	19
3.4.1.	Especificações Técnicas dos Módulos Fotovoltaicos Utilizados.....	19
3.4.2.	Especificações Técnicas do Aerogerador Utilizado.....	19
3.4.3.	Especificação dos Inversores Utilizados.....	21
3.4.4.	Especificação das String Boxes Utilizadas.....	22
3.5.	Características de Demanda Energética Considerada no Experimento.....	22
3.6.	Dimensionamento dos Sistemas.....	23

3.6.1. Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede .....	23
3.6.2. Dimensionamento do Sistema de Geração Eólica Conectado à Rede ....	24
3.6.3. Dimensionamento do Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico Conectado à Rede.....	26
3.7. Determinação de Custos .....	26
3.7.1. Determinação da Viabilidade Econômica de Cada Sistema .....	26
3.8. Avaliação Técnico-Econômica Comparativa Entre os Sistemas Fotovoltaico, Eólico e Eólico-Fotovoltaico Conectado à Rede .....	27
<b>4 Resultados e discussão .....</b>	<b>28</b>
4.1. Sistema fotovoltaico.....	28
4.1.1. Dimensionamento do Sistema de Geração Fotovoltaica Conectado à Rede.....	28
4.1.2. Cotação do Sistema Fotovoltaico.....	29
4.1.3. Retorno Financeiro do Sistema Fotovoltaico.....	29
4.2. Sistema Eólico .....	31
4.2.1. Dimensionamento do Sistema de Geração Eólica Conectado à Rede ....	31
4.2.2. Cotação do Sistema Eólico .....	32
4.2.3. Retorno Financeiro do Sistema Eólico .....	33
4.3. Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico .....	33
4.3.1. Dimensionamento do Sistema de Geração Híbrido Eólico-Fotovoltaico Conectado à Rede .....	33
4.3.2. Cotação do Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico .....	35
4.3.3. Retorno Financeiro do Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico .....	35
4.4. Discussão .....	36
<b>5 Conclusões.....</b>	<b>38</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A energia é o produto base para todo o desenvolvimento tecnológico humano, e quanto mais desenvolvida uma sociedade, maior seu consumo energético. Nos últimos anos, a maior parte da matriz energética mundial é baseada em combustíveis fósseis, porém, uma vez que esses recursos são finitos, eventualmente este sistema se tornará falho. Com isso, se fortalece a pesquisa e o desenvolvimento das chamadas energias renováveis, que utilizam de recursos naturais não finitos para obtenção de energia (DAL PONTE, 2017).

Desde a crise do petróleo, na década de 1970, a utilização da energia solar fotovoltaica e a energia eólica tem crescido significativamente (SIQUEIRA, 2005). Embora renovável, a energia pode ter grandes impactos naturais, como é o caso da energia hidrelétrica, parte majoritária da produção energética brasileira (MIRANDA, 2018). Muitas vezes, para explorar o potencial hidrelétrico de um corpo de água, é necessário represá-lo. E dependendo da grandeza do empreendimento, pode tomar dimensões monumentais, causando impactos no ambiente que está situada, não só pela perda e alagamento de áreas naturais e até de ocupação humana, mas também pelas mudanças climáticas causadas por um novo corpo de água no local.

Por outro lado, outras fontes alternativas como a energia eólica e a energia solar apresentam impactos bem menores, resumidos basicamente à área onde os geradores se encontram, apresentando assim alternativa válida para regiões com potencial energético aproveitável. Também se caracterizam por serem uma exploração flexível, implementada tanto em usinas com vários geradores de tamanho suficiente para abastecer cidades, quanto geradores domésticos que possibilitam a redução de consumo de energia proveniente da rede pública (MIRANDA, 2018).

Entretanto, diferentemente de uma hidrelétrica com grande energia potencial represada, estas formas de captação se mostram irregulares, sendo dependentes da situação do tempo no local no momento da captação. Assim, implementar sistemas híbridos, de geração tanto eólica quanto solar, podem ser alternativas quanto a complementariedade e formem uma solução mais viável economicamente para o consumidor final.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Realizar avaliação comparativa da viabilidade de implantação entre sistemas de geração de energia eólica, fotovoltaica e híbrido eólico-fotovoltaico conectados à rede de distribuição.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- a) Dimensionar três sistemas de geração de energia elétrica: fotovoltaico, eólico e híbrido eólico-fotovoltaico;
- b) Avaliar as diferenças técnicas entre os sistemas;
- c) Avaliar economicamente os três sistemas dimensionados;

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Setor energético nacional

No âmbito energético, o Brasil possui algumas vantagens em relação à maioria dos outros países, sejam elas naturais ou resultado do trabalho nacional no setor. Tolmasquim (2011) cita a relevância internacional do país nas áreas de prospecção de petróleo em águas profundas, na produção de etanol a partir de vegetais, a grande presença de geração hidrelétrica, o aumento exponencial na geração de energia eólica, o amplo e integrado sistema de distribuição de energia elétrica e a grande renovabilidade de sua matriz energética, seja para combustíveis ou produção elétrica.

A matriz energética brasileira tem 45,3% de proveniência renovável, sendo assim, uma das matrizes mais renováveis do mundo industrializado. No contexto de energia elétrica, 75% da produção é proveniente de usinas hidrelétricas. Entretanto, 37,7% de toda a energia produzida no país ainda é dependente de petróleo e seus derivados (Figura 1), o que causa, além de poluição, dependência energética de outros países, uma vez que, mesmo autossuficiente em produção, o Brasil ainda não possui tecnologia de refino suficiente (ALVES, ROBERTO; 2010).

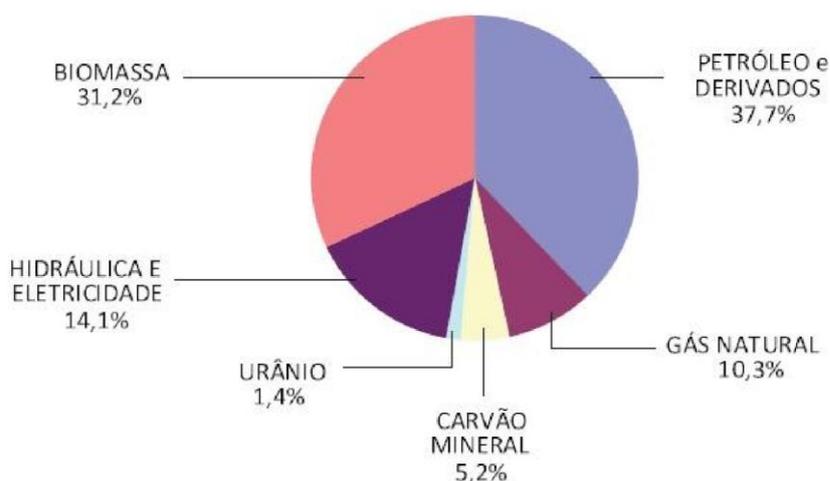


Figura 1: Divisão do setor energético brasileiro (ALVES, ROBERTO, 2010)

Segundo Dal Ponte (2017), a crescente poluição causada pela geração de energia a partir de combustíveis fósseis, o inevitável esgotamento destes e o aumento da demanda de energia como um todo, são causas de incentivos à diversificação da matriz energética nacional.

É estimado que a energia eólica no Brasil tem potencial de 143 GW, o equivalente a dez usinas hidrelétricas de Itaipu. Já existem usinas do gênero instaladas nos estados do Ceará, Minas Gerais, Pará, Paraná, Pernambuco e Rio de Janeiro, mas, estas ainda exploram pouco do potencial total (PARIZOTTO, 2014). Já o potencial solar no país é bastante expressivo comparado a outros países, devido à sua posição geográfica. O destaque é a região nordeste, que chega a índices de 2190 kWh/m<sup>2</sup> por ano de insolação (PACHECO, 2009).

## **2.2. Impacto ambiental na produção energética**

O conhecimento dos impactos ambientais provenientes de geração de energia é primordial para a análise de implementação de projetos e planejamentos energéticos, uma vez que interferem no desenvolvimento sustentável (INATOMI et al, 2005).

O impacto ambiental causado por um gerador de energia pode ser de dois tipos: o direto que é relativo ao local de instalação do sistema, e o indireto que está relacionado à energia gasta na indústria para fabricar o sistema (MIRANDA, 2018). A queima de combustíveis fósseis também polui quando libera gases agressores à atmosfera, intensificando o efeito estufa e aumentando a temperatura em escala global. Mesmo fontes renováveis podem ter grandes impactos ambientais quando exploradas, como uma usina hidrelétrica que represa uma quantidade exacerbada de água para garantir a sua produção, e, portanto, acaba mudando o clima da região por meio da umidade e alagando áreas habitadas por pessoas e pela fauna e flora locais.

A geração termoelétrica, que consiste na queima de combustíveis ou uso de radiação para produção de vapor e movimentação de turbinas, causa impactos ambientais de duas principais maneiras. Primeiro, o aquecimento de corpos d'água próximos (utilizados para condensar o vapor) e consequente alteração no habitat de fauna e flora local. Segundo, a liberação de grande quantidade de poluentes atmosféricos provenientes da queima de combustíveis, que alteram o clima, prejudicam a saúde a quem são expostos e, quando dissolvidos em água, alteram a acidez desta, novamente interferindo na biota aquática (INATOMI et al., 2005). Nas usinas termonucleares, que substituem a queima de combustíveis pela fissão nuclear, é importante considerar ainda o risco de vazamento do material radioativo, o que causaria grandes impactos ambientais e até genéticos na vida ao entorno da usina,

como observado nos mais notórios acidentes de Chernobyl, na então União Soviética, e Fukushima, no Japão.

A produção de energia solar apresenta impactos ambientais na fase de fabricação dos módulos, que por vezes utiliza de produtos ácidos e cancerígenos; na possível perda de habitats para a instalação dos módulos; no impacto visual do sistema instalado e descarte de baterias ao final de sua vida útil. Entretanto, não causa impactos durante a produção de energia, configurando uma fonte sustentável (INATOMI et al, 2005).

A captação eólica, assim como a solar, ocupa um espaço relativamente pequeno e não tem grande influência no ambiente onde inseridas. O fato de necessitarem baixa manutenção também diminui o impacto, uma vez que não exigem uso de muitos produtos industrializados para mantê-las. Por outro lado, a presença de aerogeradores pode causar acidentes com aves locais, além de gerar ruído constante e apresentar considerável impacto visual (PARIZOTTO, 2014). Inatomi et al. (2005) ainda citam como impactos a presença de sombras dos geradores nos arredores, alterando a disponibilidade de sol em áreas possivelmente habitadas ou de cultivo; a interferência das turbinas em ondas eletromagnéticas e conseqüentemente nos sistemas de comunicação dependentes delas; e alteração na circulação de ventos, com variação no clima do local.

### **2.3. Energias renováveis**

Define-se energias renováveis como provenientes dos ciclos naturais da energia fornecida pelo Sol, portanto se configuram como inesgotáveis e não alteram o balanço térmico do planeta, diferentemente das fontes fósseis (PACHECO, 2006).

A crise do petróleo nos anos 70 do século vinte evidenciou a grande fragilidade e dependência da matriz energética mundial em combustíveis fósseis. Com isto em vista e prevendo uma futura escassez e conseqüente aumento de custo do petróleo, iniciaram-se grandes incentivos ao desenvolvimento da exploração de fontes renováveis, uma vez que estas são inesgotáveis e muitas vezes de exploração mais barata, provando-se solução para problemas como fim de reservas de combustíveis não renováveis e aumento de demanda de energia em países em desenvolvimento (DINCER, 1999).

