

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

**HELLOISA APARECIDA FORTI**

**LETÍCIA SILVA RATTMANN**

**PROJETO E ESTUDO COMPARATIVO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA  
INSTALAÇÃO DE UMA UNIDADE DE MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA SOLAR E  
EÓLICA EM UMA ESCOLA (ESCOLA MUNICIPAL DO CAMPO CONTESTADO –  
LAPA- PR)**

**CURITIBA**

**2018**

**HELLOISA APARECIDA FORTI  
LETÍCIA SILVA RATTMANN**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como documento avaliativo  
ao Departamento de Engenharia Elétrica,  
Setor de Tecnologia, Universidade  
Federal do Paraná, como parte das  
exigências para obtenção do título de  
Engenheira Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo  
Eduardo Pellenz.

**CURITIBA  
2018**

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**HELLOISA APARECIDA FORTI  
LETÍCIA SILVA RATTMANN**

**PROJETO E ESTUDO COMPARATIVO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA  
INSTALAÇÃO DE UMA UNIDADE DE MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA SOLAR E  
EÓLICA EM UMA ESCOLA (ESCOLA MUNICIPAL DO CAMPO CONTESTADO –  
LAPA- PR)**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora.

---

Prof. Dr. Marcelo Eduardo Pellenz (Orientador)  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

---

Prof. Tibiriçá Krüger Moreira  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

---

Prof. PH.D. Armando Heilmann  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Curitiba, 26 de novembro de 2018.

*Dedico à minha minha maior inspiração,  
minha mãe, Odete Marques Forti.*

*Àquele que sempre me incentivou a estudar,  
dedico este trabalho ao meu vô Pedro.*

## AGRADECIMENTOS

Antes de tudo e todos, gostaríamos de agradecer à Deus, por sua misericórdia infinita, por seu coração bondoso e amor absoluto. Por segurar nossas mãos e nos levar aonde não poderíamos ir sozinhas, por nos sustentar quando desistir parecia ser a única saída. Este trabalho e toda a nossa formação são Seus, para louvor e honra do Seu Nome. Agradecemos à Nossa Senhora Aparecida, que desde nossa tentativa de integração à universidade, intercede a Deus por nossos pedidos. Obrigada mãezinha por colocar sobre nós teu manto sagrado.

Eu, Helloisa, agradeço à minha mãe, Odete Marques Forti, que não teve a oportunidade de ingressar à graduação, mas sempre me incentivou a estudar por um futuro melhor, me guiou para não desistir, me amparou e rezou nos momentos difíceis com todo amor e carinho, obrigada por ter acreditado em mim mesmo quando eu não tinha esperanças, a senhora é a melhor mãe que poderia existir. À minha maninha, Edilceia Forti, por ter corrido a minha frente abrindo os caminhos desde meu nascimento, obrigada pelos conselhos e amparo, você é meu exemplo de dedicação, doação e amor. Ao meu afilhado e sobrinho, Miguel Forti Da Ros Motta, pelos sorrisos que acalentaram meus dias. Obrigada ao meu pai, João Forti. À Mayara Martins da Silva por sempre acreditar em mim. Agradeço à Allana Kerllyn Antunes, Fernanda Rodrigues Reis, Marina Weber e Rogério Correa Leite Júnior pela amizade e apoio desde antes do meu ingresso à esse curso. Também sou grata a Alesandro Antonio Ortiz Filho, Elyvelton Pontes de Lima, Renan Felipe Matheus e Wesley Matheus Pontes de Oliveira que, como ministério, foram meu refúgio nos momentos de conturbação e me guiaram ao caminho do Senhor. Obrigada à família Silva Rattmann pelo acolhimento em sua casa todas as inúmeras vezes que eu precisei estudar. Finalmente, meu agradecimento especial à minha irmã de coração, Letícia Silva Rattmann, por ter agregado novo valor ao significado de amizade, sendo meu anjo e pilar durante esses anos, obrigada pela cumplicidade, risadas e ensinamentos.

Eu, Letícia. creio não existir um conjunto de palavras capaz de retratar meus agradecimentos a meus pais. Lair e José Renato, obrigada por seu amor incondicional, por atender incansavelmente minhas necessidades e me encherem de mordomias. Por repetir incontáveis vezes que tudo ficaria bem; tenham a certeza de

que suas palavras foram meu combustível nesta estrada. Um obrigado especial à minha vó Tereza por rezar incessavelmente por nossa família e ser a base da nossa fé, e à minha vó Darcy por seus conselhos nos momentos de desesperança. À minha mana Mafe, sem você minhas noites seriam mais solitárias e meus dias mais tristes, obrigada por me aturar. À família Medeiros, Mariáh Renata e Pedro Alex, muito obrigada por seu apoio nas situações de angústia, a importância do carinho de vocês é indescritível; Maria Isadora, Isis Rafaela e Pedro Miguel, obrigada pela doçura que trouxeram à minha vida. Gratidão à minha irmã de outra mãe, Marina Junkes Rodrigues, a pessoa que relembra meu verdadeiro eu e me acompanha lado a lado, obrigada por sua sinceridade e amor. À toda a minha família, que torce pelo meu sucesso e me encoraja a progredir. Agradeço à meus amigos da Família, em especial Isis Danielle Cury, à Thiago Melnik Bittencourt, Paula Pacheco Pereira e Kariane Rafaela da Silva, a amizade de vocês foi meu resguardo nas horas de frustração e meu entusiasmo nas horas de diversão. Por último, e mais importante, um agradecimento extraordinário a Helloisa Aparecida Forti, não satisfeita em ser apenas minha amiga, ela se tornou a pessoa em quem eu mais me ateno no mundo. Aquela que estava comigo em todos os momentos durante esta etapa tão árdua. Infinitamente agradecida por seu companheirismo, amizade e suporte. Obrigada por ser tão parecida comigo.

Gostaríamos, juntas, de agradecer em especial à Marcelle Zatoni de Oliveira, Rodriguks Henrique da Silva, Lucas Schuéda Farias, Vinicius Augusto (Caixa) Scuzziatto, Felipe Czarneski da Cruz e Emerson Pereira dos Santos Júnior, vocês tornaram nossa trajetória mais afetuosa e alegre com sua amizade. Agradecimentos a Vinicius Augusto (Caixa) Scuzziatto, Adriano Paul e Matheus Teles pela paciência em nos ajudar a aprender.

Agradecemos a Pedro Zanatelli Brasil Bastos e ao nosso Professor Orientador Marcelo Pellenz.

“Could've given up so easily  
I was a few cheap shots away from the end of me  
It's not a dream anymore!  
It's worth fighting for.”

(Paramore)

## RESUMO

Constantemente, organizações internacionais e autoridades de algumas potências mundiais investem contra o aumento da temperatura média do planeta, alertando outras nações influentes sobre o papel da energia e de sua produção nesta elevação climática. Neste cenário, muitos governos optaram por buscar a diversificação da matriz energética nacional, como artifício para esta adversidade. O Brasil pertence ao grupo de países que comprometeu-se a imprimir esforços pela redução da emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa. Entretanto, ainda em 2017, quase 20% da oferta interna de energia brasileira provém de métodos não-renováveis, como o gás natural e o carvão, e novos métodos de obtenção de energia, como as fontes solar e eólica, somam apenas 7%. Com o objetivo de incentivar o emprego de energias limpas e sustentáveis, este artigo estuda o dimensionamento de sistemas de geração distribuída, a partir da fonte solar fotovoltaica e eólica, e examina sua praticabilidade, incluindo as esferas técnica e econômica. Para que o uso de tecnologias como estas tornem-se progressivamente acessíveis às diferentes classes sociais, o local designado para os projetos é uma escola pública no município da Lapa no Paraná. Incluso no dimensionamento, encontram-se os dados de irradiação solar e velocidade do vento na localidade, fornecidos por bancos meteorológicos abertos e confiáveis, para estimação do potencial energético, e os parâmetros de escolha dos equipamentos, tanto para operação e produção, quanto para proteção dos sistemas e sua conexão à rede elétrica da concessionária regional. Em seguida, a análise de viabilidade econômica, permitiu a estimativa do tempo de retorno do investimento e ainda uma avaliação da credibilidade dos projetos por meio de outros indicadores financeiros. Ademais, a alternativa híbrida fora também adicionada ao estudo, como outra possibilidade de implantação. Por fim, em consequência de parâmetros técnicos e econômicos, concluiu-se que o projeto fotovoltaico é o mais indicado para o local.

**Palavras-chave:** geração distribuída, energia solar, energia eólica, sistema híbrido, microgeração, energias renováveis.

## ABSTRACT

Constantly, international organizations and authorities of some world powers invest against the rise of global average temperature, warning other influential nations about the role of electric power and its production on this climatic rising. In this scenario, many governments opted to seek the diversification of the national energy matrix, as an artifice for this adversity. Brazil belongs to the group of countries that have committed to show efforts to reduce the emissions of gases responsables for the greenhouse effect. However, still in 2017, almost 20% of Brazilian internal energy supply comes from non-renewable methods, as natural gas and coal, meanwhile new obtaining energy methods, such as solar and wind sources, represent only 7%. With regard to encourage the use of clean energies, this article studies the sizing of two distributed generation systems, from solar photovoltaic and wind power sources, and examine its feasibility, including it's technical and economic spheres. In order to turn the usage of technologies like these progressively accessible to different social classes, the place designated for the project is a public school in the county of Lapa in Paraná. Included in the sizing, are the datas of solar radiation and wind speed at the scene, provided by reliable meteorological platforms, for estimation of the energy potential, and the parameters for the equipment selection, counting the operation, production and protection of the systems and their power grid connection to the regional concessionaire. Alongside, the economic feasibility analysis, allowed the estimation of the investment return and an assessment of the projects credibility through other financial indicators. Furthermore, one hybrid alternative has also been added to the study, as another implantation possibility. Lastly, as a result of technical and economic parameters, it was concluded that the photovoltaic project is the most suitable for the place.

**Key-words:** distributed generation, solar energy, wind energy, hybrid system, solar microgeneration, renewable energies.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Concentrador parabólico .....	12
Figura 2 – Matriz energética brasileira por fonte nos anos de 2005 e 2009 .....	13
Figura 3 – Emissões de gases nocivos à camada de ozônio no Brasil .....	14
Figura 4 - Emissões de gases poluente no Brasil .....	15
Figura 5 - Fluxograma da estrutura e metodologia empregadas.....	18
Figura 6 – Concentrador parabólico .....	20
Figura 7 – Concentrador parabóloidal .....	21
Figura 8 – Concentrador linear Fresnel.....	21
Figura 9 - Receptor central.....	22
Figura 10 – Placas de silício monocristalino .....	24
Figura 11 – Placas de silício policristalino.....	24
Figura 12 – Módulo CPV de segunda geração com células tripla-junção .....	25
Figura 13 – Crescimento dos aerogeradores – diâmetro do rotor, altura de torre e potência nominal. ....	27
Figura 14 – Componentes de um aerogerador de eixo vertical.....	28
Figura 15 – Componentes de um aerogerador.....	29
Figura 16 – Turbinas classificadas quanto ao tipo de eixo.....	30
Figura 17 – Ilustração Controle Estol .....	31
Figura 18 – Curva de Potência com Controle Estol.....	31
Figura 19 – Ilustração Controle <i>Pitch</i> .....	32
Figura 20 – Curva de Potência com Controle <i>Pitch</i> .....	32
Figura 21 – Ilustração Controle Yaw .....	33
Figura 22 – Conexões em GD acumuladas, 2012 a 2017.....	36
Figura 23 – Procedimento para acesso à Rede de Distribuição.....	37
Figura 24 – Consumo e geração no primeiro trimestre de uma simulação. ....	40
Figura 25 – Consumo e geração no ano .....	41
Figura 26 – Medição do ângulo azimutal.....	53
Figura 27 – Comparação entre consumo e geração de energia elétrica do projeto fotovoltaico .....	67
Figura 28 – Diagrama multifilar do sistema em cada um dos inversores .....	68