Pacheco (2006) defende que a diversificação da matriz energética de um país traz segurança para o desenvolvimento deste, uma vez que cria independência de

preços de combustíveis ofertados por outros países e garante fornecimento contínuo de energia, apesar de adversidades climáticas. Os principais exemplos de energias renováveis disponíveis no Brasil são:

- a) Hídrica, proveniente da movimentação de massas de água devido à gravidade, de um ponto mais alto de um leito de rio até um mais baixo. É amplamente explorada no país por meio de usinas hidrelétricas das mais variadas dimensões, constituindo a maior porcentagem de geração de energia elétrica no Brasil.
- b) Biomassa, energia química proveniente de materiais orgânicos. A energia pode ser extraída do material orgânico bruto, como na queima de madeira, ou a partir de seus derivados, como na combustão de biocombustíveis. O gás carbônico (CO<sub>2</sub>) liberado no consumo da matéria orgânica tende a ser capturado pelos vegetais e utilizado no processo de fotossíntese, renovando a biomassa e sem alterar a composição da atmosfera a longo prazo.
- c) Eólica (descrita a seguir).
- d) Solar (descrita a seguir).

#### 2.4. Energia eólica

Pacheco (2006) define energia eólica como a energia cinética das massas de ar, provocada pelo aquecimento irregular dessas massas pelo Sol, que gera deslocamento entre elas. É gerada por aerogeradores (turbinas eólicas), de dimensões residenciais (em torno de 500 kWh/mês) até grandes usinas (acima de 5 MWh/mês) (Figura 2).



Figura 2: Usina eólica (BURTON et al., 2001)

É uma forma de obtenção de energia totalmente renovável e limpa que não produz nenhum poluente durante a captação, utilizada pela humanidade por meio de moinhos de vento há mais de 3000 anos (DAL PONTE, 2017). Os usos primários mais comuns foram bombeamento de água e moagem de grãos. O interesse em geração elétrica somente deslanchou na década de 1970, causado pela crise internacional do petróleo, com a primeira turbina ligada à rede pública de energia sendo instalada na Dinamarca em 1976 (ANEEL, 2005).

No Brasil, a energia eólica foi regulada em 2009 devido a política de diversificação da matriz energética nacional, e seus preços se tornam cada vez mais competitivos (DAL PONTE, 2017). No âmbito nacional, esta forma de energia vem aumentando exponencialmente sua participação na matriz energética e diminuindo seus custos com muita agilidade. Entre os anos de 2005 e 2011, o custo dessa modalidade de produção caiu a um terço, refletindo num surpreendente aumento na produção (30 MW em 2004 contra 8000 MW em 2016) e gerando interesse de indústrias internacionais do setor no mercado nacional, a ponto de se prever 7% de participação desta modalidade em toda a produção energética nacional no ano de 2020 (TOLMASQUIM, 2011). Apesar do crescimento constante, a participação da energia eólica na matriz nacional ainda é pouco expressiva, principalmente considerando o potencial explorável deste recurso no país. Martins et al. (2007) defende que a pesquisa científica em âmbito nacional é essencial para a geração de informações sobre o recurso no país, que servirão de base para a implantação em maior escala desta forma de geração.

#### **2.4.1. Dinâmica dos ventos**

As massas de ar se movimentam devido a diferenças de pressão na atmosfera, estas causadas pelo aquecimento irregular do planeta pelo sol (equador recebe mais radiação que os polos). Assim, o ar mais quente tende a subir, e o mais frio descer, criando padrões de movimentação, que são também influenciados pela rotação da Terra e a fricção com sua superfície irregular. Apresenta-se uma simplificação desta dinâmica na Figura 3.

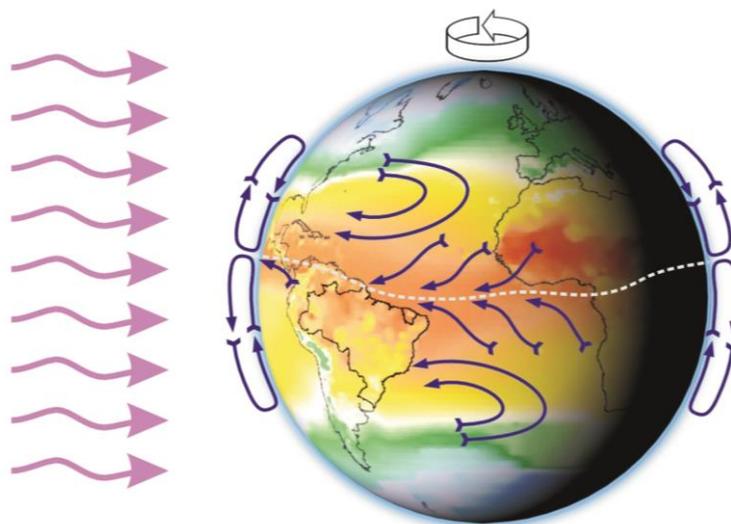


Figura 3: Distribuição dos ventos no planeta (AMARANTE et al., 2001)

Diferentemente de outras fontes renováveis como a hidroeletricidade de represas, a energia eólica não é captada constantemente, devido à inconsistência da presença de rajadas de vento. Ter conhecimento das características eólicas de dada localidade, por meio de levantamentos históricos, é essencial para estudar a viabilidade da exploração desta energia na região. Manwell et al. (2009) classifica estas variações, seja em função da topografia local e direção, ou em detrimento do decorrer do tempo. Neste último âmbito, as variações podem ser:

- a) Interanuais: ocorrem em escalas de tempo superiores a um ano, e são essenciais para estudar a viabilidade de um sistema de captação a longo prazo. Para determinar com precisão um clima são necessários 30 anos de dados, e para velocidade média anual de ventos, ao menos cinco.
- b) Anuais: são relacionadas às estações climáticas, que influenciam as velocidades dos ventos durante os meses de um ano. Na maior parte do globo, observa-se discrepância significativa entre os meses, alterando o potencial eólico.
- c) Diárias: causadas pelo ciclo de radiação diário, tipicamente mais ventos durante o dia (aquecimento do ar pelo sol) e diminuição à noite, especialmente durante primavera e verão.
- d) De curto período: durante períodos de dez minutos ou menos, englobam rajadas e turbulências. São de importante análise no contexto de captação de energia devido ao estresse físico que causam nos aerogeradores (carga máxima, fadiga, etc.).

Todas estas variações impactam a possível captação de energia eólica em determinado local, fazendo com que levantamentos de dados históricos sejam essenciais para prever a viabilidade econômica de um empreendimento do tipo. Segundo o Atlas do Potencial Eólico do Estado do Paraná (2007), a região em questão (arredores do município de Cascavel) é um dos destaques em potencial eólico do estado (Figura 4).

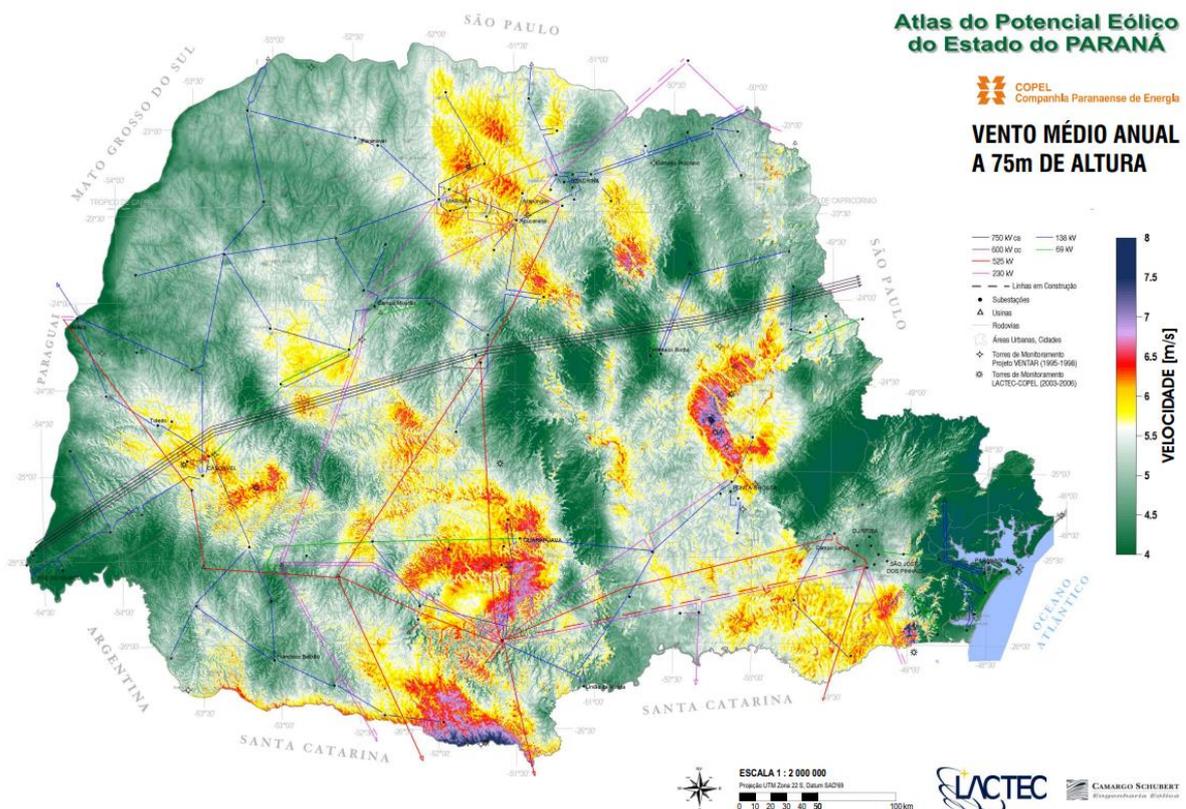


Figura 4: Mapa de velocidade do vento no Paraná a 75 m (CAMARGO E SCHUBERT, 2007)

Com ventos médios entre 6,5 e 7 m/s a 75 m; a região é, inclusive, bem servida de conexões com sistema de transmissão elétrica estadual.

#### 2.4.2. Captação de energia eólica

Os aerogeradores consistem em equipamentos capazes de transformar a energia cinética das massas de ar em movimento em energia elétrica, utilizando um gerador elétrico em seu interior, comumente acoplado a uma caixa de engrenagens.

Com o desenvolvimento da indústria, as turbinas de eixo horizontal de três pás se tornaram o modelo padrão, em detrimento das de eixo vertical, devido a algumas características: possível controle do ângulo de ataque das pás, que define velocidade do rotor e saída de potência (além de fornecer maior estabilidade para a

estrutura); formato das pás passível de otimização aerodinâmica; aproveitamento de tecnologia de hélices de outras ciências (aeronáutica, naval); maior estabilidade possibilita maiores alturas e conseqüentemente alcançar ventos mais fortes; maior eficiência devido ao ângulo perpendicular ao vento. Estes benefícios são suficientes para cobrir as desvantagens do modelo horizontal, que seriam a necessidade de um sistema de controle de direção da turbina; e a construção de estruturas mais resistentes para suportar as maiores capacidades produtivas (PINTO, 2013). Um corte esquemático de um gerador de eixo horizontal é mostrado na Figura 5.