Figura 29 – Diagrama multifilar do sistema em cada um dos inversores .....	69
Figura 30 – Diagrama multifilar do sistema em cada um dos inversores .....	69
Figura 31 – Distribuição de Weibull Anual.....	71
Figura 32 – Curvas de Weibull Mensais.....	72
Figura 33 – Curva de Potência, WES50.....	75
Figura 34 – Curva de Potência, TREBA-0210.....	76
Figura 35 – Curva de Potência, TREBA-0160.....	76
Figura 36 – Curva de Potência, Eoltec Sirocco .....	77
Figura 37 – Distribuição de Weibull Anual Corrigida .....	79
Figura 38 – Curvas de Weibull Mensais Corrigidas.....	80
Figura 39 – Área Disponível para a Instalação dos Aerogeradores no local.....	81
Figura 40 – Alternativa para Posicionamento de Aerogeradores .....	82
Figura 41 – Alternativa para Posicionamento de Aerogeradores .....	82
Figura 42 – Posicionamento de Aerogeradores selecionado .....	83
Figura 43 – Arranjo dos Aerogeradores no Local.....	83
Figura 44 – Curva Velocidade dos Ventos X Horas de Ocorrência/Ano .....	84
Figura 45 – Energia Gerada Anualmente por um Aerogerador .....	85
Figura 46 – Comparação entre consumo e geração de energia elétrica do projeto eólico.....	86
Figura 47 – Áreas de Importância para Aves Migratórias no Paraná .....	94
Figura 48 – Comparação entre consumo e geração de energia elétrica do projeto híbrido .....	95
Figura 49 – Comparação entre geração de energia elétrica do projeto fotovoltaico, eólico e híbrido. ....	96
Figura 50 – Fluxo de caixa do projeto fotovoltaico .....	99
Figura 51 – Payback do projeto fotovoltaico .....	99
Figura 52 – Gráfico de fluxo de caixa do projeto eólico.....	102
Figura 53 – Gráfico de payback do projeto eólico .....	102
Figura 54 – Gráfico do fluxo de caixa do projeto híbrido .....	105
Figura 55 – Gráfico de Payback do projeto fotovoltaico .....	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidade de carga instalada até setembro de 2018 .....	16
Tabela 2 – Recomendação para inclinação dos módulos solares.....	44
Tabela 3 – Irradiância média mensal (W/m <sup>2</sup> ) da cidade da Lapa .....	54
Tabela 4 – Irradiância diária média (kWh/m <sup>2</sup> .dia) da cidade da Lapa .....	55
Tabela 5 – Consumo mensal de energia elétrica .....	55
Tabela 6 – Comparação entre modelos de módulos fotovoltaicos comerciais .....	56
Tabela 7– Comparação entre modelos inversores comerciais.....	57
Tabela 8 – Temperaturas mensais da Lapa durante o ano de 2017 .....	60
Tabela 9 – Seção dos condutores que compõem o circuito fotovoltaico. ....	63
Tabela 10– Estimativo de geração do projeto fotovoltaico na cidade da Lapa durante um ano .....	66
Tabela 11 – Valores Médios de Velocidade do Vento em Curitiba e na Lapa.....	70
Tabela 12 – Análise Comparativa dos Aerogeradores .....	74
Tabela 13 – Coeficiente de atrito para vários tipos de terreno .....	78
Tabela 14 – Estimativo de geração do projeto fotovoltaico na cidade da Lapa durante um ano .....	95
Tabela 15 – Custos dos componentes do projeto fotovoltaico .....	97
Tabela 16 – Fatores considerados para a análise econômica do sistema fotovoltaico .....	97
Tabela 17 – Análise econômica do sistema fotovoltaico .....	98
Tabela 18 – Fatores considerados para a análise econômica do sistema eólico....	100
Tabela 19 – Análise econômica do sistema eólico.....	101
Tabela 20 – Fatores considerados para a análise econômica do sistema híbrido ..	103
Tabela 21 – Análise econômica do sistema híbrido .....	104

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica;
BDMEP	- Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa;
COCEL	- Companhia Campolarguense de Energia
CRESESB	- Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito;
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
ICMBIO	- Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade;
ICMBIO	- Imposto de Circulação de Mercadorias e Serviços;
INMET	- Instituto Nacional de Meteorologia;
MMA	- Ministério do Meio Ambiente;
MPPT	- Rastreamento do Ponto de Potência Máxima;
MPP	- Rastreamento do Ponto de Potência;
O&M	- Organização e métodos;
SELIC	- Sistema Especial de Liquidação e Custódia;
TIR	- Taxa interna de retorno;
TMA	- Taxa mínima de atratividade;
VPL	- Valor presente líquido;
WES	- <i>Wind Energy Solutions</i> ;

## SUMÁRIO

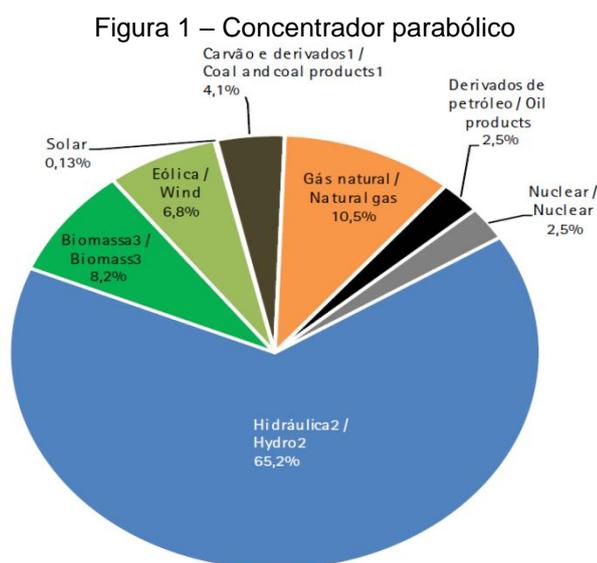
<b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ.....</b>	<b>1</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	14
1.2 OBJETIVOS .....	16
<b>1.2.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>16</b>
<b>1.2.2 Objetivo específico .....</b>	<b>17</b>
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>19</b>
2.1 ENERGIA SOLAR .....	19
2.2 SISTEMA HELIOTÉRMICO .....	19
<b>2.2.1 Torre central de energia .....</b>	<b>22</b>
2.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	22
<b>2.3.1 Silício Monocristalino .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.2 Silício Policristalino .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.3 Silício Amorfo.....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.4 Células multi-junção .....</b>	<b>25</b>
2.4 ENERGIA EÓLICA .....	26
2.5 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	33
<b>2.5.1 Procedimento para Conexão à Rede de Distribuição .....</b>	<b>36</b>
<b>2.5.2 Incidência de Impostos Federais e Estaduais .....</b>	<b>37</b>
2.6 COMPENSAÇÃO ENERGÉTICA.....	38
2.7 VIABILIDADE ECONÔMICA .....	41
<b>2.7.1 Fluxo de caixa .....</b>	<b>41</b>
<b>2.7.2 Valor Presente Líquido (VPL).....</b>	<b>42</b>
<b>2.7.3 Taxa Interna de Retorno (TIR) .....</b>	<b>42</b>
<b>2.7.4 Payback.....</b>	<b>43</b>
<b>3 A ESCOLA .....</b>	<b>43</b>
<b>4 PROJETO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO .....</b>	<b>44</b>
4.1 METODOLOGIA.....	44
<b>4.1.1 Dados de radiação solar.....</b>	<b>44</b>
<b>4.1.2 Dados de Consumo .....</b>	<b>45</b>

4.1.3	Seleção do Módulo Fotovoltaico .....	45
4.1.4	Seleção do Inversor .....	45
4.1.5	DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR .....	53
4.1.6	DADOS DE CONSUMO.....	55
4.1.7	MÓDULO FOTOVOLTAICO .....	56
4.1.8	INVERSOR FOTOVOLTAICO .....	57
4.1.9	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	59
4.1.10	Fator de Capacidade.....	67
<b>5</b>	<b>PROJETO DO SISTEMA EÓLICO.....</b>	<b>70</b>
5.1	SELEÇÃO DOS DADOS METEOROLÓGICOS.....	70
5.2	SELEÇÃO DO AEROGERADOR.....	73
5.3	CORREÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO PARA A ALTURA DO AEROGERADOR .....	77
5.4	ARRANJO DOS AEROGERADORES.....	81
5.5	CAPACIDADE DE GERAÇÃO DO SISTEMA EÓLICO.....	84
5.6	FATOR DE CAPACIDADE .....	86
5.7	RESULTADO .....	87
5.8	CONEXÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA COM A REDE ....	87
5.9	ATERRAMENTO DOS AEROGERADORES DO SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA .....	90
5.10	IMPACTOS DA IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA .....	91
5.10.1	Emissão de Ruídos .....	91
5.10.2	Impactos Visuais.....	92
5.10.3	Impactos Ambientais .....	93
<b>6</b>	<b>PROJETO DO SISTEMA HÍBRIDO .....</b>	<b>94</b>
<b>7</b>	<b>VIABILIDADE ECONÔMICA APLICADA .....</b>	<b>96</b>
7.1	RESULTADO DA ANÁLISE DO SISTEMA FOTOVOLTAICO .....	96
7.2	RESULTADO DA ANÁLISE DO SISTEMA EÓLICO.....	100
7.3	RESULTADO DA ANÁLISE DO SISTEMA HÍBRIDO.....	103
	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>106</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>109</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No ano de 2005, foram consumidos quase 16 bilhões de kWh de energia no mundo e este valor subiu para mais de 21 bilhões de kWh em 2015, ou seja, em apenas 10 anos houve um aumento de 34% na utilização de energia do planeta todo. Em 2017, o Brasil ocupou o sétimo lugar no ranking dos países com maior consumo de energia do mundo, integrando o *top 10* já em 1990. Desde sua finalidade pioneira até os dias atuais, a energia elétrica exerce um papel essencial na vida do ser humano, englobando todos os seus âmbitos, e seu consumo desenfreado requer atenção e planejamento, trazendo alarmantes para toda a população.

Segundo o Inventário de Emissões de Gases do Efeito Estufa de João Pessoa a geração de energia é a principal fonte de emissão de gases do efeito estufa no município e este cenário reflete-se em diversas cidades de todo o país. No ano de 2016, o Brasil emitiu um total de 2,278 bilhões de toneladas brutas de gás carbônico equivalente (CO<sub>2</sub>e), ocupando o lugar de sétimo maior poluidor do mundo. Nesta cena, o setor de Energia foi responsável por 19% das emissões e no Paraná essa porcentagem atingiu 47%. Tal panorama fundamenta-se na composição da matriz energética brasileira, representada abaixo na Figura 1 abaixo.

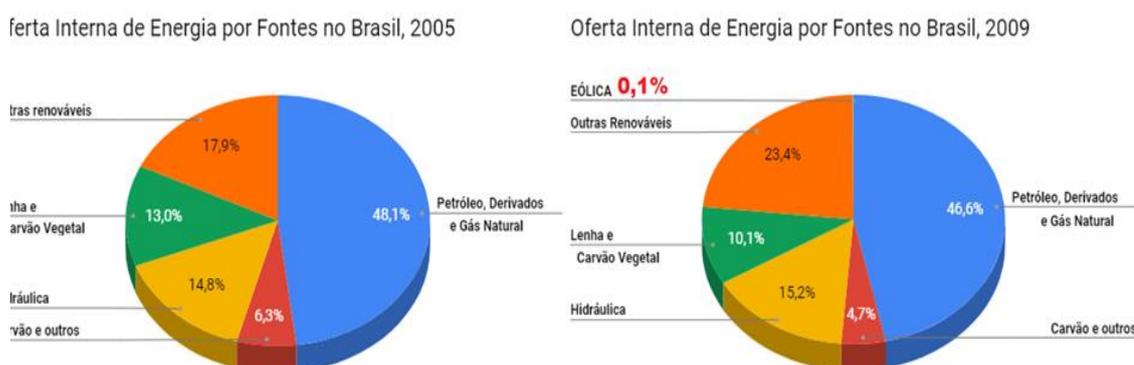


Fonte: EPE (2018)

Prontamente, observa-se a supremacia da hidreletricidade na oferta nacional de energia, considerada uma fonte limpa apesar do impacto ambiental de suas instalações, no entanto, é possível também notar cerca de um quinto do gráfico preenchido por tecnologias de geração não renováveis, como o carvão e o gás natural, que juntas agregaram 179.477 toneladas equivalentes de petróleo (toe) à energia concebida no país no ano passado.

Apesar disso, o retrato da matriz energética nacional nem sempre assemelhou-se ao gráfico anterior, até 2009 as energias renováveis não pertenciam a este quadro e expandir as opções de fontes de energia no país é essencial para que situações como a “Crise do Apagão” em 2001 permaneçam no passado. Medidas governamentais corretamente arquitetadas podem atrair para o setor grandes investimentos, públicos ou privados, aquecendo o mercado das tecnologias amigáveis ao meio ambiente e trazendo desenvolvimento. Prova desta influência, fora a consolidação das energias alternativas na oferta interna de energia, que obtiveram o aumento de 60% de sua produção como resultado dos leilões de energia, favorecidos pelo Novo Modelo do Setor Elétrico Brasileiro implantado em 2004. Na Figura 2 abaixo é possível analisar a comparação entre a matriz energética dos anos de 2005 e 2009.

Figura 2 – Matriz energética brasileira por fonte nos anos de 2005 e 2009



Fonte: EPE (2010)

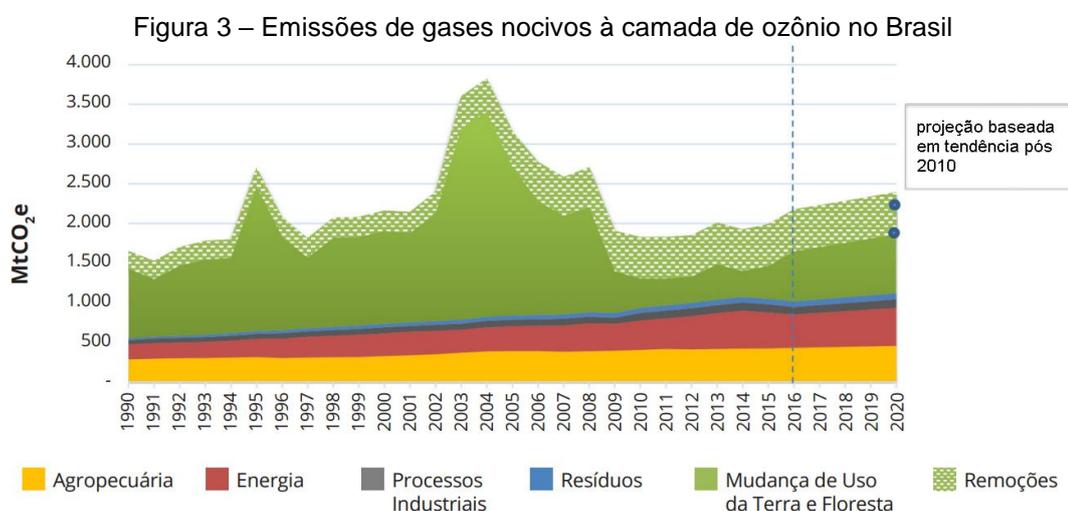
Pesando os altos riscos para o planeta da dependência de opções não-sustentáveis para a produção de energia e o inevitável incremento da demanda mundial, emerge-se o conceito dos Microgrids como uma solução de baixo impacto ambiental. Essa tecnologia resume-se em sistemas de gestão inteligente de distribuição de energia que configuram uma alternativa à utilização de fontes

térmicas ao mesmo tempo em que promovem um refreamento à dependência da hidreletricidade. Em 2012, a ANEEL instituiu a legislação que regulamenta pequenas centrais geradoras, propiciando o acúmulo de créditos de energia aos usuários que utilizam fontes renováveis como: solar, eólica e biomassa.