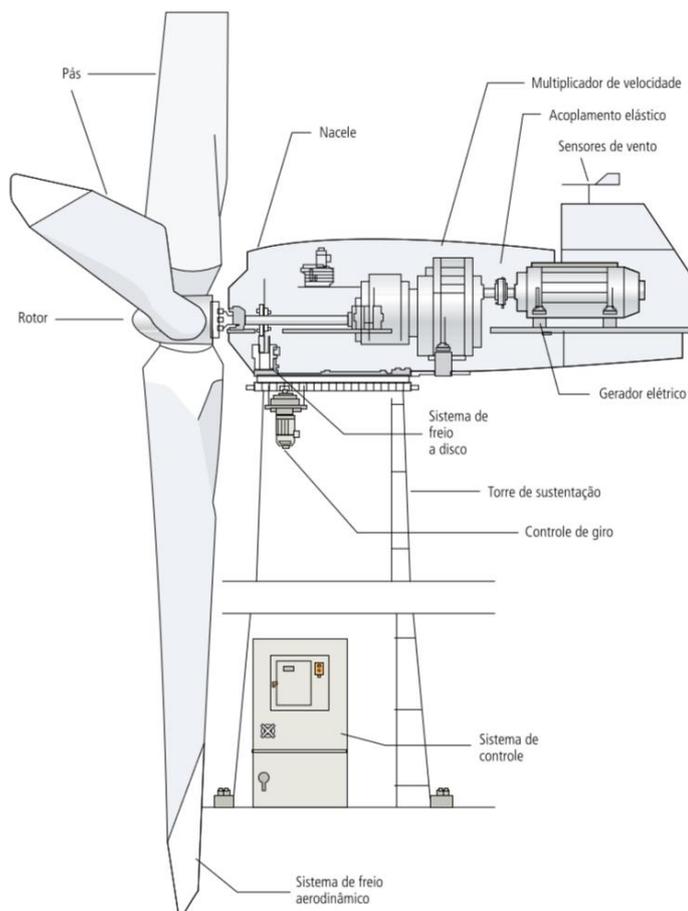


Figura 5: Corte esquemático de turbina eólica de eixo horizontal (ANEEL, 2005)

Após gerada, a energia elétrica é encaminhada a um transformador pela estrutura da torre, mudando de corrente contínua para alternada, e então entrando na rede de distribuição.

## 2.5. Energia solar

Segundo Pacheco (2006), é a energia capturada diretamente da radiação solar por meio de módulos fotovoltaicos ou boilers de aquecimento de fluidos, ou seja, transformada em energia elétrica ou aquecimento. Sua viabilidade varia de acordo

com a insolação média anual do local, e o Brasil, por se localizar no centro do globo e quase inteiramente dentro dos trópicos principais, possui grande disponibilidade deste recurso.

Estima-se que a média do fluxo energético anual que a Terra recebe do Sol é de  $1367 \text{ W/m}^2$ . Mesmo depois de descontadas as perdas por reflexão e absorção pela superfície e pela atmosfera, 94 mil TW poderiam ser aproveitados, o que seria equivalente a todo o consumo energético anual da humanidade em somente duas horas, o que demonstra o enorme potencial da exploração da energia solar. Devido ao movimento de translação da Terra em torno do Sol e a inclinação relativa destes astros ( $23,45^\circ$ ), as regiões próximas do equador são privilegiadas no recebimento de radiação, com destaque no Brasil para a região centro-nordeste (Figura 6).

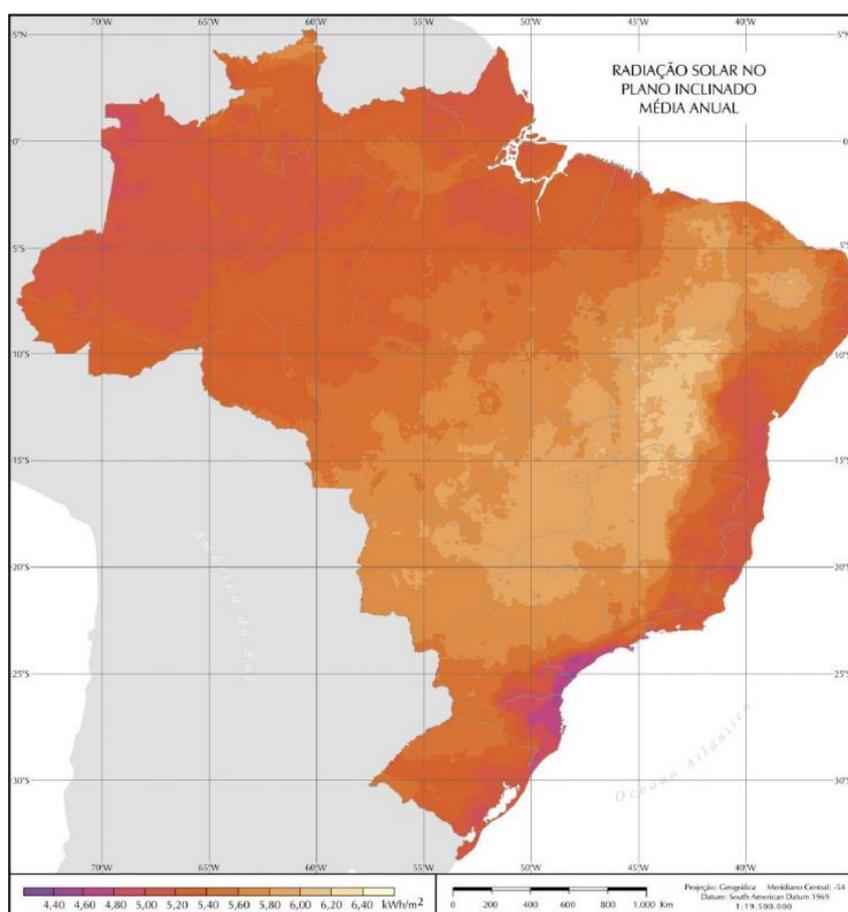


Figura 6: Irradiação solar média no Brasil (PEREIRA, 2006 *apud* PINHO; GALDINO, 2014).

Em 2012, a capacidade instalada de energia solar no país estava entre 30 e 40 MWp, valor considerado baixo. Porém, com o advento do barateamento dos equipamentos e difusão da microgeração residencial, a tendência é este valor aumentar constantemente (PINHO; GALDINO, 2014).

### 2.5.1. Células fotovoltaicas

As células fotovoltaicas, unidade fundamental da captação da energia luminosa do sol (fótons), são constituídas por semicondutores, principalmente silício (Figura 7). O efeito fotovoltaico foi primeiro observado por Edmond Becquerel, e consiste no surgimento de diferença de potencial nos terminais de uma célula eletroquímica devido a absorção de luz (PINHO; GALDINO, 2014).

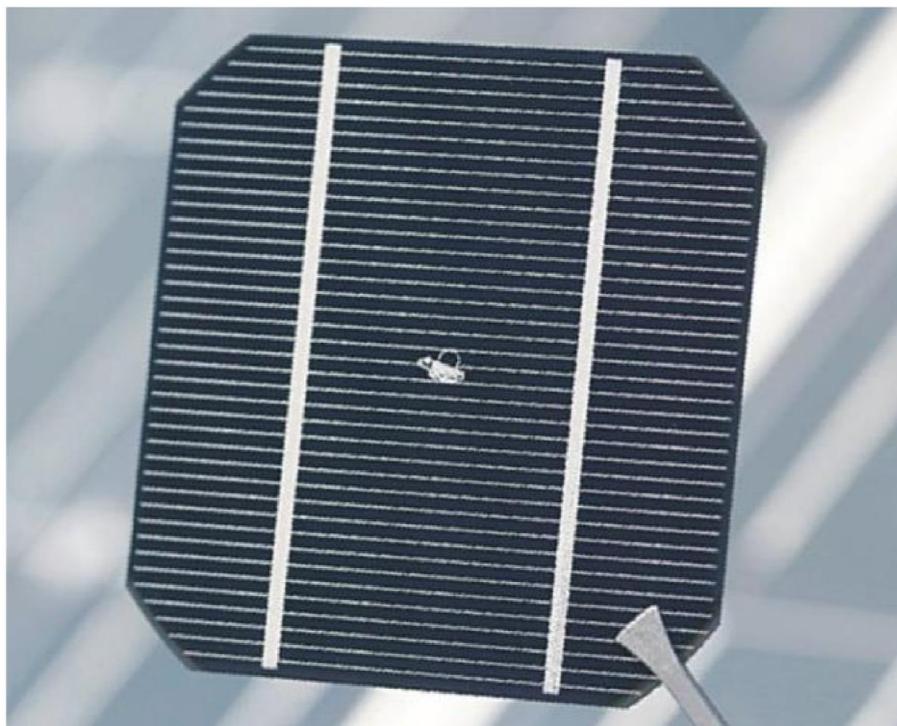


Figura 7: Célula fotovoltaica de silício (PINHO; GALDINO, 2014)

Tiwari, et al. (2016) expõe que perdas de radiação devido a reflexão dos raios solares são reduzidas por meio do uso de camadas antirreflexivas nos módulos, bem como texturas mais rugosas, que aumentam a absorção. O autor divide esta tecnologia em três gerações, de acordo com o grau de desenvolvimento do setor:

- Primeira geração: baseados em silício, possuem eficiência teórica de 33%, mas na prática gira em torno de 15-20%. Sua fabricação consome muitos recursos, e são amplamente a geração mais comum no mercado.
- Segunda geração: são as células amorfas, diferente das cristalinas da primeira geração. São menos eficientes, mas também mais baratas, o que as tornam mais viáveis em certas aplicações.
- Terceira geração: consistem em células de segunda geração melhoradas, com características mais avançadas, como melhor coeficiente de absorção, mas mantendo seu preço mais próximo da geração anterior do que da primeira.

Uma vez que uma única célula solar não tem capacidade de alimentar a maioria das aplicações de interesse, elas são conectadas em série para formar módulos fotovoltaicos, onde o número de conexões define a quantidade de energia fornecida pelo módulo. A voltagem gerada por uma rede de módulos aumenta com o número destes conectados em série, e a corrente, com as ligações em paralelo.

### **2.5.2. Degradação de células fotovoltaicas**

Ainda segundo Tiwari et al. (2016), ela ocorre de duas formas:

- Acúmulo de poeira: afeta o desempenho dos módulos pois bloqueia a entrada da radiação solar nestes. Este problema é agravado em módulos com superfícies mais rugosas, pouco inclinados, e que recebem ventos mais lentos.
- Envelhecimento: a performance das células degrada com o tempo, e este ritmo de degradação depende da qualidade dos materiais utilizados na fabricação. Os causadores são as condições meteorológicas, mudanças de temperatura, chuva etc, e filtros de luz ultravioleta podem diminuir esta degradação.

### **2.5.3. Coletores solares**

Coletores solares são os equipamentos responsáveis por capturar a energia calorífica do sol (ondas eletromagnéticas), e são divididos em concentradores, que utilizam de refletores parabólicos para concentrar os raios solares em turbinas a vapor; e os coletores planos, que trabalham em temperaturas menores (abaixo de 100°C), que são voltados para atividades residências e comerciais: aquecimento para água de banho, secagem de grãos, aquecimento de piscinas, limpeza de hospitais e hotéis etc. Utilizados com o intuito de reduzir o consumo de energia elétrica ou gás, utilizam boilers para armazenar a água aquecida, de modo a possibilitar o uso desta fora dos horários de incidência solar, condição que torna estes sistemas mais flexíveis do que as células solares e mais eficientes na conversão de energia (PINHO; GALDINO, 2014).

## **2.6. Sistemas híbridos**

Sistemas híbridos de geração são caracterizados por possuir duas ou mais fontes de energia. São amplamente utilizados em zonas rurais, onde a distância impede o acesso à rede de distribuição de eletricidade. Nestes casos são comuns os geradores à diesel, porém estes possuem desvantagens como manutenção do

equipamento, e o custo do combustível e de seu transporte, além da questão ambiental, devido à produção de gases estufa. Nesta situação a solução de sistemas híbridos com energias renováveis, mais comumente eólica e solar, se mostra interessante, pois proporciona economia e uma exploração energética mais sustentável, além de utilizar recursos locais, não importados (HAUSCHILD, 2006).

A viabilidade de um sistema de coleta de energia renovável é definida pela disponibilidade dos recursos em questão no local de implantação ao decorrer do ano, exigindo desta forma, um estudo prévio desta disponibilidade na região, contando também com a demanda prevista em cada caso (DEBASTIANI, 2013). Os sistemas podem ser isolados da rede pública (mais caros, exigem baterias ou geradores) ou conectados à rede (mais baratos). O uso de mais de um tipo de fonte renovável em um sistema, com intuito de complementação entre elas, visa mitigar os altos custos e incertezas relacionadas a esta tecnologia. Classificam-se estas complementariedades em espaciais, onde dado local é mais propício para captação solar e outro para eólica, mas alimentam a mesma rede; e temporais, onde ao longo do ano observa-se períodos mais propícios para cada fonte (CHEN; KANG; LEE, 2010).

Manwell *et al.* (2009) também discorre sobre o assunto: analisa-se um sistema híbrido primeiramente como uma rede de energia tradicional, geralmente alimentada por geradores elétricos a diesel em áreas afastadas ou pela rede pública em áreas urbanas, que depois implementam fontes renováveis para reduzir os custos relacionados ao uso de combustível ou da energia da concessionária. Baseado nisso, o autor elenca limitações no uso de fontes renováveis em sistemas híbridos:

- O máximo de energia renovável utilizada em dado instante é limitada pela demanda do sistema naquele momento.
- O uso de energia renovável no sistema também é limitado pelo desencontro temporal entre geração e demanda, onde as fontes tradicionais são ativadas. Este item pode ser contornado com a instalação de sistemas de armazenamento de energia (baterias, represas de água bombeada, *flywheels*, ar comprimido etc.), porém o custo destas soluções pode inviabilizá-las economicamente em relação aos geradores tradicionais.

Chen, Kang e Lee (2010) defende que atualmente a solução híbrida, presentes as condições adequadas, pode substituir totalmente a necessidade de geradores à combustível, considerados indispensáveis anteriormente.

Em sua metodologia, Madhlopa *et. al.* (2014) conceitualiza um sistema híbrido solar-eólico como uma solução onde a demanda total é produto da soma da produção dos dois subsistemas. Ou seja, visando atender dada necessidade energética, devemos dimensionar desde o início o sistema eólico e o solar juntos, de forma que eles produzam como um só sistema tradicional. Porém, esta natureza ambígua traz complexidades ao caso, como a necessidade de um inversor de corrente contínua para corrente alternada entre o sistema fotovoltaico e a rede; diferente dos aerogeradores que a alimentam como um gerador elétrico. Além do custo, também deve-se considerar as perdas nos inversores, cuja eficiência não é de 100%.

### **2.6.1. Potencial de um sistema híbrido na localidade**

Dos Santos *et al.* (2017) comprova que para Cascavel, cidade no oeste do Paraná vizinha a este e trabalho, não existe correlação significativa entre a disponibilidade de energia eólica e solar na região. Coletando dados por dois anos e aplicando a metodologia de Spearman, 73% dos coeficientes de correlação foram fracos, e somente uma entrada (0,33%) indicou forte relação, portanto, a disponibilidade eólica é independente da disponibilidade solar. Também, observou-se que o potencial solar é constante e expressivamente maior que o eólico, variando entre 5,53 vezes maior no outono e 23,60 na primavera.

Em seu trabalho realizado também no oeste paranaense, no município de Tupãssi, Primieri (2019) simula a produção de módulos fotovoltaicos instalados em dois aviários, e conclui que a irradiação local é capaz de suprimir a demanda energética de 10 meses do ano, o equivalente a uma economia de R\$ 38.746,89 em 2017.

Debastiani (2013) encontra uma proporção, em um sistema híbrido, entre a contribuição do subsistema solar e o eólico. Em seu experimento instalado em área afastada do centro da cidade de Cascavel, encontrou teve 75,2% de contribuição energética do sistema solar, e 24,8 % do eólico, com 12,5% e 18,7% de eficiência de conversão, respectivamente. Também, verificou que a produção solar é mais estável que a eólica na região ao longo do ano.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Localização da área experimental

O experimento foi realizado em uma propriedade rural no município de Corbélia – PR, nas coordenadas geográficas 24.6911367 S; 53.2701858 O (Figura 8). A estrutura consistiu em dois aviários, com telhado metálico com 20% de inclinação, onde já existiam módulos solares instalados por uma empresa, atendendo a um cliente (Figura 9). A primeira edificação possui 130x14 m e abriga 25500 aves, o segundo 130x12m para 20200 aves. O sistema conta com 248 módulos solares de 360 W, três inversores de 25 kW, que produzem 89,28 kWp e 13472,35 kWh/mês.

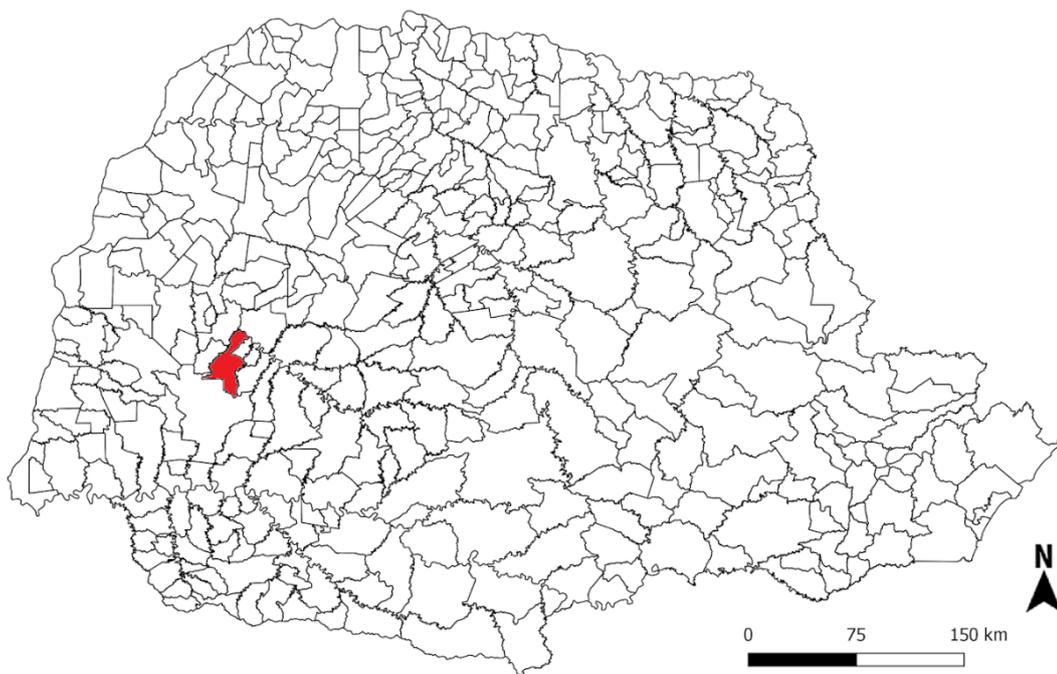


Figura 8: Localização de Corbélia - PR. (SUPORTE GEOGRÁFICO, 2022)



Figura 9: Recorte de vista superior da propriedade (GOOGLE, 2022)

### 3.2. Características da irradiação Solar Anual no Local do Experimento

Segundo o CRESESB (Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito) em junho de 2022, a média de irradiação solar anual para o local é em torno de 4,81 kWh/m<sup>2</sup>.dia, sendo a menor média mensal encontrada em junho (3,04 kWh/m<sup>2</sup>.dia), e a maior em dezembro (6,46 kWh/m<sup>2</sup>.dia).

#### Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Corbelia  
Município: Corbelia, PR - BRASIL  
Latitude: 24,701° S  
Longitude: 53,249° O  
Distância do ponto de ref. (24.691137° S; 53.270186° O): 2,4 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m <sup>2</sup> .dia]													
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	6,38	5,56	5,24	4,35	3,45	3,04	3,26	4,23	4,47	5,22	6,05	6,46	4,81	3,42
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	25° N	5,70	5,30	5,44	5,01	4,36	4,02	4,23	5,12	4,79	5,11	5,50	5,67	5,02	1,68
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	20° N	5,89	5,40	5,46	4,94	4,22	3,87	4,08	5,00	4,78	5,18	5,67	5,89	5,03	2,03
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	45° N	4,69	4,60	5,05	5,03	4,63	4,38	4,56	5,28	4,58	4,53	4,59	4,60	4,71	,90

Irradiação Solar no Plano Inclinado -Corbelia-Corbelia, PR-BRASIL

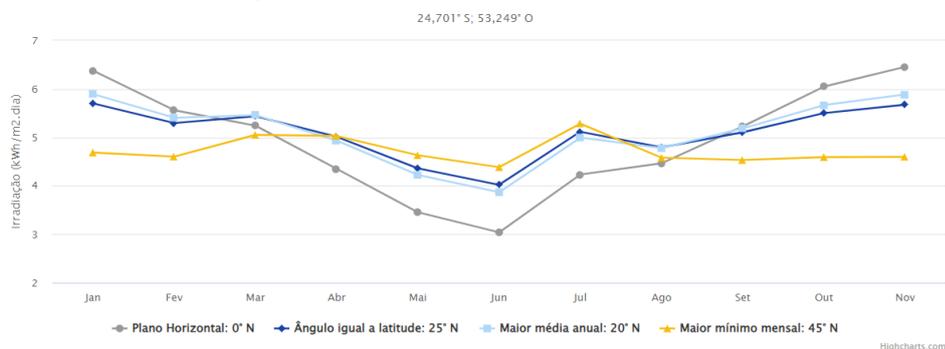


Figura 10: Variação da irradiação solar mensal no município de Corbelia (CRESESB, 2022)

### 3.3. Características da Velocidade do Vento no Local do Experimento

Ainda segundo o sistema CRESESB, a média de velocidade de vento anual de Corbélia, a 50 m de altura do solo, é de 5,14 m/s, com densidade de potência de 154 W/m<sup>2</sup>. O destaque são os meses entre junho e agosto, com 5,94 m/s; e baixa entre os meses de dezembro e fevereiro, com 4,55 m/s.