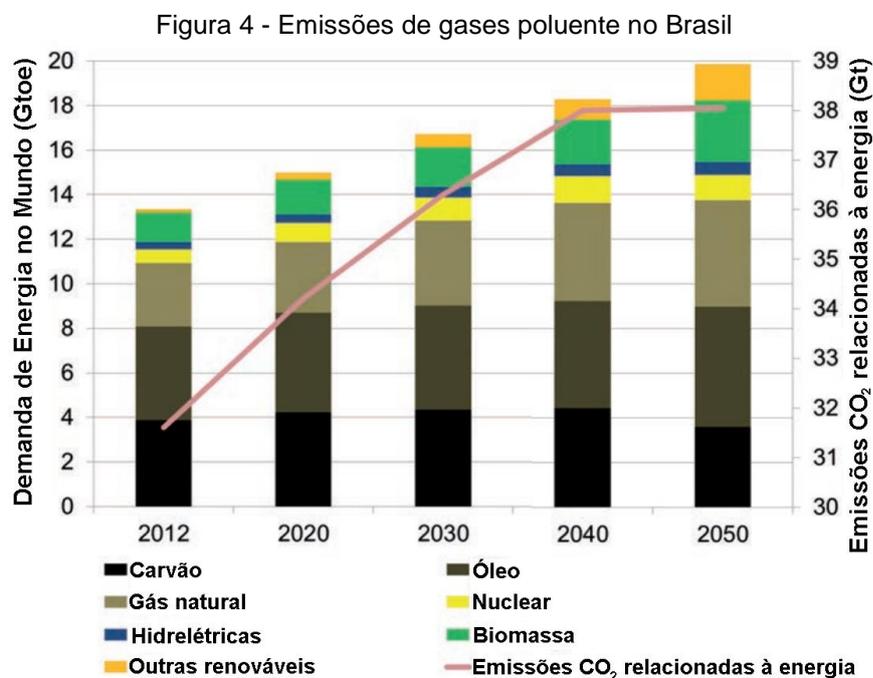
A partir destas perspectivas de mudança, este artigo intenta projetar dois sistemas de geração distribuída a partir das fontes solar fotovoltaica e eólica, em uma escola pública do município da Lapa no Paraná, realizando uma análise comparativa entre ambos, incluindo os aspectos socioeconômicos e ambientais.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Apenas no ano de 2017, 37 bilhões de toneladas de gás carbônico foram ejetadas para a atmosfera ao redor do mundo e torna-se inexecuível ignorar nossa contribuição nesse montante; a aplicação enfática de recursos em fontes não poluentes é imprescindível. Ainda, soma-se à configuração atual, as previsões para a expansão de sua produção de energia e de sua serventia no cotidiano dos indivíduos, assim como para o montante de gases poluentes emitidos. Estudos realizados pelo Observatório do Clima, reunidos no relatório do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), revelaram um aumento contínuo das emissões em todos os setores da economia até 2020. Apesar da emissão líquida prevista para tal ano ter valor mais baixo que os anos de 2003 e 2004, a curva de emissões tem caráter crescente desde 2011, como está retratado na Figura 3 abaixo.



Este comportamento ascendente é também observado em escala mundial, ilustrado na Figura 4 a seguir, onde destaca-se o crescimento das emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas à geração de energia e o aumento da demanda total.



Fonte: Mitsidi (2017)

Confrontando essa propensão, 195 países reuniram-se na França, para fortalecer a resposta global à ameaça da mudança climática e instituíram um acordo consentindo em envidar esforços para limitar o aumento da temperatura média global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. Em 2017, a presidência anunciou a participação brasileira entre os países signatários do Acordo de Paris, comprometendo-se a reduzir 37% das emissões de gases estufa até 2025, e 43% até 2030.

A partir disso, as autoridades brasileiras já incluíram medidas sustentáveis em seus planos de governo e um exemplo disso é o Plano Decenal de Expansão de Energia, que visa uma taxa média de expansão de carga instalada no Brasil de aproximadamente 3,8% a/a. Este investimento atesta o interesse governamental na exploração do potencial do país para a instalação de tais fontes.

A tendência de descentralização tem se refletido fortemente nos projetos solares de geração distribuída, com a fonte eólica também se mostrando de grande

potencial. A tabela 1 apresenta dados de capacidade instalada até setembro de 2018.

Tabela 1 – Capacidade de carga instalada até setembro de 2018

<b>FONTE</b>	<b>2018</b>
Hidráulica (MW)	55.719
Éolica (MW)	10.314
Solar (MW)	454.384
Térmica (MW)	35.285
Capacidade Disponível (MW)	555.703

Fonte: ANEEL (2018)

Contudo, mesmo com o incremento no número de projetos que utilizam fontes renováveis para obtenção de eletricidade, como resultado dos incentivos governamentais a partir de 2010, a maioria destes empreendimentos são desenvolvidos para edificações privadas. Tornar a concepção de instalações sustentáveis e limpas acessível para todos é algo que torna visível a conjuntura alarmista que o planeta se configura atualmente, incluso o contexto ambiental. A carência de informação, num mundo globalizado com o nosso, não mais justifica práticas nocivas ao meio ambiente e o contato com tecnologias que auxiliam na redução de tais práticas é uma notável medida de integração. Com o reconhecimento dos órgãos responsáveis, a respeito do usufruto de projetos disponíveis como motivação para desenvolvimento de tais instalações, é possível que as pessoas tenham acesso a tais inovações previamente.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Esse projeto tem como objetivo a união do contexto de energias renováveis com o âmbito social. O artigo se baseia no estudo comparativo entre sistemas de geração de energia distribuída, emergindo no perímetro coletivo pela estrutura de uma escola pública municipal. Foram consideradas as tecnologias de geração de energia fotovoltaica e eólica para dimensionamento e análise paralela e em conjunto. O intuito é aproveitar toda a área útil disponível no terreno da escola para

aplicabilidade do projeto e suprir a demanda da escola que conta com consumo mensal de médio de 211 kW/mês. Considera-se a intenção da redistribuição da energia excedente produzida para aproveitamento outras escolas do município.

### **1.2.2 Objetivo específico**

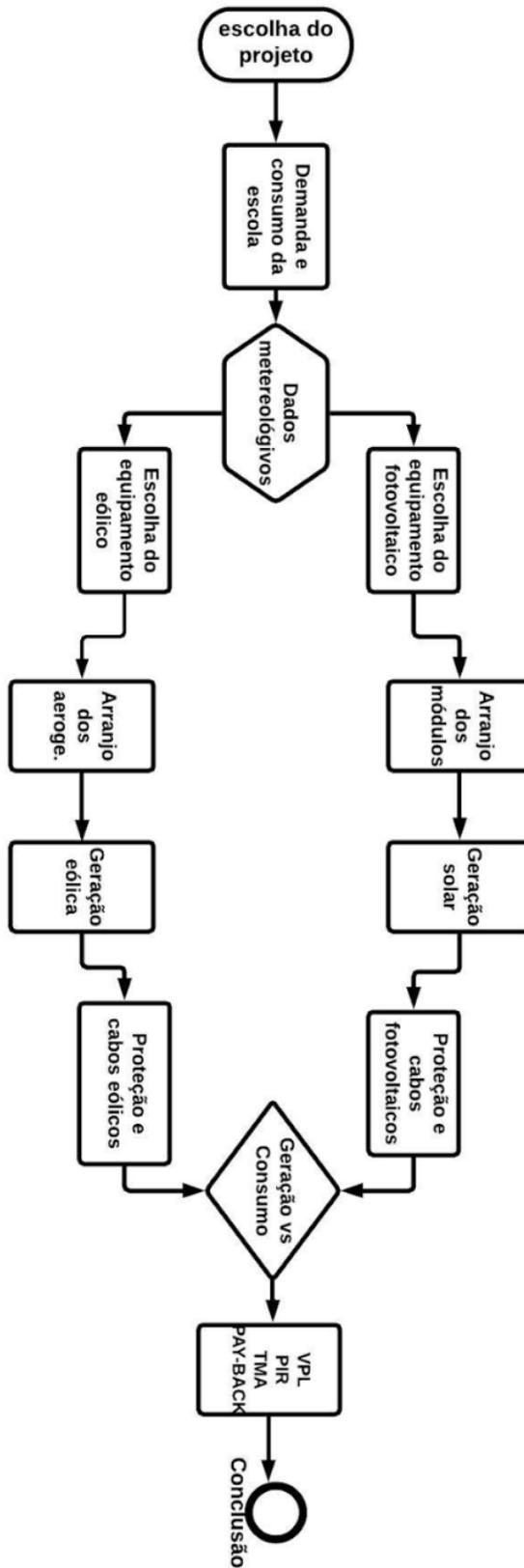
- Levantamento de requisitos para organização e estruturação do projeto e análise de bibliografias.
- Alistamento de dados da escola
- Dimensionamento do sistema fotovoltaico
- Dimensionamento do sistema eólico
- Análise de viabilidade econômica de cada sistema dimensionado
- Avaliação comparativa entre ambos os sistemas
- Dimensionamento de projeto de geração distribuída de energia via tecnologias fotovoltaica e eólica para análise comparativa de sistemas.

### **1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O primeiro capítulo trata-se da introdução, justificativa e os objetivos do estudo. O segundo capítulo trata da fundamentação teórica referente às gerações fotovoltaica e eólica assim como os principais aspectos da geração distribuída. O terceiro capítulo, pertinente ao sistema fotovoltaico, apresenta a metodologia para seu dimensionamento e o projeto desenvolvido para o mesmo. Com o projeto realizado, a partir da metodologia relacionada, também apresentada, o quarto capítulo traz o dimensionamento do sistema eólico. No quinto capítulo foram apresentados os conceitos financeiros em conjunto com as análises de viabilidade da implementação realizadas para ambos os sistemas de geração de energia elétrica englobando diferentes panoramas de investimento. Para finalizar, as considerações terminativas e a conclusão do trabalho.

O fluxograma da Figura 5 traz a estrutura e metodologia do trabalho.

Figura 5 - Fluxograma da estrutura e metodologia empregadas



Fonte: Autoria Própria (2017)

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 ENERGIA SOLAR

O Sol é a estrela centro do sistema planetário que compõe a Terra. Sua massa é 333000 vezes a da Terra e seu volume é 1400000 maior, dele emana toda a energia eletromagnética utilizada para suprir a demanda energética no planeta, que por sua vez demora 8 minutos e 4 segundos para chegar. Anualmente fornece para a atmosfera terrestre 10000 vezes a energia consumida mundialmente, cerca de  $1,5 \times 10^{18}$  kWh, provando que é a fonte energética mais confiável de luz e vida. Com os sistemas corretos de captação e conversão de seu potencial energético, será possível adquirir energia inesgotável até o fim de toda vida terrestre.

A energia solar pode ser convertida a partir do sistema fotovoltaico, onde a irradiação solar é transfigurada diretamente em energia elétrica, ou do sistema heliotérmico, no qual a radiação é convertida em energia térmica para posteriormente se transformar em elétrica.

Ambos os sistemas possuem possibilidade de serem utilizados e aprimorados pelos próximos 5 bilhões de anos, tempo de vida estimado para o Sol. Segundo Albert Zijlstra, professor de astrofísica da Universidade de Manchester, seu fim ocorrerá pela falta de hidrogênio no núcleo, provocando um colapso no centro que o transformará em uma nebulosa planetária massiva.

### 2.2 SISTEMA HELIOTÉRMICO

A energia Heliotérmica é originada a partir da grande concentração de raios solares em um ponto, tendo como objetivo final gerar eletricidade ou ser usada para processos industriais que demandam altas temperaturas. Isso acontece porque espelhos são projetados para refletir a radiação em direção a um refletor.

Para obter energia elétrica com o sistema heliotérmico é necessário capturar e armazenar os raios solares, transformar em energia mecânica e finalmente converter para eletricidade. Esse calor intenso é captado pelo refletor, que aumenta a temperatura da água dentro da usina e resulta em vapor. Depois disso o processo

continua como uma termoelétrica comum onde o vapor gerado movimentava uma turbina acionando um gerador para alcançar o resultado esperado.

Contrário a algumas crenças populares, construções de usinas heliotérmicas não roubam espaço da agricultura, pois são construídas em regiões improdutivas; o fluido usado não é venenoso e pode ser controlado caso ocorra um vazamento; não causam riscos para pilotos de avião uma vez que as aeronaves voam em alturas onde não há riscos; e também não esgotam os recursos hídricos da região, visto que mesmo com a necessidade de limpeza dos espelhos utilizando água, a refrigeração do ciclo água-vapor é inteiramente feita com ar.

A grande vantagem dessa tecnologia é que caso o receptor colete mais radiação do que a usina consegue transformar em eletricidade, uma parte da energia do Sol pode ser estocada em forma de calor em um depósito térmico. Esse armazenamento acontece por meio de um método de retenção de calor com sal derretido ou módulo de cerâmica. Portanto a heliometria pode ser considerada um modelo limpo, seguro e lucrativo para produção de eletricidade. Existem tipos distintos de usinas heliotérmicas e alguns deles serão tratados abaixo.

Coletores solares são trocadores de calor que fazem a conversão dos raios solares coletados em calor. Essas estruturas são divididas em não concentradores e concentradores. Onde o primeiro é aplicável para sistemas que necessitam de baixa temperatura, o segundo é utilizado em aplicações que demandam temperaturas elevadas e pode ser cilíndrico-parabólico, paraboloidal ou linear fresnel .

Os concentradores cilíndricos-parabólicos são ilustrados na Figura 6.

Figura 6 – Concentrador parabólico



Fonte: Torresol Energy (2018).