Atlas do Potencial Eólico Brasileiro		Dados de vento a 50 m de Altura				
Grandeza	Unidade	Dez-Fev	Mar-Mai	Jun-Ago	Set-Nov	Anual
velocidade média do vento	m/s	4,55	5,29	5,94	4,78	5,14
fator c		5,14	5,97	6,7	5,39	5,8
fator k		2,21	1,99	2,37	1,96	2,09
densidade de potência	W/m <sup>2</sup>	100	174	211	130	154

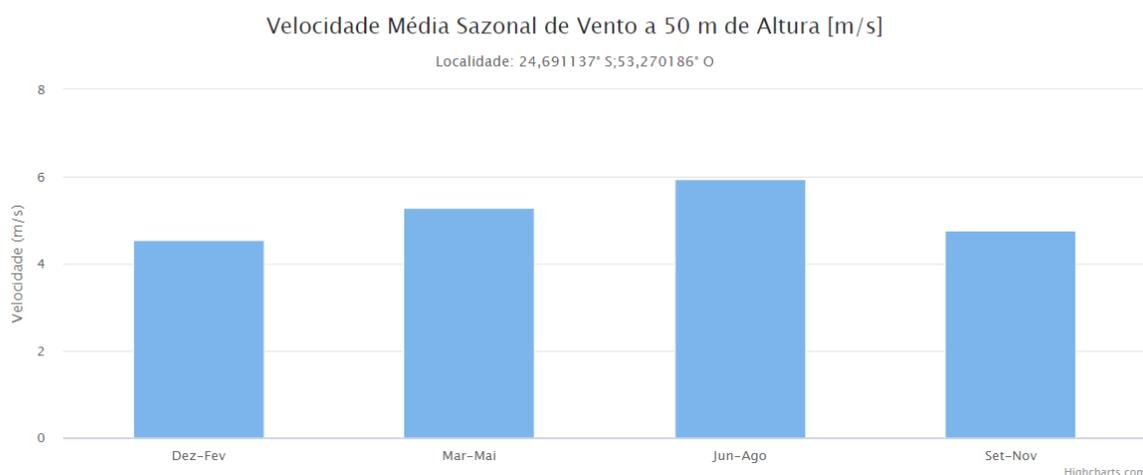


Figura 11: Dados de vento para o local (CRESESB, 2021)

Para o dimensionamento dos sistemas eólicos, também foram utilizados dados horários de velocidade do vento na cidade vizinha de Cascavel, coletados pelo Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná – SIMEPAR entre janeiro de 2011 até setembro de 2016.

### 3.4. Especificações Técnicas dos Equipamentos Utilizados no Experimento

#### 3.4.1. Especificações Técnicas dos Módulos Fotovoltaicos Utilizados

Os módulos escolhidos para o projeto são do fabricante Canadian Solar, modelo KuMax CS3U-360P (Figura 12), de 360 W, eficiência 18,15% e garantia de 25 anos. Suas especificações seguem na Tabela 1:

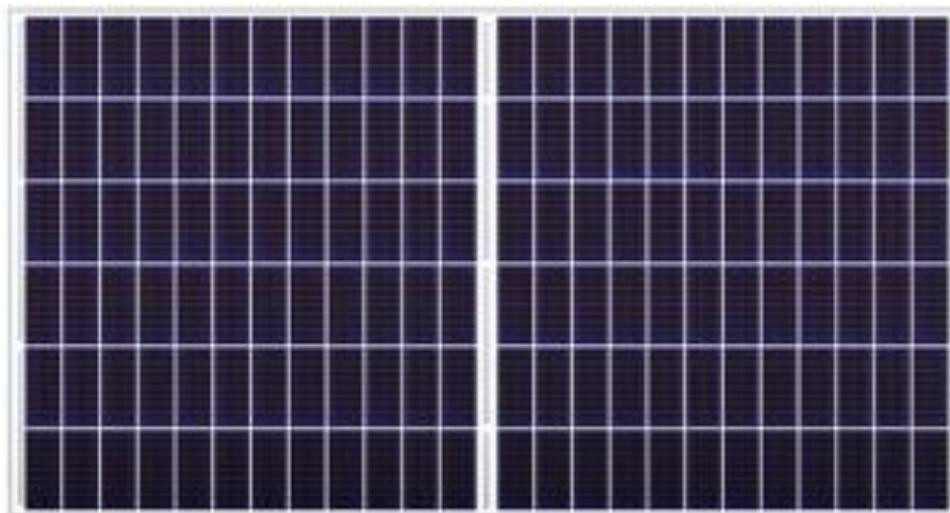


Figura 12: Módulo fotovoltaico KuMax CS3U-360P (CANADIAN SOLAR, 2021)

Tabela 1: Especificações técnicas do módulo fotovoltaico

Tipo de célula	Policristalinas
Número de células	144; [2 x (12 x 6)]
Dimensões do módulo	2000 x 992 x 35 mm
Peso	22.5 kg
Potência máxima	360 Wp
Tensão de circuito aberto	47,00 V
Corrente de curto-circuito	9,67 A
Tensão máxima de funcionamento	41,9 V
Eficiência do módulo	18,15 %
Temperatura de operação	-40° C – + 85° C

Fonte: Canadian Solar (2021).

#### 3.4.2. Especificações Técnicas do Aerogerador Utilizado

Foi escolhido o aerogerador modelo E-20 (Figura 13), de 20 kW, da fabricante Ryse Energy, por melhor se adequar à demanda. Suas especificações seguem na Tabela 2, e sua curva de potência na Figura 14:



Figura 13: Aerogerador E-20 (RYSE ENERGY, 2022)

Tabela 2: Especificações técnicas do Aerogerador E-20

Diâmetro rotor	9,8 m
Área Varrida	75,4 m <sup>2</sup>
Peso	1000 kg
Vento mínimo	2 m/s
Potência nominal	18 kW
Potência máxima	20 kW
Velocidade nominal	120 rpm
Vento nominal	11 m/s
Vento limite	70 m/s
Vida útil	20 anos

Fonte: Ryse Energy (2022).

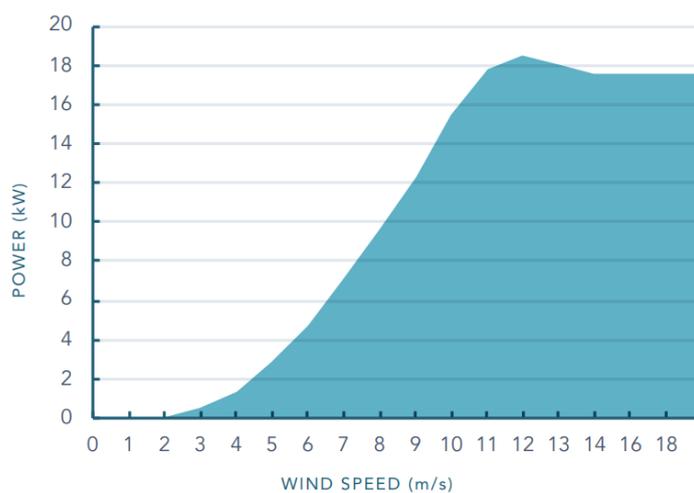


Figura 14: Curva de potência do aerogerador E-20. (Ryse Energy 2022)

### 3.4.3. Especificação dos Inversores Utilizados

Os inversores do sistema são do fabricante Fronius, modelo Eco 25.0-3-S (Figura 15), de 25kW. Suas especificações constam na Tabela 3:



Figura 15: Inversor Fronius Eco 25.0-3-S (FRONIUS, 2022)

Tabela 3: Especificações técnicas do inversor Fronius Eco 25.0-3-S

Peso	35,7 kg
Potência máxima pico (de entrada, CC)	37,8 kWpeak
Faixa de tensão (de entrada, CC)	580 - 1000 V
Corrente máxima (de entrada, CC)	44,2 A
Número de conexões (CC)	6
Potência nominal (de saída, CA)	25 kW
Faixa de tensão (de saída, CA)	150 - 275 V
Frequência (de saída, CA)	50; 60 Hz
Corrente máxima (de saída, CA)	37,9 / 36,2 A
Eficiência máxima	98,2 %

Fonte: Fronius (2022)

### 3.4.4. Especificação das String Boxes Utilizadas

Para realizar as interfaces entre os conjuntos de módulos fotovoltaicos e os inversores, foi escolhido o modelo Combiner Box Cfb-6e-6s-1100dc da fabricante Dehn (Figura 16), cujas especificações seguem na Tabela 4:



Figura 16: String box Cfb-6e-6s-1100dc. (DEHN, 2022)

Tabela 4: Especificações técnicas da string box Cfb-6e-6s-1100dc

Tensão nominal	1100 V
Corrente máxima entrada	15 A
Entradas DC	6
Saídas DC	6

Fonte: Dehn (2022)

### 3.5. Características de Demanda Energética Considerada no Experimento

Considerando os gastos entre os meses de março de 2019 e fevereiro de 2020, o consumo mensal de energia para a unidade aviária é de 10476,75 kWh, pela média das faturas da concessionária local para o imóvel do experimento.

Tabela 5: Consumo de energia mensal do imóvel (kWh/mês)

Jan/20	Fev/20	Mar/19	Abr/19	Mai/19	Jun/19	Jul/19	Ago/19	Set/19	Out/19	Nov/19	Dez/19	<b>MÉDIA</b>
13426	16531	10275	10760	10448	6175	11908	5602	13206	10833	6900	9657	<b>10476,75</b>

### 3.6. Dimensionamento dos Sistemas

#### 3.6.1. Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico conectado à rede, foi utilizada a metodologia proposta por Pinho e Galdino (2014). De posse dos dados da demanda energética que se pretende suprir, calculou-se a potência do gerador pela eq. 1:

$$P_{Fv} = \frac{\left(\frac{E}{TD}\right)}{HSP_{MA}} \quad (1)$$

Onde:

$P_{Fv}$  = Potência de pico do módulo fotovoltaico [W]

$E$  = Demanda (consumo) energética [Wh/dia]

$TD$  = Taxa de desempenho (razão entre desempenho real e o máximo teórico)

$HSP_{MA}$  = Média diária anual das horas de sol pleno incidentes no plano do módulo fotovoltaico [h].

Visando melhor custo-benefício, calculou-se o Fator de Dimensionamento de Inversores (FDI) (eq. 2) para basear a escolha do inversor, sendo que se recomenda que este valor esteja na faixa entre 0,75 e 1,05.

$$FDI = \frac{P_{Nca}}{P_{FV}} \quad (2)$$

Onde:

$FDI$  = Fator de Dimensionamento de Inversores

$P_{Nca}$  = Potência nominal em corrente alternada no inversor [W]

$P_{FV}$  = Potência pico do módulo fotovoltaico [W]

A tensão de entrada no inversor, soma das tensões dos módulos ligados em série, nunca deve ultrapassar a máxima permitida, visando a segurança do sistema. Portanto, o número de módulos em série deve obedecer a eq. 3:

$$n^{\circ} \text{ modulos em série} \cdot V_{ocTmin} < Vi_{max} \quad (3)$$

Onde:

$V_{ocTmin}$  = Tensão em circuito aberto de um módulo na menor temperatura prevista [V]

$V_{i_{max}}$  = Máxima tensão em corrente contínua admitida pelo inversor [V]

A corrente contínua máxima de entrada no inversor limita o número de séries de módulos ligadas em paralelo, seguindo a eq. 4:

$$n^{\circ} \text{ de séries em paralelo} = \frac{I_{i_{max}}}{I_{sc}} \quad (4)$$

Onde:

$I_{i_{max}}$  = Corrente contínua máxima admitida no inversor [A]

$I_{sc}$  = Corrente de curto-circuito do módulo fotovoltaico [A]

### 3.6.2. Dimensionamento do Sistema de Geração Eólica Conectado à Rede

De acordo com a metodologia de Basso (2017); se faz necessário analisar estatisticamente a série histórica de velocidade do vento para o local, ou seja, calcular velocidade média (eq. 5), valores máximo e mínimo, desvio padrão (eq. 6), e coeficiente de variação anual (eq. 7).

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{v})^2} \quad (6)$$

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{v}} \quad (7)$$

Onde:

$\bar{v}$  = velocidade média [m/s]

N = número de dados da série

$V_i$  = dado individual da série [m/s]

$\sigma$  = desvio padrão

CV= coeficiente de variação

Para estimar os dados estatísticos do vento à altura onde será instalado o aerogerador, deve-se extrapolar os dados da série histórica original utilizando a lei de Hellmann (eq. 8), que depende também do grau de rugosidade do terreno:

$$V_h = V_{10} \left( \frac{h}{10} \right)^\alpha \quad (8)$$

Onde:

$V_h$  = Velocidade do vento na altura h [m/s]

$V_{10}$  = velocidade do vento a 10 m de altura [m/s]

$\alpha$  = expoente de Hellmann em função da rugosidade do terreno

Visando expressar o potencial de produção energética a longo prazo em dada localidade, utiliza-se da Função da Densidade de Probabilidade Weibull (eq. 11) para descrever o fluxo variável de velocidade do vento, que depende das variáveis k (eq. 9) e C (eq. 10):

$$k = \left( \frac{\sigma}{V_{max}} \right)^{-1,086} \quad (9)$$

Onde:

k = fator de forma

$V_{max}$  = velocidade máxima [m/s]

$$C = 1,128 \bar{v} \quad (10)$$

Onde:

C = fator de escala

$\bar{v}$  = velocidade média [m/s]

$$P(V) = \frac{k}{v} \cdot \frac{v^{k-1}}{c} \cdot \exp \left( -\frac{v^k}{c} \right) \quad (11)$$

Onde:

P(V) = frequência de ocorrência de velocidade do vento

V = velocidade horizontal estável do vento livre [m/s]

### **3.6.3. Dimensionamento do Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico Conectado à Rede**

O experimento de Debastiani (2013) realizado na mesma região deste trabalho, mostrou uma proporção de contribuição de 75,2% da fonte solar e 24,8% da fonte eólica. Portanto, para dimensionar o sistema híbrido presente, a demanda foi dividida em 80% para o subsistema solar e 20% para o eólico, que devem trabalhar em conjunto para equivaler a um sistema tradicional.

### **3.7. Determinação de Custos**

Foi determinado por levantamentos de médias de preços de mercado de cada componente, seguindo sua marca e modelo, ou equivalentes.

#### **3.7.1. Determinação da Viabilidade Econômica de Cada Sistema**

Avaliação econômica de cada um dos sistemas dimensionados, foi utilizado o tempo de retorno descontado (*payback* descontado), que retorna o prazo necessário para o investimento começar a gerar retorno financeiro (ELETROBRÁS, 2009). Para isso, considerou-se a taxa mínima de atratividade, correspondente ao valor médio da taxa SELIC dos últimos dez anos, no valor de 9% ao ano, de modo a comparar a atratividade do empreendimento em relação a um investimento financeiro tradicional

Os cálculos foram realizados no mês de junho de 2022, portanto considerando a tarifa energética da concessionária Copel, que abrange todo o Paraná, como R\$ 0,37832/kWh para a propriedade rural em questão; e o custo de disponibilidade trifásica rural de 100 kWh mensais. Também foi considerada a variação média da tarifa de energia nos últimos 8 anos (6,5%), que já engloba a inflação monetária.

O custo evitado anual fornecido pelo sistema (o rendimento anual do investimento) é calculado multiplicando a sua produção anual pela tarifa energética. Neste caso, os sistemas têm a proposta de cobrir somente a demanda do imóvel em questão, portanto os excedentes da produção serão descartados e o custo evitado é fixado em R\$ 47.562,77, referente à demanda anual e à tarifa atual. Utilizou-se o software Microsoft Excel para os cálculos.

O tempo de retorno foi dado no exercício em que o saldo da soma dos valores presentes se torna positivo. Os valores presentes são dados pela eq. 12 (ELETROBRÁS, 2009):

$$P = \frac{F}{(1+i)^n} \quad (12)$$

Onde:

P = Valor presente;

F = Valor futuro;

i = taxa de juros (taxa interna de retorno)

n = período (ano após investimento).

### **3.8. Avaliação Técnico-Econômica Comparativa Entre os Sistemas Fotovoltaico, Eólico e Eólico-Fotovoltaico Conectado à Rede**

Após o dimensionamento dos três sistemas, foram determinados os custos e a avaliação da viabilidade econômica de cada sistema por meio do *payback* descontado. Esses resultados foram apresentados em planilhas que permitiram avaliar as diferenças de viabilidade encontrada a cada sistema.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Sistema fotovoltaico

#### 4.1.1. Dimensionamento do Sistema de Geração Fotovoltaica Conectado à Rede

Utilizando a metodologia de Pinho e Galdino (2014) (equações 1 a 4), para a demanda mensal total (10476,75 kW), adotando a taxa de desempenho empírica dos equipamentos como 77%, custo de disponibilidade mensal da concessionária de 100 kW, e a irradiação solar para inclinação de 20% norte (maior média anual para o local: 5,03 kWh/m<sup>2</sup>/dia), obteve-se os resultados apresentados na Tabela 6, e o histograma da produção na Figura 17:

Tabela 6: Dimensionamento do sistema fotovoltaico

Potência de pico dos módulos FV	89,28 kWp
FDI	0,84
Consumo de Energia Anual	125.721 kWh
Capacidade de Geração Anual	126.239 kWh
Saldo de Energia Anual	+ 518 kWh
Número de Módulos Fotovoltaicos	248
Número de inversores	3
Número de <i>string</i> boxes	3
Número de <i>strings</i>	15 (5 por inversor)

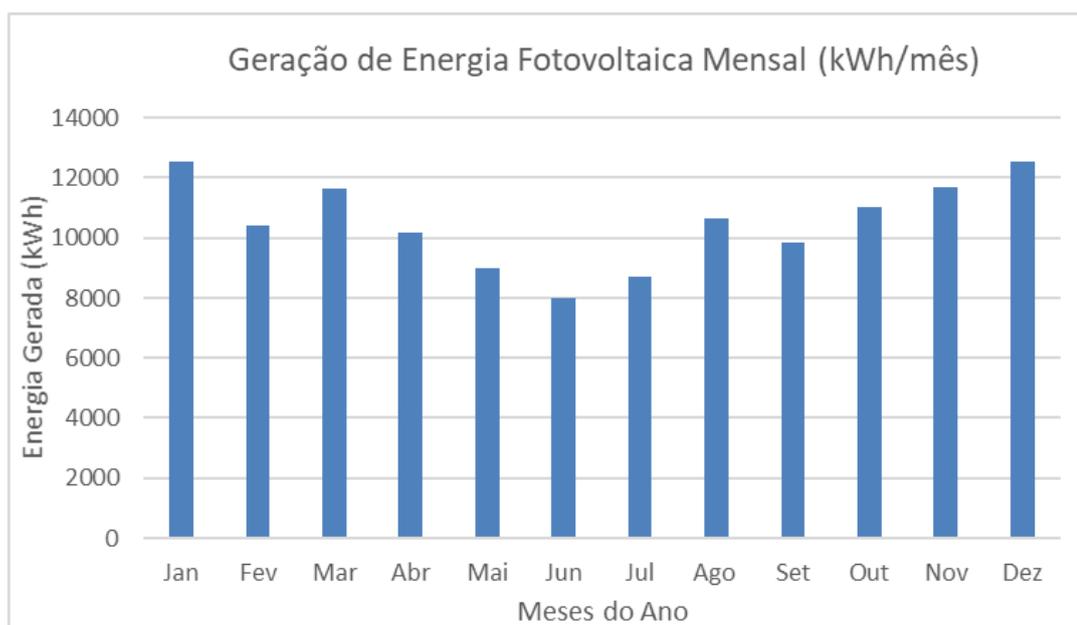


Figura 17: Histograma da produção de energia solar

#### 4.1.2. Cotação do Sistema Fotovoltaico

Usando como referência o mercado no mês de junho de 2022, foram realizados três orçamentos, indicando os menores preços de cada componente (ou similar) e feito uma média destes valores para utilização no cálculo. O custo total do sistema é dado pela Tabela 7:

Tabela 7: Custo sistema fotovoltaico

<b>Componente</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Custo médio (R\$)</b>
Módulo KuMax CS3U-360P	248	840,07
Inversor Eco 25.0-3-S	3	22.790,00
String Box Cfb-6e-6s-1100dc	3	1.848,59
	Total material:	282.409,37
<b>Serviço</b>	<b>Custo</b>	<b>Custo</b>
Mão de obra	15% do material	42.361,41
Estrutura de Fixação e Acessórios	15% do material	42.361,41
Projeto	10% do material	28.240,94
	Total serviços:	112.963,75
	<b>Custo total:</b>	<b>395.373,12</b>

#### 4.1.3. Retorno Financeiro do Sistema Fotovoltaico

O custo evitado anual fornecido pelo sistema foi de R\$ 47.562,77 em valores atuais (período 0).

Para o cálculo do *payback* descontado de forma mais precisa, foram consideradas a variação média da tarifa de energia e taxa de atratividade do investimento como a média da taxa Selic. Assim, o tempo de retorno estimado deste investimento é de 10 anos; sendo o retorno monetário do investimento R\$ 496.431,51 ao final da garantia dos módulos (25 anos), conforme a Tabela 8 e Figura 18:

Tabela 8: Payback descontado do sistema fotovoltaico

Período	Custos	Custos evitados (com variação da tarifa)	Valor Presente (com TMA)	Saldo Valor Presente
0	-395.373,12	-	-395.373,12	-395.373,12
1	0,00	50.654,35	46.471,88	-348.901,24
2	0,00	53.946,88	45.406,01	-303.495,23
3	0,00	57.453,43	44.364,59	-259.130,64
4	0,00	61.187,90	43.347,05	-215.783,59
5	0,00	65.165,12	42.352,85	-173.430,73
6	0,00	69.400,85	41.381,46	-132.049,28
7	0,00	73.911,90	40.432,34	-91.616,93
8	0,00	78.716,18	39.504,99	-52.111,94
9	0,00	83.832,73	38.598,92	-13.513,02
10	0,00	89.281,86	37.713,62	24.200,60
11	0,00	95.085,18	36.848,63	61.049,23
12	0,00	101.265,71	36.003,48	97.052,70
13	0,00	107.847,98	35.177,71	132.230,41
14	0,00	114.858,10	34.370,88	166.601,29
15	0,00	122.323,88	33.582,56	200.183,85
16	0,00	130.274,93	32.812,32	232.996,17
17	0,00	138.742,80	32.059,74	265.055,91
18	0,00	147.761,08	31.324,42	296.380,33
19	0,00	157.365,55	30.605,97	326.986,31
20	0,00	167.594,32	29.904,00	356.890,31
21	0,00	178.487,95	29.218,13	386.108,44
22	0,00	190.089,66	28.547,99	414.656,43
23	0,00	202.445,49	27.893,22	442.549,65
24	0,00	215.604,45	27.253,47	469.803,12
25	0,00	229.618,74	26.628,39	496.431,51



Figura 18: Saldo acumulado do investimento fotovoltaico durante sua vida útil

## 4.2. Sistema Eólico

### 4.2.1. Dimensionamento do Sistema de Geração Eólica Conectado à Rede

Seguindo as equações 5 a 11, obtém-se primeiramente a distribuição de Weibull (Figura 19) para a localidade estudada, extrapolando a série histórica do SIMEPAR, captados em 10 m de altura, para 24 m (altura necessária do aerogerador escolhido, segundo o fabricante).