O concentrador parabólico concentra a luz solar em um receptor localizado no ponto focal de um espelho parabólico. O feixe refletido é absorvido e aquece um fluido até aproximadamente 750 °C. A Figura 7 abaixo representa esse tipo de mecanismo.

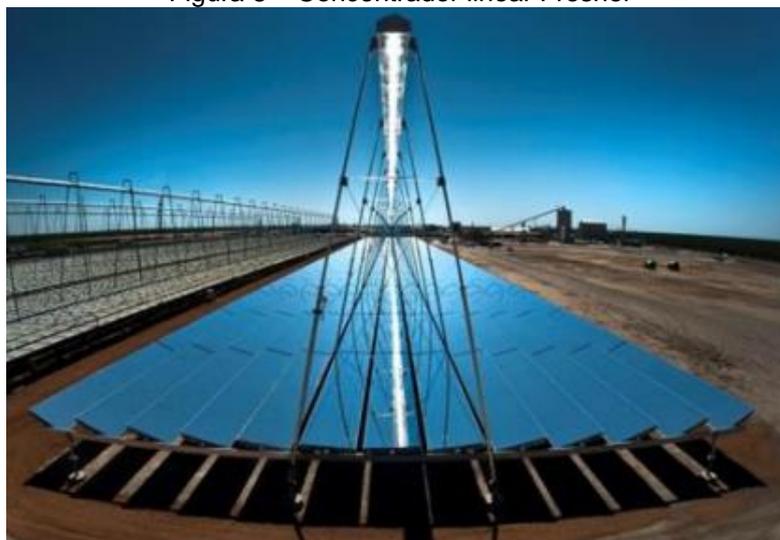
Figura 7 – Concentrador parabólico



Fonte: United Sun Systems International Ltd (2012).

O concentrador linear Fresnel é parecido conceitualmente com o coletor cilindro parabólico, porem é constituído por segmentos longos e estreitos de espelhos planos que focalizam os raios solares. Pelo fato de não serem esféricos, possuem mais perdas ótimas e menor eficiência. A Figura 8 ilustra essa configuração.

Figura 8 – Concentrador linear Fresnel



Fonte: CENPES/PDRGN/EE (2017).

### 2.2.1 Torre central de energia

O receptor central, no qual toda a energia solar captada pelos arranjos de refletores é direcionada, fica instalado no alto de uma torre. O calor concentrado absorvido pelo receptor é transferido para um fluido que pode ser armazenada ou produzir energia elétrica. Como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Receptor central



Fonte: Torresol Energy (2018).

### 2.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Outra maneira de utilizar a radiação solar é obtendo a energia fotovoltaica através do efeito fotovoltaico. Esse fenômeno, relatado por Edmond Becquerel, em 1839, é o surgimento de uma diferença de potencial, produzida pela absorção da luz, nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, de modo que a energia elétrica fica armazenada, mantendo fluxo de elétrons num circuito elétrico apenas enquanto houver incidência de luz. Em 1876 foi contemplado o primeiro aparato fotovoltaico proveniente dos estudos das estruturas de estado sólido, em 1956 sua produção industrial foi iniciada e vem se desenvolvendo até a atualidade com a difusão desse sistema por meio de um dispositivo chamado de célula fotovoltaica.

Atualmente o principal material na fabricação das células fotovoltaicas é o Silício (Si), que tem sido explorado nas formas cristalino, policristalino e amorfo. Vale ressaltar que esse material é o segundo mais abundante na terra, fazendo com que

essa tecnologia seja considerada muito promissora. Seus átomos possuem quatro elétrons que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina. Se átomos com cinco elétrons de ligação forem adicionados, sobrar um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e permanecerá fracamente ligado a seu átomo de origem. Portanto com pouca energia térmica o elétron se liberta e se desloca para a banda de condução, dessa forma o átomo com cinco elétrons de ligação é um dopante doador de elétrons e é chamado de dopante n ou impureza n.

No entanto, se átomos com apenas três elétrons de ligação forem introduzidos, acontecerá falta de um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede. O nome dado para essa situação é Buraco ou lacuna, decorre que, com pouca energia térmica, um elétron de um sítio vizinho pode passar para a posição vaga, resultando no deslocamento do buraco. Com isso conclui-se que o átomo de três elétrons é um aceitador de elétrons ou um dopante p.

Se no Silício puro forem adicionados átomos de três elétrons em uma metade e de cinco elétrons na outra, será obtido uma junção pn. Por conseguinte, elétrons livres do lado n passam ao lado p onde são capturados pelos buracos, isso faz com que o lado p fique negativamente carregado e o lado n torne-se eletricamente positivo. Logo, um campo elétrico permanente é originado para dificultar a passagem de mais elétrons de n para p, tendo como consequência a barragem dos elétrons livres remanescente no lado n.

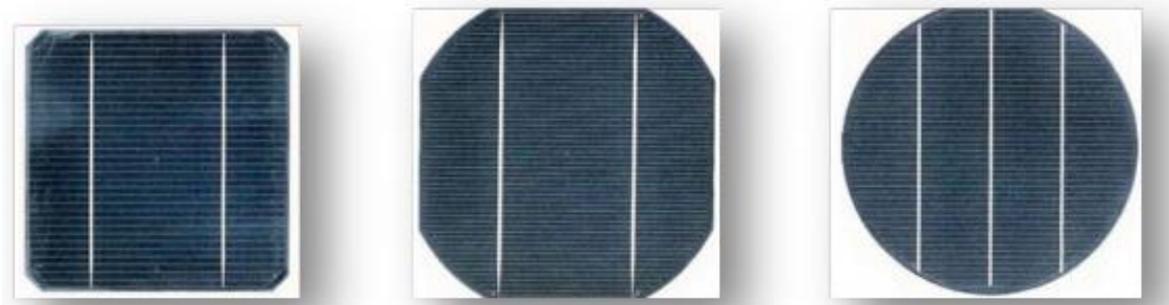
Quando uma junção pn é exposta a fótons com energia maior que o gap, nos pontos onde o campo elétrico é diferente de zero, haverá o aceleração de cargas que gerarão uma corrente através da junção. Originando assim, a diferença de potencial chamada de efeito fotovoltaico que rege o funcionamento das células fotovoltaicas. A seguir serão apresentados os principais tipos de células utilizados comercialmente.

### **2.3.1 Silício Monocristalino**

São obtidas a partir de fatias de um único e grande cristal e mergulhadas em silício fundido. No decorrer da fabricação, a matéria prima recebe pequenas quantidades de boro formando um semiconductor dopado no tipo p, no qual é introduzido impurezas do tipo n, e finalmente são submetidas a vapor de fósforo em

fornos de altas temperaturas. As células de silício monocristalino geralmente possuem coloração azul-escura ou quase preta (com antirreflexo), cinza ou azul-acinzentada (sem antirreflexo). Costumam ser as mais utilizadas com estimativa de eficiência de 15% podendo chegar em 18% (CRESESB, 2014). A Figura 10 ilustra esse tipo de célula.

Figura 10 – Placas de silício monocristalino



Fonte: Blue-sol (2013).

### 2.3.2 Silício Policristalino

Esse tipo de célula é produzido com blocos de silício obtidos por fusão de silício puro. Depois de colocados em moldes, o material esfria e solidifica-se, de forma que os átomos não se acomodam em um único cristal e ocorre a formação de uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais. Possui coloração azul (com antirreflexo), cinza prateado (sem antirreflexo). Como seu processo de preparação é menos rigoroso, costuma ser mais barato comparado ao monocristalino e ter a eficiência menor, em torno de 12,5% (CRESESB, 2014). Como é representado na Figura 11.

Figura 11 – Placas de silício policristalino.



Fonte: Blue-sol (2013).

### 2.3.3 Silício Amorfo

O Silício amorfo (sem forma) possui uma rede irregular ao invés de uma estrutura cristalina. De forma que ligações livres são formadas para absorver hidrogênio até a saturação. A eficiência dessa célula diminui nos primeiros 6 a 12 meses de funcionamento chegando a 5% e 9%, porque o *Efeito Staebler-Wronski* provoca a degradação do material através da incidência de luz.

### 2.3.4 Células multi-junção

Esse tipo de tecnologia foi desenvolvido recentemente e já conquistou grandes feitos em relação à eficiência. Ela consiste na junção de duas ou mais células fotovoltaicas, cobrindo uma faixa maior do espectro de radiação solar e absorvendo mais energia luminosa. Conforme a luz atravessa cada camada, a energia é extraída pela junção individual no comprimento de onda mais eficiente, enquanto a fração não utilizada da luz passa para a camada seguinte.

A qualidade da célula pode ser aumentada ainda mais com a utilização conjunta de um sistema fotovoltaico de concentração (CPV), ilustrado na Figura 12, que converte a energia dos raios solares em energia elétrica com o uso de um sistema óptico concentrando a radiação na célula. O objetivo final é ampliar a radiação que a célula normalmente receberia, reduzir a área celular e aumentar a eficiência. Atualmente a máxima eficiência obtida com a junção desses dois sistemas é de 46% (PORTAL SOLAR, 2017).

Figura 12 – Módulo CPV de segunda geração com células tripla-junção



Fonte: Solfocus (2011).

## 2.4 ENERGIA EÓLICA

Desde os primórdios do desenvolvimento de máquinas para usufruto humano, a força provinda dos ventos apresenta papel de destaque como fonte de energia para inúmeros processos que se sucedem por todo o planeta. Tendo o deslocamento de barcos como uso primário há milhares de anos, a energia eólica permitiu destarte, a primeira geração da globalização.

O vento nada mais é que o deslocamento de ar de regiões com maior pressão atmosférica para regiões com menor pressão atmosférica. Essa desigualdade de pressão entre extensões no céu, é resultado de diversos aspectos, principalmente as fontes de calor presentes no meio ambiente, incluindo o Sol, que atua de maneira irregular nas localidades, dependendo de sua distância e posição. Sendo o Sol, considerado uma fonte de inesgotável de energia, o vento como seu procedente, conquista essa denominação também.

Felizmente, as inúmeras serventias desta potência natural continuaram a ser exploradas, e a mesma fora empregada a posteriori como força de propulsão rotativa para cata-ventos e moinhos. Os moinhos de vento com eixo horizontal, muito conhecidos hoje em dia, são, na realidade, um aperfeiçoamento dos primeiros moinhos da humanidade que apresentavam eixo vertical. Estas estruturas, extremamente engenhosas, configuraram um notável avanço nas técnicas rudimentares de agricultura, com larga escala de aplicação na moedura de grãos.

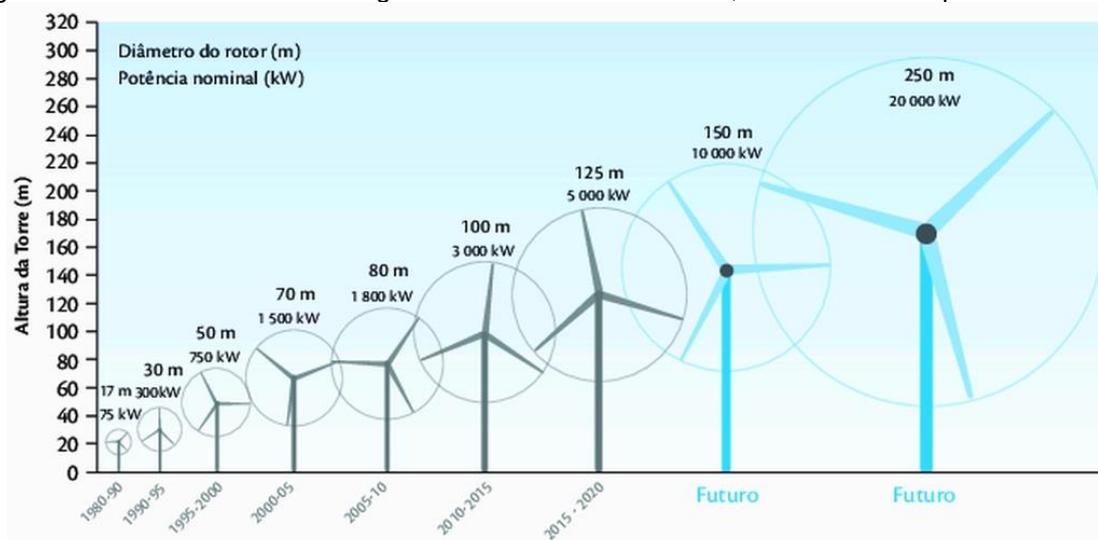
Apesar do declínio da utilização da energia eólica durante a Primeira Revolução Industrial, com o surgimento da máquina a vapor, os cata-ventos seguiram com alta proporção de instalação, principalmente nos Estados Unidos, operando na maior parte dos casos como mecanismo de bombeamento de água com arranjos metálicos, pistões e bombas.

Com a eclosão da rede elétrica, iniciaram-se diversas pesquisas na área para criação e evolução de tecnologias que utilizariam as estruturas de energia eólica para a geração de energia elétrica; deste modo, os moinhos e cata-ventos são os precursores das atuais turbinas eólicas utilizadas na geração de energia. O primeiro maquinismo utilizado para converter a energia dos ventos em corrente elétrica estabeleceu-se em Ohio nos Estados Unidos e operou por cerca de 20 anos. Duas importantes inovações neste maquinismo são relevantes para o progresso

desta técnica; além da altura utilizada pelo invento estar dentro das categorias dos moinhos de ventos, ao sistema fora integrado um dispositivo para ampliação da rotação das pás, possibilitando maior exploração do vento na conversão para eletricidade.

Desde então, é impressionante a ampliação da atividade e participação dos aerogeradores nas redes elétricas de países do mundo inteiro em conjunto com outras técnicas de geração de energia. Na Figura 13, abaixo, é possível observar a magnitude do crescimento desses aparelhos com o passar dos anos.