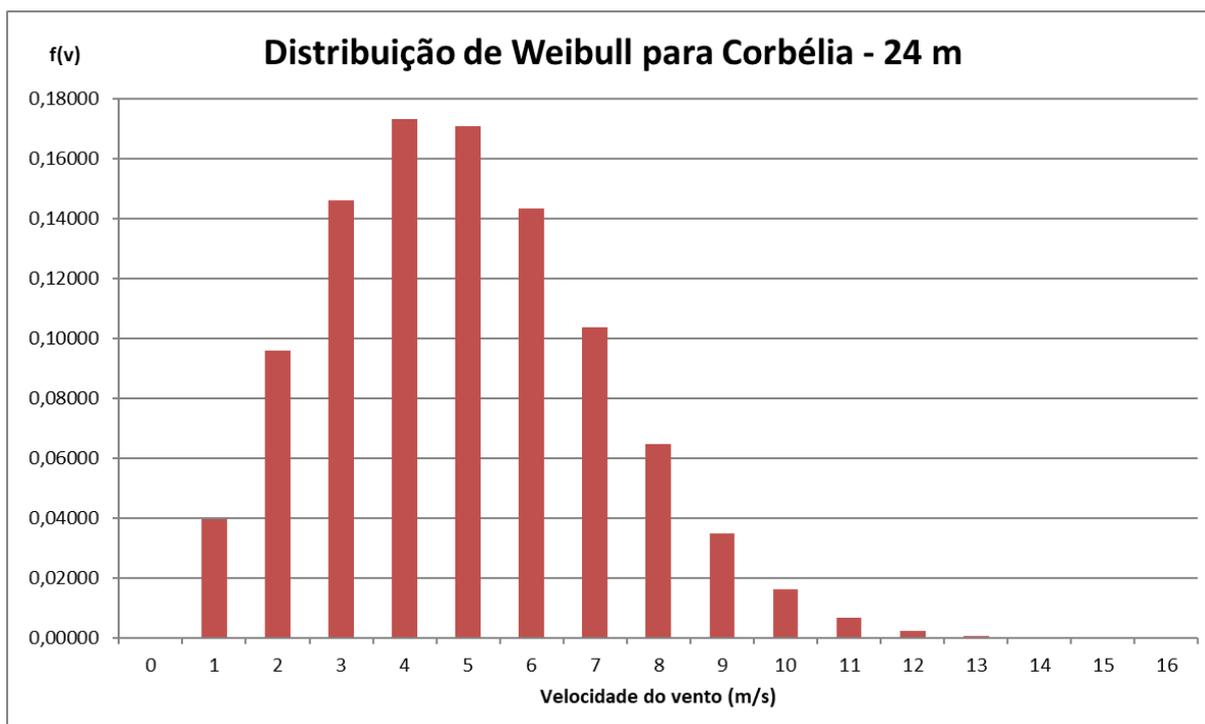


Figura 19: Distribuição de Weibull para a localidade

Ao multiplicar os dados de  $f(v)$  pelas horas do dia (24) e depois pelos dados de potência do aerogerador para cada velocidade, fornecidos pela curva de potência do fabricante, obteve-se a produção energética média mensal do aerogerador Ryse E-20, de 2614,52 kWh/mês (Tabela 9). Considerando a demanda mensal de 10476,75 kWh, serão necessários quatro geradores para alimentar o imóvel, configurando uma capacidade instalada de 127.239,81 kWh/ano, e saldo energético de 1.518,81 kWh/ano.

Tabela 9: Produção de energia do sistema eólico

Vel. do Vento (m/s)	Função de Weibull f(v)	Horas por dia h	Pot. do Aerogerador (kW)	Energia gerada (kWh)
0	0,00000	0,00000	0	0,00000
1	0,03944	0,94655	0	0,00000
2	0,09606	2,30539	0	0,00000
3	0,14603	3,50474	0,48	1,68228
4	0,17320	4,15686	1,25	5,19607
5	0,17082	4,09976	2,79	11,43833
6	0,14354	3,44495	4,62	15,91565
7	0,10379	2,49091	7,06	17,58580
8	0,06481	1,55546	9,59	14,91682
9	0,03497	0,83926	12,19	10,23054
10	0,01628	0,39080	15,41	6,02220
11	0,00653	0,15671	17,76	2,78323
12	0,00225	0,05398	18,57	1,00233
13	0,00066	0,01592	18,11	0,28831
14	0,00017	0,00401	17,62	0,07063
15	0,00004	0,00086	17,62	0,01513
16	0,00001	0,00016	17,62	0,00275
17	0,00000	0,00002	17,62	0,00042
18	0,00000	0,00000	17,62	0,00005
19	0,00000	0,00000	17,62	0,00001
<b>Prob. total =</b>	<b>0,999</b>	<b>23,966</b>	<b>Energia diária (KWh) =</b>	<b>87,151</b>

#### 4.2.2. Cotação do Sistema Eólico

O custo total do sistema é dado pela Tabela 10.

Tabela 10: Custo do sistema eólico

Componente	Quantidade	Custo médio (R\$)
Aerogerador Ryse Energy E-20	4	217.000
Frete	1	95.000
Total material:		963.000
Serviço	Porcentagem de Custo	Custo (R\$)
Mão de obra	15% do material	144450
Estrutura de Fixação e Acessórios	15% do material	144450
Projeto	10% do material	96300
Total serviços:		385,200
<b>Custo total (R\$):</b>		<b>1.348.200</b>

### 4.2.3. Retorno Financeiro do Sistema Eólico

O custo evitado anual fornecido pelo sistema foi de R\$ 47.562,77 em valores atuais (período 0).

Considerando a variação da tarifa de energia e a taxa de atratividade para o cálculo do *payback* descontado, observa-se que este investimento é inviável durante a sua vida útil de 20 anos devido ao seu alto custo inicial (Tabela 11), e apresenta saldo negativo R\$ -595.936,55 ao final do período.

Tabela 11: *Payback* descontado do sistema eólico

Período	Custos	Custos evitados (com variação da tarifa)	Valor Presente (com TMA)	Saldo Valor Presente
0	-1.348.200,00	-	-1.348.200,00	-1.348.200,00
1	0,00	50.654,35	46.471,88	-1.301.728,12
2	0,00	53.946,88	45.406,01	-1.256.322,11
3	0,00	57.453,43	44.364,59	-1.211.957,52
4	0,00	61.187,90	43.347,05	-1.168.610,46
5	0,00	65.165,12	42.352,85	-1.126.257,61
6	0,00	69.400,85	41.381,46	-1.084.876,15
7	0,00	73.911,90	40.432,34	-1.044.443,81
8	0,00	78.716,18	39.505,00	-1.004.938,81
9	0,00	83.832,73	38.598,92	-966.339,89
10	0,00	89.281,86	37.713,62	-928.626,27
11	0,00	95.085,18	36.848,63	-891.777,64
12	0,00	101.265,71	36.003,48	-855.774,16
13	0,00	107.847,99	35.177,71	-820.596,45
14	0,00	114.858,11	34.370,88	-786.225,57
15	0,00	122.323,88	33.582,56	-752.643,01
16	0,00	130.274,93	32.812,32	-719.830,70
17	0,00	138.742,81	32.059,74	-687.770,96
18	0,00	147.761,09	31.324,43	-656.446,53
19	0,00	157.365,56	30.605,98	-625.840,55
<b>20</b>	<b>0,00</b>	<b>167.594,32</b>	<b>29.904,00</b>	<b>-595.936,55</b>

### 4.3. Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico

#### 4.3.1. Dimensionamento do Sistema de Geração Híbrido Eólico-Fotovoltaico Conectado à Rede

O sistema híbrido deve ter seus subsistemas fotovoltaico e eólico dimensionados separadamente, utilizando das metodologias já apresentadas, para a fração da demanda total referente a eles. Para o sistema fotovoltaico (80% da

demanda), este valor é 8.380,68 kWh/mês, e para o eólico (20%), é 2.095,17 kWh/mês.

Para o subsistema fotovoltaico, obteve-se os seguintes resultados na Tabela 12, e o histograma da produção na Figura 20:

Tabela 12: Dimensionamento do subsistema fotovoltaico

Potência de pico dos módulos FV	71,25 kWp
FDI	1,05
Demanda de Energia Anual (80%)	100.576,8 kWh
Capacidade de Geração Anual	100.787,5 kWh
Saldo de Energia Anual	+ 211 kWh
Número de Módulos Fotovoltaicos	198
Número de inversores	3
Número de <i>string</i> boxes	2
Número de <i>strings</i>	11 (4 e 3 por inversor)

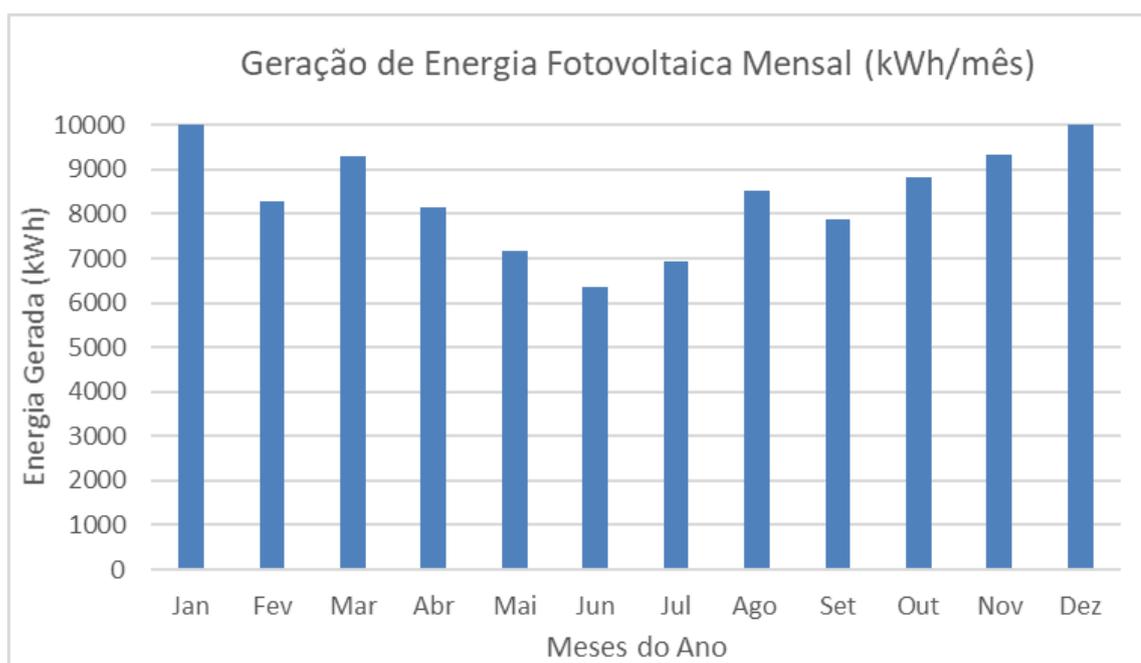


Figura 20: Histograma da subprodução de energia solar

A demanda eólica é suprimida com somente um aerogerador E-20, que fornece 2614,52 kWh/mês (Tabela 9). Desta forma, a produção anual estimada do sistema híbrido é de 132.597,45 kWh/ano, frente à demanda de 125.721 kWh/ano, configurando um saldo energético de 6.876,45 kWh/ano.