Figura 13 – Crescimento dos aerogeradores – diâmetro do rotor, altura de torre e potência nominal.



Fonte: IEA (2013).

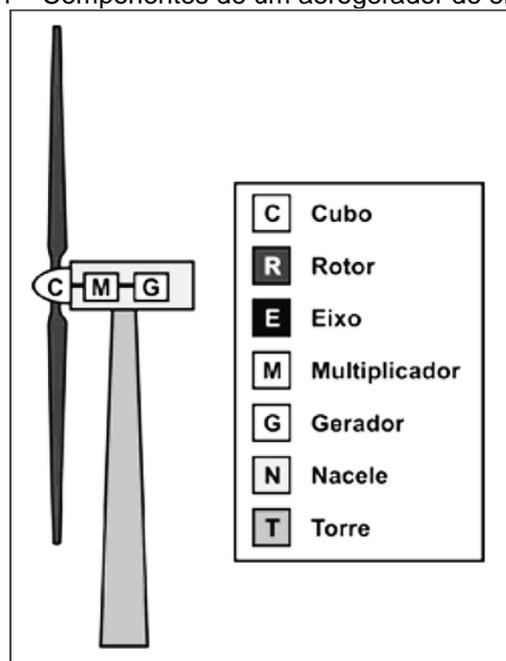
Ao analisar o perfil desse avanço, é possível conjecturar um cenário promissor para a indústria eólica mundial para as próximas décadas. Apesar da desaceleração no aumento da potência instalada, a busca por um crescimento econômico mais sustentável é um grande impulso para a prosperidade do setor.

No Brasil, onde a maior parte da energia elétrica é concebida em usinas hidrelétricas, a escassez hídrica prejudica a geração básica de energia e impele a aplicação de tecnologias alternativas que, além de contribuir para a redução da emissão de gases nocivos, estende a oferta interna de energia e possibilita a diversificação da matriz energética. Os aerogeradores apresentaram aumento expressivo em sua capacidade instalada no país, principalmente a partir dos anos 2000.

Neste contexto, o Balanço Energético Nacional de 2017, ilustrado anteriormente na Figura 1, quando comparado com o levantamento de 2009, Figura 2, comprova a transformação da matriz nacional de energia, com a fonte eólica assumindo uma fatia considerável na produção de energia elétrica. O Brasil é um país privilegiado devido à abundância de fontes renováveis em seu território, assumindo grande importância estratégica, como é o caso da energia eólica. Em 2016, 5,4% da oferta interna de energia no país tinha origem eólica, com um crescimento de 55% comparado ao seu desempenho no ano anterior. Em 2017, esse crescimento foi de 26%, menor, porém semelhantemente expressivo e o Brasil subiu para a oitava posição no ranking mundial de capacidade instalada de energia eólica, totalizando 12,76 GW (ABE Eólica, 2018).

Para produzir energia elétrica a partir do vento é preciso de aerogeradores sustentados por torres para captação do vento incidente. Os principais componentes dos aerogeradores são a turbina eólica, a torre, a nacela e o rotor. A Figura 14, abaixo, apresenta uma das principais configurações de um aerogerador de eixo horizontal, que se diferenciam, basicamente, pelo tamanho e formato da nacela, presença ou não de caixa multiplicadora e pelo tipo de gerador utilizado (CRESEB, 2009).

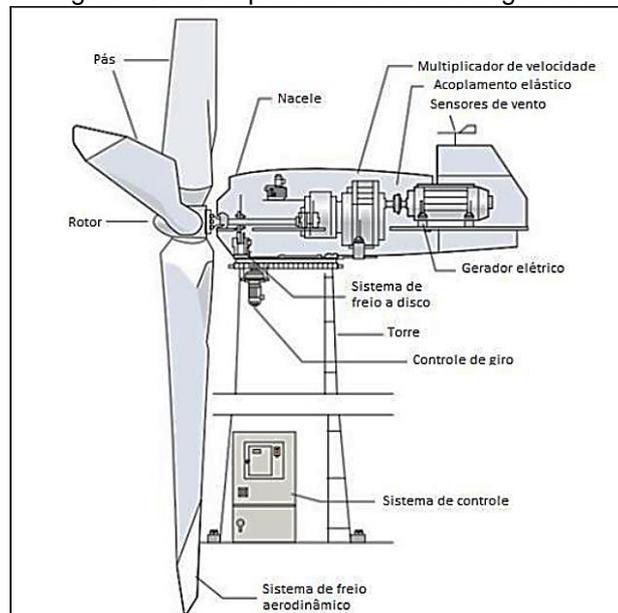
Figura 14 – Componentes de um aerogerador de eixo vertical



Fonte: CRESEB (2008).

Cabe salientar que a nacele é uma das principais estruturas montada sobre a torre, onde se situam o gerador, a caixa de engrenagens, medidor de vento e motores para rotação do sistema para o melhor posicionamento em relação ao vento. Ainda, segundo Melo (2009), o principal elemento dos aerogeradores é o rotor, pois é ele que propulsiona a conversão em energia mecânica rotativa a energia mecânica dos ventos. Outros elementos importantes na composição do aerogerador estão representados na Figura 15, a seguir.

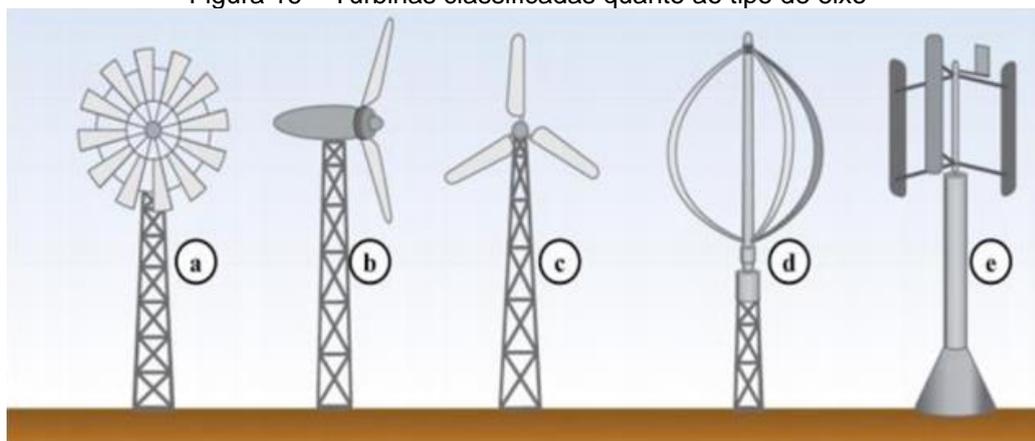
Figura 15 – Componentes de um aerogerador



Fonte: CBEE/UFPE, 2000 apud ANEEL (2008).

As turbinas comerciais utilizadas para geração de energia elétrica são tipicamente as turbinas de sustentação de eixo horizontal. Os rotores de eixo horizontal precisam se manter perpendiculares à direção do vento para capturarem o máximo de energia (CUSTÓDIO, 2013). Abaixo, a Figura 16 ilustra os tipos de turbinas classificadas de acordo com o eixo do rotor: horizontal (mais usual) e vertical. Sendo (a), (b) e (c) eixo horizontal e (d) e (e) eixo vertical.

Figura 16 – Turbinas classificadas quanto ao tipo de eixo



Fonte: South (2013).

A transmissão de energia alusiva a esse processo sucede-se na transferência de energia mecânica entre as massas de ar e as turbinas que ocorre em razão da incidência do vento sobre as pás das turbinas, quando estas começam a girar adquirindo energia cinética. Esse movimento giratório é transportado às turbinas que giram em torno de seu eixo, conhecido como eixo de baixa velocidade. Uma caixa de engrenagens é então acionada, fazendo conexão entre o eixo do rotor e o eixo das turbinas e regulando a velocidade de cada eixo. O segundo eixo, também conhecido com eixo de alta velocidade, é conectado a um gerador elétrico, responsável por converter a energia mecânica rotacional em energia elétrica.

A energia resultante gerada tem natureza alternada com frequência variável, o que inviabiliza a conexão direta entre o gerador eólico e a rede elétrica. Neste caso é frequente o uso de complexo de conversores elétricos de potência, sendo inicialmente aplicado um retificador, ou conversor CA-CC, modificando a essência da corrente que passa de alternada para contínua. Em seguida, admite-se um conversor CC-CA, para que a corrente final tenha caráter alternado, porém com frequência e outros parâmetros adequados à ligação com a rede. Dependendo da rede local, pode existir a necessidade do emprego de um transformador para viabilizar essa conexão.

Em virtude da variação da velocidade do vento e de sua direção de incidência no decorrer do dia, os aerogeradores modernos são equipados com recursos tecnológicos que os adequam às oscilações meteorológicas. As principais técnicas de um aerogerador são apresentadas a seguir.

- Controle Estol: também conhecido como controle *stall* ou controle passivo, consiste na confecção das pás das turbinas de acordo com um projeto aerodinâmico, de forma que quando a velocidade do vento incidente sobre estas ultrapassa o valor da velocidade nominal para o qual o aerogerador foi projetado, o escoamento do vento em torno da pá “descola” da sua superfície, aumentando a sua força de arrasto (NETO, P.A.B. Energia Eólica, UFLA/FAEPE, Lavras).

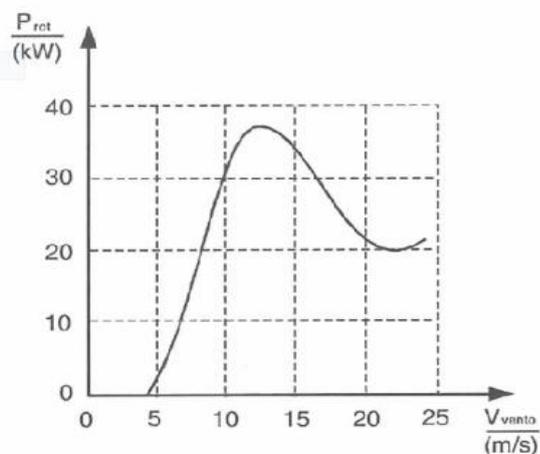
A Figura 17, abaixo, ilustra a ocorrência deste tipo de controle, reservando a observação de que a força de sustentação faz a pá girar, e a força de arrasto atua para a redução da velocidade da pá.



Fonte: NETO (2010).

A Figura 18 ilustra a curva de potência de um aerogerador com controle do tipo estol.

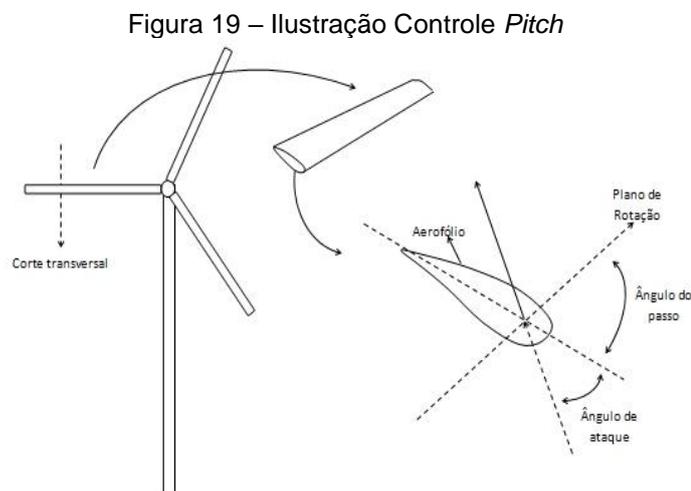
Figura 18 – Curva de Potência com Controle Estol



Fonte: CARVALHO (2003).

- Controle *Pitch*: também denominado por controle ativo, consiste na alteração do ângulo de passo das hélices, através da sua rotação longitudinal destas, através de acionadores eletromecânicos. Com esta alteração, reduz-se o ângulo de ataque da incidência dos ventos sobre as hélices do aerogerador, reduzindo, desta forma, a energia cinética captada pelas pás e, conseqüentemente, e a sua velocidade de rotação (NETO, P.A.B. Energia Eólica, UFLA/FAEPE, Lavras).

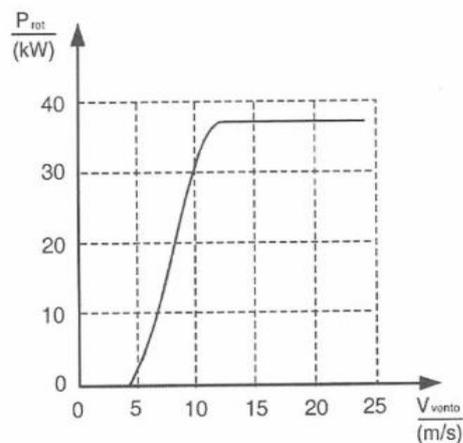
A Figura 19, abaixo, ilustra a atuação do controle *pitch*, com a variação da angulação das pás de uma turbina.



Fonte: NETO (2010).

A seguir, a Figura 20, ilustra a curva de potência de um aerogerador com controle do tipo *pitch*.

Figura 20 – Curva de Potência com Controle *Pitch*

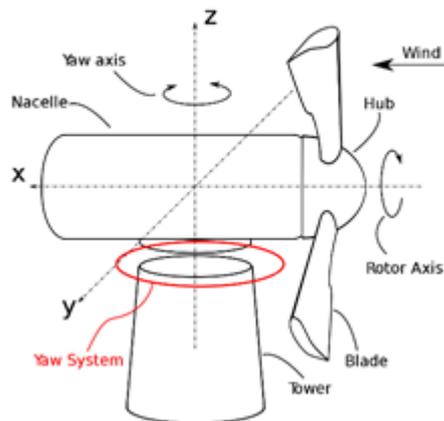


Fonte: CARVALHO (2013).

- Controle *Yaw*: enquanto os controles do tipo *Pitch* e Estol abordam as questões resultantes da variação da velocidade do vento, o controle *Yaw* é uma solução para problemas inerentes à variação da direção de incidência do vento. Este tipo de controle consiste na capacidade da torre de sustentação de girar a nacelle e, conseqüentemente, o eixo das turbinas, de forma a reduzir o ângulo entre a incidência do vento sobre as pás e a eixo frontal da nacelle. Com isso, eleva-se a incidência de vento sobre as turbinas e, conseqüentemente, a eficiência do sistema. Para realizar este ajuste, a torre deve conter um motor capaz de mover a nacelle e um sistema de aferição da direção do vento em tempo real no local. Com isso, este tipo de controle tende a elevar o custo do investimento e estar presente somente em aerogerador modernos.

Abaixo, a Figura 21 ilustra o controle *Yaw* sobre um aerogerador.

Figura 21 – Ilustração Controle *Yaw*



Fonte: Hanuman Wind (2009).

## 2.5 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Apesar de amplamente utilizado e estudado na engenharia elétrica atualmente, não há consentimento exato sobre o que é Geração Distribuída. Quando se faz uso desta expressão, ela algumas vezes orbita características que são

concordantes entre diferentes autores e legislações, mas nenhuma das definições é adotada sistematicamente.

A geração distribuída ou geração descentralizada, pode ser definida como uma fonte conectada à rede de distribuição e ao consumidor que não é despachada de forma centralizada e que, portanto, é destinada a cargas locais ou próximas sem necessidade de percorrer distâncias significativas.

De qualquer forma, este conceito não é uma novidade. Anteriormente, alguns homens ricos ingleses possuíam produção de eletricidade dentro de suas próprias casas e as primeiras estações de geração de energia elétrica eram localizadas perto dos usuários, tinham uma potência atualmente considerada baixa e distribuíam a energia elétrica a distâncias muito pequenas, ficando restrito seu transporte dentro da própria cidade, inexistindo um sistema de transmissão de energia elétrica.

A geração distribuída é caracterizada pela proximidade do cliente consumidor, em geral com impacto apenas no sistema de distribuição local, o que pode levar à redução dos custos totais de investimento em geração, em virtude da diminuição dos investimentos em transmissão e distribuição.

Contudo, não pode ser considerada uma solução tecnológica, mas muito mais uma solução econômica e política. Os aparatos determinantes do ressurgimento deste método de se produzir energia elétrica, estes que são os seus primórdios, os pequenos geradores a combustível fóssil, a cogeração e as pequenas hidrelétricas, existem em plenitude prática desde o início da Eletrificação e do sistema elétrico nos anos 1880. Também as células fotovoltaicas, que viram nascer suas primeiras aplicações práticas e comerciais nas missões espaciais nos anos 1950, foram muito importantes no renascimento da Geração Distribuída. Além disso, investimentos feitos para a corrida espacial da Guerra Fria, em aplicações para satélites e foguetes, produzindo eletricidade a milhares de quilômetros distantes das redes de distribuição e dos consumidores locais terrestres no espaço sideral e deram abertura para aplicações comerciais. Por fim, a tecnologia teve tantas pesquisas na virada da década de 1970 para 1980 que ela não podia ser mais parada. Apesar das adversidades, após um início fervoroso não foi mais possível deter a Geração Distribuída. Ela se consolidou e as discussões aumentaram e se

espalharam desde então. Hoje, ela não é mais vista como uma solução para crises, mas sim para todas as circunstâncias.

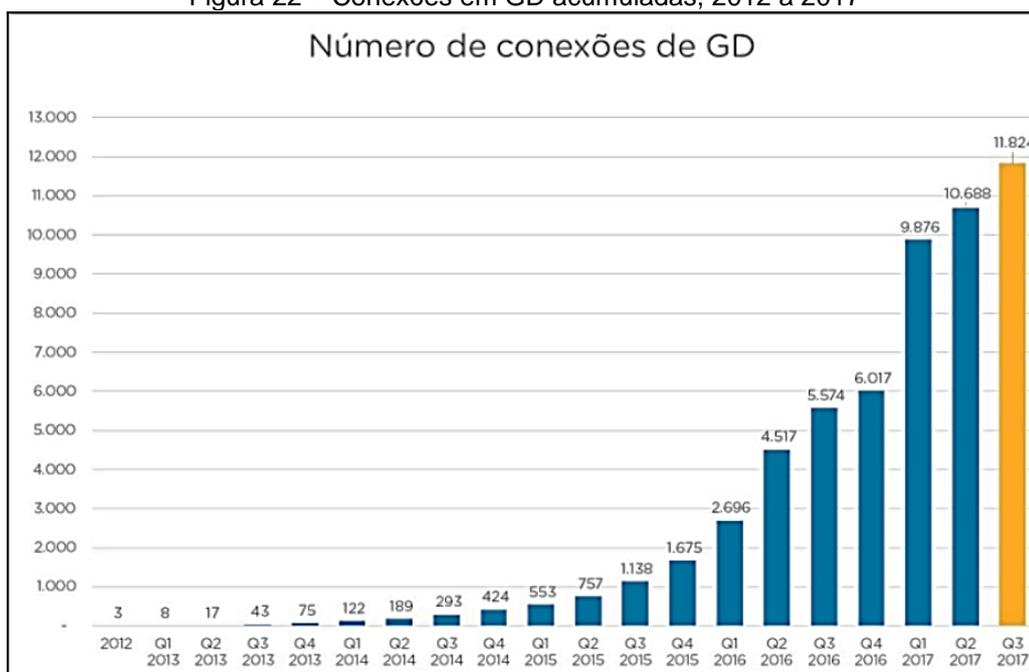
Para darem uma definição precisa sobre a geração, os autores levam em conta os seguintes aspectos: o propósito, a localização, a capacidade de geração, a área de entrega de energia elétrica, a tecnologia empregada, o impacto ambiental, o modo de operação, o proprietário e a penetração da geração. Cada um destes pontos é discutido minuciosamente.

Um ponto importante a se notar é que a geração distribuída ainda que ligada ao sistema de distribuição afeta o sistema de transmissão, sendo as mudanças nos fluxos de potência e o conseqüente menor fluxo nos transformadores da rede de transmissão algumas das conseqüências. Outro ponto é que grandes usinas eólicas ou fotovoltaicas, por exemplo, impactam a operação do sistema de transmissão de forma parecida com o que estas mesmas fontes fazem no sistema de distribuição. Portanto, a indiferença da definição dada quanto à geração estar na rede de distribuição ou na de transmissão é positiva.

Enfim, para a ANEEL, geração distribuída é caracterizada como a instalação de geradores de energia a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada, localizados próximos dos centros de consumo e conectados à rede elétrica através de unidades consumidoras. Para potência instalada inferior a 75 kW a geração distribuída é classificada em microgeração distribuída até 75 kW e mini geração distribuída para potências instaladas superiores a 75 kW e inferiores a 3 MW para fontes hídricas 5 MW para as demais (ANEEL,2016).

A descentralização da matriz energética verificada no Brasil pode ser aferida com base na análise do crescimento de empreendimentos de geração distribuída nos últimos anos. O país atingiu 18.938 instalações de sistemas fotovoltaicos de micro e minigeração até dezembro de 2017. Esse valor representa um crescimento de 175% em comparação com o ano anterior. Além disso, a ANEEL estima um forte crescimento da geração distribuída em projeção para 2024: as quase 2.000 instalações atuais podem ultrapassar 1,2 milhão de consumidores, com uma capacidade instalada superior a 4.500 MW (ANEEL, 2016). No Gráfico é possível visualizar a evolução da geração distribuída no Brasil no período de 2012 a 2017.

Figura 22 – Conexões em GD acumuladas, 2012 a 2017

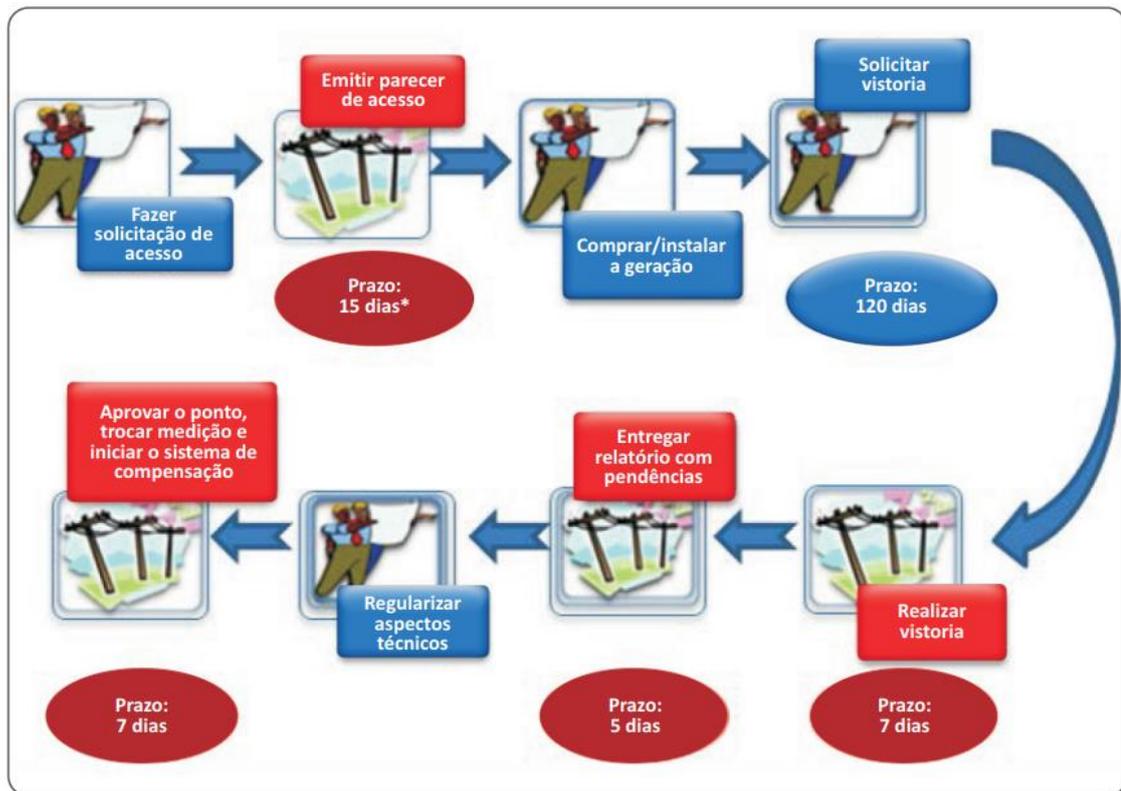


Fonte: Astrasolar (2017).

### 2.5.1 Procedimento para Conexão à Rede de Distribuição

Para o reconhecimento da unidade como micro ou mini geração distribuída são necessárias solicitações e pareceres de acesso detalhados na secção 3.7 do modulo 3 do PRODIST (ANEEL,2016). Abaixo, a Figura 13 apresenta as etapas obrigatórias para que o acessante tenha direito a conexão, onde os passos em vermelho representam etapas realizadas pela distribuidora e em azul pelo consumidor (ANEEL, 2016). Apesar de amplamente utilizado e estudado na engenharia elétrica atualmente, não há consentimento exato sobre o que é Geração Distribuída. Quando se faz uso desta expressão, ela algumas vezes orbita características que são concordantes entre diferentes autores e legislações, mas nenhuma das definições é adotada sistematicamente.

Figura 23 – Procedimento para acesso à Rede de Distribuição



Fonte: ANEEL (2016).

## 2.5.2 Incidência de Impostos Federais e Estaduais

A definição sobre a cobrança de tributos federais e estaduais cabe à Receita Federal do Brasil e às Secretarias de Fazenda Estaduais. A seguir serão apresentadas informações referentes ao ICMS e PIS/COFINS (ANEEL,2016).

- **ICMS – IMPOSTO SOBRE CIRCULAÇÃO DE MERCADORIAS E SERVIÇOS**

É um tributo estadual aplicável a energia elétrica. Desde a publicação do Convenio ICMS16 de 22/04/2015 o ICMS incide somente sobre a diferença entre consumo e geração e é isento para geração excedente. O estado do Paraná está entre os poucos que ainda não aderiram ao ICMS 16/2015 fazendo com que o ICMS incida sobre a geração excedente (ANEEL,2016).

- PIS/COFINS

São tributos federais, logo aplicáveis a todos os estados. Desde a publicação da lei nº13.169/2015 de 06/10/2015 o tributo é aplicado somente sobre a diferença positiva entre consumo e energia injetada na rede elétrica.

## 2.6 COMPENSAÇÃO ENERGÉTICA

Em 2012 entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, tratando da micro e minigeração distribuída de energia elétrica. A nova norma possibilita que o consumidor brasileiro consiga gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade.

Quando a energia injetada na rede for maior que a consumida, o consumidor receberá um crédito em energia (kWh) que será utilizado para abater o consumo em outro posto tarifário, para consumidores com tarifa horária, ou na fatura dos meses subsequentes. Existe ainda a possibilidade de o consumidor utilizar esses créditos em outras unidades previamente cadastradas dentro da mesma área de concessão. (ANEEL, 2016).

A norma estabelece os seguintes procedimentos a serem adotados quando a geração está instalada no mesmo local de consumo:

- A energia injetada em posto tarifário (ponta, fora de ponta ou intermediário), deve ser utilizada para compensar a energia consumida nesse mesmo posto;
- Quando há excedente, os créditos de energia ativa devem ser utilizados para compensar o consumo em outro posto horário, na mesma unidade consumidora e no mesmo ciclo de faturamento;
- O faturamento será a diferença positiva entre a energia consumida e a injetada, considerando-se eventuais créditos de meses anteriores, sendo que caso esse valor seja inferior ao custo de disponibilidade, para o caso do Grupo B (baixa tensão), será cobrado o custo de disponibilidade;

- Os consumidores do Grupo A (alta tensão) continuam sendo normalmente faturados pela demanda, mas não possuem valor mínimo a ser pago a título de energia;
- Se ainda houver excedente após a compensação na mesma unidade consumidora onde está instalada a micro ou minigeração distribuída, um percentual dos créditos poderá ser destinado a abater o consumo de outras unidades escolhidas pelo consumidor no mesmo ciclo de faturamento. Esses créditos remanescentes poderão ser utilizados por até 60 meses posteriores a data do faturamento.