### 4.3.2. Cotação do Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico

Na situação híbrida, os subsistemas são menores do que os sistemas tradicionais previamente dimensionados, portanto a quantidade de alguns materiais (módulos fotovoltaicos, *string boxes*, aerogeradores) é menor e conseqüentemente, apresentam menor custo.

O custo total do sistema é dado pela Tabela 13:

Tabela 13: Custo do sistema híbrido

Componente	Quantidade	Custo médio (R\$)
Módulo KuMax CS3U-360P	198	840,07
Inversor Eco 25.0-3-S	3	22.790,00
String Box Cfb-6e-6s-1100dc	2	1.848,59
Aerogerador Ryse Energy E-20	1	217.000
Frete	1	95.000
	Total material:	550.401,04
Serviço	Custo	Custo
Mão de obra	15% do material	82.560,16
Estrutura de Fixação e Acessórios	15% do material	82.560,16
Projeto	10% do material	55.040,10
	Total serviços:	220.160,41
	<b>Custo total:</b>	<b>770.561,456</b>

### 4.3.3. Retorno Financeiro do Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico

O custo evitado anual fornecido pelo sistema foi de R\$ 47.562,77 em valores atuais (período 0).

Considerando a variação da tarifa de energia e a taxa de atratividade para o cálculo do *payback* descontado, observa-se que este investimento é inviável durante a vida útil do aerogerador (20 anos) devido ao seu alto custo inicial (Tabela 14), apresentando saldo negativo de R\$ -18.298,03 ao final do período. Seria necessário mais um ano de funcionamento para o sistema começar a gerar retorno, pois seu *payback* foi de 21 anos.

Tabela 14: *Payback* descontado do sistema híbrido

Período	Custos	Custos evitados (com variação da tarifa)		
		Valor Presente (com TMA)	Saldo Valor Presente	
0	-770.561,46	-	-770.561,46	-770.561,46
1	0,00	50.654,35	46.471,88	-724.089,58
2	0,00	53.946,88	45.406,01	-678.683,57
3	0,00	57.453,43	44.364,59	-634.318,98
4	0,00	61.187,90	43.347,05	-590.971,93
5	0,00	65.165,12	42.352,85	-548.619,07
6	0,00	69.400,85	41.381,46	-507.237,61
7	0,00	73.911,90	40.432,34	-466.805,27
8	0,00	78.716,18	39.504,99	-427.300,28
9	0,00	83.832,73	38.598,92	-388.701,36
10	0,00	89.281,86	37.713,62	-350.987,74
11	0,00	95.085,18	36.848,63	-314.139,11
12	0,00	101.265,71	36.003,48	-278.135,63
13	0,00	107.847,98	35.177,71	-242.957,92
14	0,00	114.858,10	34.370,88	-208.587,04
15	0,00	122.323,88	33.582,56	-175.004,49
16	0,00	130.274,93	32.812,32	-142.192,17
17	0,00	138.742,80	32.059,74	-110.132,43
18	0,00	147.761,08	31.324,42	-78.808,00
19	0,00	157.365,55	30.605,97	-48.202,03
<b>20</b>	<b>0,00</b>	<b>167.594,32</b>	<b>29.904,00</b>	<b>-18.298,03</b>
21	0,00	178.487,95	29.218,13	10.920,10

#### 4.4. Discussão

Observa-se que no dimensionamento de sistemas híbridos surge uma complicação: é mais difícil dimensionar os sistemas de acordo com a demanda exata do projeto, uma vez que as sobras de segurança dos dois subsistemas são somadas, gerando ao final do ano, um saldo energético maior que dos sistemas tradicionais. Isto pode ser observado comparando os valores dos saldos anuais previstos dos três (fotovoltaico 518 kWh, eólico 1.518,81 kWh e híbrido 6.876,45 kWh), onde o sistema híbrido apresenta um valor expressivamente maior, e que não necessariamente pode ser convertido em custo evitado ao proprietário.

Isto também aponta uma característica do uso de energia eólica: os aerogeradores, além do elevado custo inicial, são pouco modulares, ou seja, é difícil elencar qualquer demanda com as opções do mercado. Por acaso, no sistema eólico proposto para a demanda apresentada, quatro aerogeradores supriam a necessidade com grande exatidão matemática. Já no sistema híbrido, onde a demanda eólica era

somente 20% da original, seria necessário 0,8 gerador para supri-la com exatidão. Uma vez isso não sendo possível, optou-se por somente um gerador, que produzirá mais que o necessário, culminando, novamente, em saldo excessivo de energia ao final do ano.

Por isso, sugere-se para trabalhos futuros, que o dimensionamento dos sistemas híbridos seja um processo iterativo, onde o subsistema eólico seja dimensionado primeiramente e, uma vez conhecida a sua produção esperada exata, o solar seja dimensionado a fim de suprir o restante de demanda também com exatidão, uma vez que sua maior modularidade assim permite.

## 5 CONCLUSÕES

Perante os resultados obtidos, conclui-se que para o sistema fotovoltaico, foram necessários 248 módulos, três inversores e três *string boxes*; com produção anual esperada de 126.239 kWh. O custo do sistema foi cotado em R\$ 395.373,12, que aliado ao custo evitado anual esperado de R\$ 47.562,77 em valores atuais, apresenta tempo de retorno estimado em 10 anos, e retorno financeiro de R\$ 496.431,51 ao final da vida útil do sistema.

Para o sistema eólico, foram necessários quatro aerogeradores, responsáveis por 127.239,81 kWh/ano. O custo do sistema foi cotado em R\$ 1.348.200, e o custo evitado anual esperado de R\$ 47.562,77 não é suficiente para viabilizar o investimento, que ao final da vida útil do sistema, apresenta retorno negativo de R\$ -595.936,55.

Já o sistema híbrido constituiu de 198 módulos, três inversores, duas *strings boxes* e um aerogerador, com produção anual esperada de 132.597,45 kWh. O custo do sistema é R\$ 770.561,456, e o custo evitado anual esperado de R\$ 47.562,77 também não é suficiente para trazer lucro durante a vida útil do sistema (saldo de R\$ -18.298,03), exigindo um ano a mais para viabilizar o investimento.

Portanto, conclui-se que, das três alternativas apresentadas, somente o sistema unicamente fotovoltaico é viável para o imóvel, e que em nada a adição de um sistema eólico auxiliaria em aumentar o retorno do investimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J.; ROBERTO, J. **Setor energético: matriz brasileira, geração e distribuição de eletricidade, transportes**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará.

AMARANTE, O.A.C.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A.L. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília: 2001.

ANEEL. **Atlas da energia elétrica no Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2 ed. 243 p. Brasília: 2005. Disponível em: <[www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia\\_eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf)> Acesso em: Junho/2019.

BASSO, T. M. **Análise Técnico-Econômica De Um Sistema De Geração Análise Técnico-Econômica De Um Sistema De Geração**. Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), 2017.

BURTON, T.; SHARPE, D. JENKINS, N. BOSSANYI, E. **Wind Energy Handbook**. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, 2001.

CAMARGO; SCHUBERT. **Atlas do Potencial Eólico do Estado do Paraná**. Curitiba: 2007.

CHEN, H. H., KANG, H. Y., LEE, A. H. I. "**Strategic selection of suitable projects for hybrid solar-wind power generation systems**", Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, n. 1, p. 413–421, 2010. DOI: 10.1016/j.rser.2009.08.004.

DAL PONTE, E. F. **Construção e avaliação de um aerogerador de eixo vertical aplicado à agroindústria**. Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), 2017.

DEBASTIANI, G. **Avaliação da eficiência energética de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico para Cascavel-Paraná**. Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), 2013.

DINCER, I. **Renewable energy and sustainable development: a crucial view**. Dhahram, Arábia Saudita: King Fahd University of Petroleum and Minerals, 1999.

DOS SANTOS, D.B.; SIQUEIRA, J. A. C; NOGUEIRA, C. E. C.; VIDOTTO, M. L.; DEBASTIANI, G.; FEIDEN, A.; ZANÃO, L. A.; GURGACZ, F. Analysis of the energetic dynamism between solar and wind energy available in the south of Brazil. **African Journal of Agricultural Research**. v.12, n. 9, p. 692-699, março 2017.

ELETROBRÁS. **Análise econômica de investimento: guia básico**. IEL/NC. 1 ed. 85 p. Brasília: 2008.

HAUSCHILD, L. **Avaliação de Estratégias de Operação de Sistemas Híbrido Fotovoltaico-Eólico-Diesel**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2006.

INATOMI, T.H.A.; UDAETA, M.E.M. **Análise dos impactos ambientais na produção de energia dentro do planejamento integrado de recursos**. São Paulo: Universidade de São Paulo (USP), 2005.

MADHLOPA, A., SPARKS, D., KEEN, S., et al. "**Optimization of a PV-wind hybrid system under limited water resources**", Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 47, p. 324–331, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.03.051. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.051>.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind energy explained: theory, design and application**. Chippenham, Inglaterra: John Wiley & Sons, Ltd, 2009.

MIRANDA, A. G. G. **Estudo de ciclo de vida de gerador eólico de pequeno porte utilizado em propriedade rural**. Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), 2018.

PACHECO, F. Energias renováveis: breves conceitos. Artigo. **Conjuntura e Planejamento**, Salvador: SEI, n.149, p.4-11, Outubro/2006

PARIZOTTO, R. R. **Instalação e avaliação de um sistema de bombeamento d'água com aerogerador de pequeno porte para propriedades rurais na cidade de Cascavel -PR**. Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), 2014.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPAL – CRESESB, Março/2014

PINTO, M.O. **Fundamentos de energia eólica**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

PRIMIERY, B. F. **Monitoramento da geração elétrica e viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico instalado em dois aviários em Tupãssi – PR**. Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), 2019.

SIQUEIRA, J. A. C. **Desempenho de um sistema híbrido eletrofotovoltaico de pequeno porte para energização rural**. Botucatu: Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de ciências agrônômicas Campus de Botucatu, 2005.

SUPORTE GEOGRÁFICO. **MAPA DE CORBÉLIA – PR**. Disponível em: <https://suportegeografico77.blogspot.com/2019/08/mapa-de-corbélia-pr.html>. Acesso em junho/2022.

TOLMASQUIM, M. T. Perspectivas e planejamento do setor energético do Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo: n 26, p. 249-260, 2012.