Faturamento quando a micro ou minigeração distribuída está instalada em local diferente do consumo:

- Para situação de autoconsumo remoto e geração compartilhada, a energia excedente é a diferença positiva entre a energia injetada e a energia consumida. Já no caso de empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras (condomínios), o excedente é igual à energia injetada;
- Compete ao titular da unidade consumidora, informar à distribuidora o percentual da energia excedente a ser alocada entre as demais unidades consumidoras caracterizadas como autoconsumo remoto, geração compartilhada ou integrante de empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras;
- O valor a ser faturado em cada unidade será a diferença positiva entre a energia consumida e os créditos alocados no mês para a unidade consumidora, considerando-se também eventuais créditos de meses anteriores, sendo que, caso esse valor seja inferior ao custo de disponibilidade, para o caso de consumidores do Grupo B (baixa tensão), será cobrado o custo de disponibilidade;
- Para os consumidores do Grupo A (alta tensão), não há valor mínimo a ser pago a título de energia. No entanto, os consumidores continuarão sendo normalmente faturados pela demanda;

- Os créditos poderão ser utilizados por até 60 meses após a data do faturamento.

O exemplo da Figura ilustra a simulação de fatura mensal para consumidores do grupo B (baixa tensão) com equipamento de microgeração solar fotovoltaica, onde foi estimada para a unidade consumidora (UC) a geração de energia injetada.

Figura 24 – Consumo e geração no primeiro trimestre de uma simulação.

Mês	Consumo (kWh)	Injetado (kWh)	Crédito acumulado (kWh)	Fatura sem GD*	Fatura com GD*	Diferença
Jan	330	353	23	R\$ 168,30	R\$ 51,00	R\$ 117,30
Fev	360	360	23	R\$ 183,60	R\$ 51,00	R\$ 132,60
Mar	460	335	0	R\$ 234,60	R\$ 52,02	R\$ 182,58

$$\text{Fatura março} = (\text{Consumo} - \text{Injetado} - \text{Crédito utilizado}) \times \text{Tarifa energia}$$

$$\text{Fatura março} = (460 - 335 - 23) \times 0,51 = \text{R\$ } 52,02$$

Fonte: ANEEL (2016).

Conforme pode ser observado acima, no mês de janeiro o consumo da unidade consumidora (330 kWh) foi menor do que a energia ativa injetada na rede (353 kWh), resultando disso um crédito (23 kWh) a ser utilizado em faturamento posterior. Com isso, em março, o consumo (460 kWh) foi maior do que a energia ativa injetada na rede (335 kWh), circunstância que propiciou a utilização do crédito de 23 kWh gerados anteriormente.

A Figura 14 ilustra o perfil anual de consumo dessa suposta unidade. Onde é apresentado que nos meses versados de consumo igual ou superior à energia injetada na rede (janeiro, fevereiro e julho), ou quando, embora maior o consumo, a diferença for menor ou igual a 100 kWh (abril, junho, agosto, setembro, novembro e dezembro), a UC será faturada apenas pelo custo de disponibilidade.

Figura 25 – Consumo e geração no ano

Mês	Consumo (kWh)	Injetado (kWh)	Crédito acumulado (kWh)	Fatura sem GD*	Fatura com GD*	Diferença
Jan	330	353	23	R\$ 168,30	R\$ 51,00	R\$ 117,30
Fev	360	360	23	R\$ 183,60	R\$ 51,00	R\$ 132,60
<b>Mar</b>	<b>460</b>	<b>335</b>	<b>0</b>	<b>R\$ 234,60</b>	<b>R\$ 52,02</b>	<b>R\$ 182,58</b>
Abr	440	357	0	R\$ 224,40	R\$ 51,00	R\$ 173,40
Mai	450	333	0	R\$ 229,50	R\$ 59,67	R\$ 169,83
Jun	390	308	0	R\$ 198,90	R\$ 51,00	R\$ 147,90
Jul	350	360	10	R\$ 178,50	R\$ 51,00	R\$ 127,50
<b>Ago</b>	<b>476</b>	<b>370</b>	<b>4</b>	<b>R\$ 242,76</b>	<b>R\$ 51,00</b>	<b>R\$ 193,80</b>
Set	484	380	0	R\$ 246,84	R\$ 51,00	R\$ 183,60
Out	480	378	0	R\$ 244,80	R\$ 52,02	R\$ 192,78
Nov	430	338	0	R\$ 219,30	R\$ 51,00	R\$ 168,30
Dez	390	332	0	R\$ 198,90	R\$ 51,00	R\$ 147,90
<b>Total</b>	<b>5.100</b>	<b>4.204</b>	<b>-</b>	<b>R\$ 2.560,20</b>	<b>R\$ 622,71</b>	<b>R\$ 1.937,49</b>

**Fatura agosto = (476 – 370 – 6) x 0,51 = R\$ 51,00**

Fonte: ANEEL (2016).

## 2.7 VIABILIDADE ECONÔMICA

Antes de apostar em um investimento como a implantação de geração de energia fotovoltaica ou eólica, assume-se que há, pelo menos, outra opção contra a qual o investimento será comparado. Ao optar pela primeira, automaticamente abandona-se a ideia de utilizar os recursos de forma alternativa.

Os critérios essenciais em uma avaliação econômica e financeira são o risco corrido ao investir e o retorno esperado para aquela aplicação, mensurado em magnitude, taxa de rentabilidade ou tempo necessário até que o fluxo de caixa acumulado seja positivo.

Para assegurar a viabilidade econômica desse projeto deve-se aplicar os seguintes indicadores.

### 2.7.1 Fluxo de caixa

O fluxo de caixa caracteriza a previsão do montante de dinheiro que será gasto (despesas e investimentos) ou ganho (receitas) rendido em cada um dos

períodos estipulados do ciclo de vida do projeto. Esses valores serão utilizados futuramente para os cálculos de VPL, TIR e *payback*.

### **2.7.2 Valor Presente Líquido (VPL)**

O VPL é definido como a diferença entre os benefícios gerados pelo investimento e os custos necessários, aplicando-se uma determinada taxa de juros para avaliá-lo sempre em valor presente, chamado de data zero para os cálculos. A equação 1 ilustra como obter o resultado.

$$VPL = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_{ct}}{(1+r)^t} \quad (1)$$

Onde

$I_0$  é o investimento inicial

$F_{ct}$  é o fluxo de caixa no período

$r$  é a taxa de desconto ou custo de capital

$t$  é o período de tempo

$n$  é o número de períodos analisados

A utilização da taxa de desconto nos fluxos de caixa (simulação de gastos temporais) é necessária uma vez que a noção de valor do dinheiro não é constante ao longo do tempo.

Para avaliar se o resultado é satisfatório o valor obtido deve ser positivo, indicando benefícios maiores do que custos previstos.

### **2.7.3 Taxa Interna de Retorno (TIR)**

Deve-se obter o valor do TIR juntamente com o VPL para chegar à decisão mais segura. O resultado vantajoso costuma ser quando a resposta da equação 1 igualada a zero possui valor maior que a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), interpretada como o custo de oportunidade do capital investido ou o rendimento médio esperado ao investir em outra opção.

A limitação desse método é que o TIR considera que os fluxos de caixa serão reaplicados à mesma taxa, porém isso normalmente não ocorre. Portanto, para ocasiões de investimento com outra taxa de rentabilidade, a TIR não é equivalente ao rendimento real.

#### **2.7.4 Payback**

O *payback* é o fator que demonstra a estimativa de qual seria o retorno do capital investido no menor tempo possível. Portanto calcula-se quantos períodos decorrerão até o valor do fluxo de caixa previsto se igualar ou exceder o investimento inicial. Para a avaliação dos resultados observa-se que o valor obtido deve ser menor que a vida útil dos equipamentos. Recomenda-se, ainda, a utilização desse método juntamente com o VPL e o TIR.

### **3 A ESCOLA**

O sistema de geração distribuído projetado neste trabalho tem intenção de implantação na Escola Municipal do Campo Contestado.

Localizada na cidade da Lapa, no Paraná, a escola é uma idealização educacional que assiste as crianças residentes do Assentamento Contestado do Movimento dos Trabalhadores Rurais Sem Terra (MST).

Desde sua implantação, em 2010, a escola já teve expansões para incluir crianças em um intervalo de faixa etária maior. A diretoria se dispôs a ceder as estruturas e informações necessárias para a realização do projeto de dimensionamento e estudo de viabilidade econômica da implantação de uma unidade de microgeração distribuída com finalidade de contribuir para um mundo mais sustentável e compartilhar a energia gerada.

## 4 PROJETO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

### 4.1 METODOLOGIA

Existem dois agentes que podem limitar a realização do projeto fotovoltaico, a área disponível para alocação dos painéis e a potência instalada da unidade consumidora. Para trabalhar com esses fatores da melhor forma é necessário seguir os seguintes passos: realizar o levantamento de dados de radiação solar no local onde se deseja implantar o sistema; coletar dados de consumo do estabelecimento escolhido; efetuar a escolha do painel fotovoltaico; executar a escolha do inversor; calcular e dimensionar os arranjos de conexão dos painéis; Comparar dados de irradiação com os valores do sistema de geração estimando a energia gerada.

#### 4.1.1 Dados de radiação solar

Para definir o potencial energético de geração a partir de fontes solares, é necessário efetuar um estudo de irradiação solar sobre a região onde será realizada a instalação. Visando a obtenção do cenário mais verídico, dados de duas fontes confiáveis foram levantados para avaliação.

Antes de obter os valores desejados a partir dos softwares, é necessário saber qual será a inclinação dos módulos com o intuito de obter a máxima incidência de radiação solar sobre eles conforme a latitude do local da instalação, de forma que a superfície inclinada esteja voltada para o equador. A metodologia para a escolha da inclinação é apresentada resumidamente na tabela 2.

Tabela 2 – Recomendação para inclinação dos módulos solares

Latitude geográfica do local	Ângulo de inclinação recomendado $\alpha$
0° a 10°	$\alpha = 10^\circ$
11° a 20°	$\alpha = \text{latitude}$
21° a 30°	$\alpha = \text{latitude} + 5^\circ$
31° a 40°	$\alpha = \text{latitude} + 10^\circ$
41° ou mais	$\alpha = \text{latitude} + 15^\circ$

Fonte: VILLALVA & GAZOLI (2012).

Após a definição do ângulo de inclinação, acessou-se a base de dados do CRESESB (Centro de Referências para Energias Solar e Eólica) e obteve-se a irradiação média mensal durante o ano de 2017 da cidade da Lapa. Posteriormente, utilizou-se o *software* Radiasol 2, desenvolvido pelo LABSOL (Laboratório De Energia Solar), da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), para levantar os mesmos valores. Por fim, fez-se a comparação entre as duas fontes a fim de validar tais informações.

#### **4.1.2 Dados de Consumo**

O principal motivo do projeto fotovoltaico é diminuir ou até mesmo cessar os gastos de energia elétrica. Para essa finalidade, é necessário conhecer a curva de carga anual da escola em questão e projetar um sistema de geração capaz de suprir o consumo.

O levantamento desses dados foi obtido através da solicitação do histórico de curva de carga e do consumo de energia mensal à concessionária de energia local, Copel Distribuição.

#### **4.1.3 Seleção do Módulo Fotovoltaico**

O módulo fotovoltaico é fundamental para o sistema, de forma que exerce o papel de receber a irradiação solar e convertê-la em corrente contínua. A escolha desse componente afeta de maneira direta no orçamento e na eficiência da instalação. Portanto para chegar ao resultado mais satisfatório em relação a escolha da marca e modelo, faz-se necessário um estudo comparativo entre as melhores marcas disponíveis no mercado brasileiro, levando em consideração a operação como potência de pico, tensão de máxima potência, corrente de máxima potência, coeficientes térmicos de tensão, custo por Watt (R\$/W) e custo unitário e eficiência.

#### **4.1.4 Seleção do Inversor**

O inversor costuma ser o componente mais caro do sistema e deve ser escolhido com apreço e cuidado para que toda a corrente contínua que receber seja convertido com corrente alternada com o maior rendimento. Para esse fim, sua

seleção foi análoga a dos painéis, levando em conta parâmetros como tensão e corrente máxima por MPPT (rastreador de máxima potência), potência nominal de entrada CC e saída CA, custo unitário e eficiência.

#### Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico

O dimensionamento é essencial para definir as dimensões do projeto e o tamanho do investimento, portanto deve ser realizado com precisão para que não ocorra nenhum desperdício e o resultado final seja seguro e eficaz.

Primeiramente deve-se estipular a energia que será suprida, pois com esse dado pode-se dimensionar a potência máxima instalada do local a partir da equação 2 abaixo (CRESESB, 2014).

$$P_{FV} = \frac{E}{HSP \cdot TD} \quad (2)$$

Onde

$P_{FV}$  é a potência instalada [kWp]

$E$  é a energia gerada por dia [kWh/dia]

$HSP$  é a hora de sol pleno [kW/m<sup>2</sup>/dia]

$TD$  é a taxa de desempenho [adimensional]

A taxa de desempenho demonstra a relação entre os desempenhos real e máximo teórico, simbolizando as perdas totais do sistema ao converter corrente contínua em corrente alternada. Usualmente a TD é adotada entre 70 e 80% (CRESESB, 2014).

Com a meta de potência instalada definida, deve-se estipular o número de módulos que serão conectados em série necessários para supri-la. Calcula-se, portanto, efetuando o produto entre potência instalada e potência máxima do painel (CRESESB, 2014).

$$N_{tot\_modulos} = \frac{P_{FV}}{P_{mpp}} \quad (3)$$

O número de módulos conectados em série deve prover tensões que respeitem à faixa de tensão de máxima potência do inversor (MMPT). Na estação do verão brasileiro, a temperatura dos painéis fotovoltaicos pode chegar a valores superiores a 70 °C, tendo como consequência a redução da corrente contínua do sistema. Logo, é necessário avaliar se o número de módulos conectados em série é suficiente para que a tensão do painel seja superior à mínima tensão de MMPT do inversor. Caso a tensão do painel chegue a valores abaixo da mínima MMPT, sua eficiência será comprometida. Durante o inverno, analogamente, a tensão de potência máxima da série em condição de mínima temperatura de operação deve ser inferior à tensão máxima de operação de MPPT do inversor (CRESESB, 2014).

$$\frac{V_{mpp\ min}}{V_{mpp\ (Tmax)}} < N_{mod/string}^{o} < \frac{V_{mpp\ max}}{V_{mpp\ (Tmin)}} \quad (4)$$

Onde

$V_{mpp\ min}$  é a tensão mínima de operação do MPPT [V]

$V_{mpp\ max}$  é tensão máxima de operação do MPPT[V]

$V_{mpp\ (Tmin)}$  é a tensão de máxima potência na menor temperatura prevista [V]

$V_{mpp\ (Tmax)}$  é a tensão de máxima potência na maior temperatura prevista[V]

$N_{string}^{o\ mod}$  é o numero de módulos que formarão uma *string*

A  $V_{mpp\ (temp\ °C)}$  é dada pela equação 5 abaixo.

$$V_{mpp\ (temp\ °C)} = \left(1 + \frac{\Delta t * \Delta V}{1000}\right) * V_{mpp} \quad (5)$$

Onde

$\Delta t$  é a variação de temperatura entre temp do painel em STC e atual (°C)

$\Delta V$  é o coeficiente de variação de tensao por temperatura [V/°C]

Para garantir que a corrente máxima de entrada no inversor não seja ultrapassada, é necessário calcular o número seguro de filas (*strings*) por série fotovoltaica que serão conectados em paralelo. A equação 6 exemplifica como proceder (CRESESB, 2014).

$$N_{\text{Strings\_Paralelo}} \leq \frac{I_{\text{max\_inv SC}}}{I_{\text{SC}}} \quad (6)$$

Onde

$I_{\text{max\_inv}}$  é a corrente máxima na entrada do inversor [A]

$I_{\text{SC}}$  é a corrente de curto circuito do módulo FV nas STC [A]

$N_{\text{strings\_paralelo}}$  é o numero de módulos que formarão uma *string*

A tensão de circuito aberto no inversor é apresentada pela equação 7 abaixo.

$$V_{\text{max,inv}} = N_{\text{modulos em série}} * V_{\text{oc}} \quad (7)$$

Onde

$V_{\text{oc}}$  é a tensão em cicuito aberto do inversor [V]

Deve-se encontrar o fator de dimensionamento do inversor (FDI) para ter confiança de que os resultados encontrados acima poderão ser implantados. Esse coeficiente representa a relação entre potência nominal do inversor e a potência gerada pelo mesmo, de modo que os arranjos ótimos são para valores de FDI entre 0,75 e 1,2. De modo que valores de fator inferiores a 1 representam que a potência do arranjo é superior a potência nominal do inversor, sendo interessante pois o módulo provavelmente irá operar em sua região nominal, mas sim com potência inferior a nominal (CRESESB, 2014).

$$FDI = \frac{P_{n,CA}}{P_{FV}} \quad (8)$$

Onde

$P_{n,CA}$  é a potência nominal em CA do inversor [W]

$P_{FV}$  é a Potência instalada [kWp]

O próximo passo é estimar o quanto de potência o sistema projetado irá gerar levando em consideração todos os resultados obtidos anteriormente e as possíveis perdas do sistema (CRESESB, 2014).

$$G = \eta_{\text{modulo}} * N_{\text{modulos}} * A_{\text{modulo}} * I_{\text{sol}} * \eta_{\text{inversor}} * (1 - \text{perdas}) \quad (9)$$

Onde

$G$  é a energia gerada [Wh]

$\eta_{\text{modulo}}$  é o rendimento do modulo [%]

$A_{\text{modulo}}$  é a área do modulo [ $m^2$ ]

$I_{\text{sol}}$  é a insolação incidente no modulo [Wh/ $m^2$ ]

$\eta_{\text{inversor}}$  é o rendimento do inversor [%]

$\text{perdas}$  são as perdas por conversão CC – CA [%]

As perdas são consideradas como 3% ôhmicas, 3% nos diodos de bloqueio, 3% por sujeira e 2% por sombreamento. (EPE, 2012)

Após calcular e aprovar a geração do sistema deve-se elaborar o dimensionamento dos condutores que irão compor a instalação e conectar os módulos ao inversor (corrente contínua), bem como a conexão do sistema a rede elétrica (corrente alternada). Para obter esses resultados deve-se aplicar a equação 10 e espelhar aos valores comerciais informados pela norma regulamentadora NRB 5410:2008.

$$S_{mm^2} = \frac{\rho * L * I_{condutor}}{\Delta V} \quad (10)$$

Onde

$S_{mm^2}$  é a seção do condutor [mm<sup>2</sup>]

$\rho$  é a condutividade elétrica de cabo [ $\Omega mm^2/m$ ]

$I_{condutor}$  é a corrente no condutor [A]

$\Delta V$  é a queda de tensão admitida [%]

$L$  é o comprimento (ida e volta) do condutor [m]

O ultimo passo é o projeto dos dispositivos de proteção, sendo essencial para todo tipo de instalação elétrica, serve para manter seguros os equipamentos e as pessoas que usufruirão do sistema. Esses componentes serão escolhidos de acordo com o CRESESB e as normas NBR 5410: 2008 e NTC-031, juntamente com as especificações dos fabricantes dos módulos e dos inversores.

Para proteger os módulos, cabos e inversores contra as correntes reversas e curto-circuito é preciso dimensionar fusível CC para ambas as polaridades dos cabos dos painéis e disjuntores CC bipolar. Também é necessário dimensionar a proteção contra distúrbios atmosféricos, de modo que na saída do inversor deve haver um sistema de seccionamento que consiste em disjuntores tripolares CA e dispositivos de proteção contra surtos CC e CA.

Os dispositivos utilizados serão fusíveis, disjuntores CC e CA e Dispositivo de Proteção Contra Surto (DPS).

Os fusíveis são dispositivos de proteção, utilizados para proteção contra sobrecorrente e sobrecarga de longa duração. São constituídos por um condutor de seção reduzida (elo fusível) em relação aos condutores da instalação. No caso fotovoltaico esse tipo de componente fica acoplado a cada *string* para isolar e proteger o sistema de geração, mesmo que inversor já possua um dispositivo de desconexão contra curto-circuito. A equação 11 mostra como fazer o dimensionamento, onde é considerado que a corrente que faz o fusível disparar deve ser 1,5 vezes a máxima corrente suportada pela *string*.

$$I_{\text{fusivel}} = 1,5 * I_{\text{SC}} \quad (11)$$

O disjuntor é um dispositivo eletromecânico que protege a instalação elétrica contra possíveis danos relacionados a sobrecargas elétricas e sobrecorrente. Basicamente, o disjuntor monitora e controla a corrente elétrica, interrompendo imediatamente sua circulação em caso de picos que ultrapassem o considerado adequado.

Para o disjuntor CC fotovoltaico deve-se considerar um limite de 1,25 vezes a corrente de curto circuito da *string*, e também deve suportar a tensão direta, como apresentado na equação 12. (CRESESB, 2014)

$$I_{\text{disjuntor,CC}} \geq 1,25 * I_{\text{SC}} \quad (12)$$

No entanto, na região de corrente alternada o disjuntor é dimensionado com o auxílio da equação 13. (CRESEB, 2014)

$$I_N \leq I_{\text{DISJ,CA}} \leq I_{\text{CAP}} \quad (13)$$

Onde

$I_N$  é a corrente de saída do inversor [A]

$I_{\text{CAP}}$  é a corrente máxima suportada pelo cabo [A]

Os dispositivos de proteção contra surto são empregados no sistema para proteger equipamentos eletroeletrônicos contra picos de tensão que podem vir da rede elétrica, de cabos de TV (por assinatura ou de antena externa) ou da linha telefônica. Os picos de tensão são causados por eventos como descargas atmosféricas, liga e desliga de aparelhos nas redondezas e grandes oscilações vindas da rede de distribuição de energia em geral. Esses dispositivos são criados para desempenhar seus papéis em corrente contínua ou em corrente alternada, assim como cada um possui seu número de classe.

No caso desse projeto, o DPS de corrente contínua deve ser pertencente à classe 2, protegendo os equipamentos contra surtos indiretos propagados pela rede. Para seu dimensionamento é necessário fazer o uso da equação 14, que considera o número de painéis por *string* e a tensão de circuito aberto (CRESESB, 2014).

$$V_{DPS} = 1,2 * N * V_{OC} \quad (14)$$

No entanto o DPS de corrente alternada deve ser pertencente a classe 1+2 e instalado mais próximo possível dos terminais do inversor. Para obter o seu valor é necessário aplicar a equação 15 abaixo. (CRESESB, 2014)

$$V_{DPS} = 1,1 * V_{rede} \quad (15)$$

Onde

$V_{rede}$  é a tensão fase – neutro da rede [V]

### 3.2.3. Fator de Capacidade

Ao final do projeto é necessário calcular o fator de capacidade que é a razão entre a energia efetivamente gerada pelo sistema fotovoltaico e a energia que poderia ser gerada pela mesma instalação, considerando uma situação em que os módulos estão gerando com sua potência nominal. Essa razão é calculada através da equação 16.

$$FC = \frac{PAE}{8760 * N * P_n} \quad (16)$$

Onde

PAE é a energia efetiva gerada [Wh]

$P_n$  é a potência nominal dos módulos [Wp]

#### 4.1.5 DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR

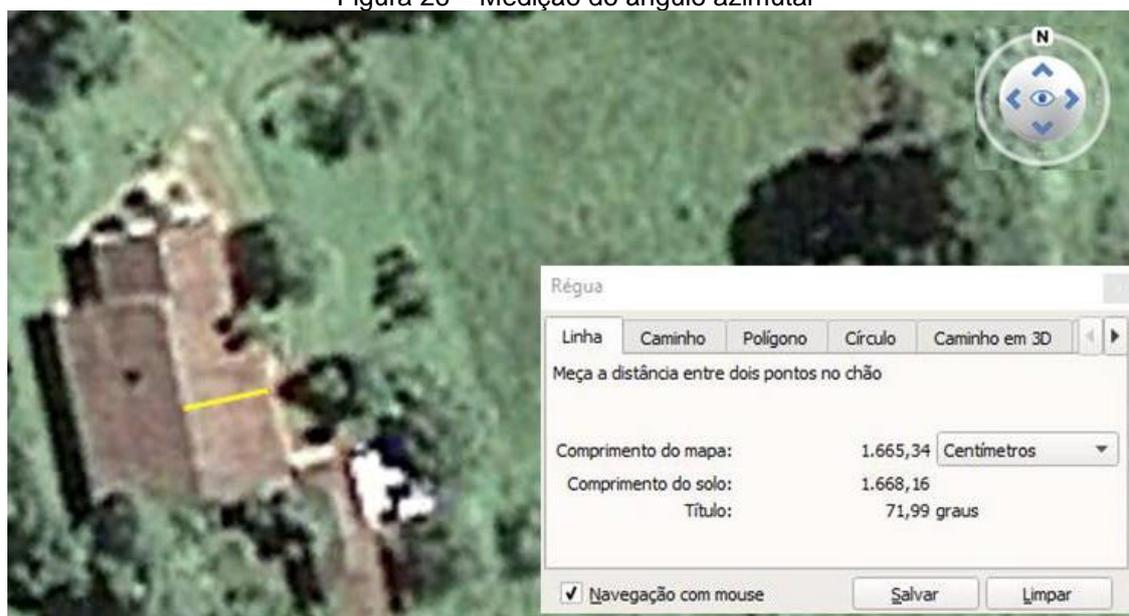
Para obter a máxima incidência de radiação solar sobre os módulos que serão dimensionados, é necessário calcular qual será a inclinação dos mesmos, de forma que ficarão posicionados com a superfície direcionada ao norte, seguindo a latitude do local da instalação.

Os dados geográficos do local são latitude:  $25,627756^\circ$  Sul e longitude:  $49,695237^\circ$  Oeste. A partir disso utilizou-se a tabela 2 para obter a inclinação ideal de  $31^\circ$ . No entanto, para reduzir os gastos de forma significativa, definiu-se que a instalação dos painéis será feita diretamente sobre o telhado da escola, utilizando a inclinação de  $17^\circ$  com a face para o norte.

Essa definição causará perda da eficiência total do sistema, mas será desprezada em decorrência da economia em relação ao custo total da instalação e da quantidade de energia gerada ao final.

Para maximizar a captação durante as horas do dia, é necessário tomar como base o ângulo azimutal e incluí-lo nos requisitos do Radasol 2 objetivando os resultados das medidas de irradiação solar. A Figura 15 mostra como esse ângulo foi obtido a partir do software Google Earth, traçando uma reta amarela perpendicular ao telhado e medindo a diferença angular em relação ao norte geográfico.

Figura 26 – Medição do ângulo azimutal



Fonte: Google Earth (2018).

Com essas informações de inclinação do telhado, ângulo azimutal, latitude e longitude foi possível obter a Tabela 3, que representa a irradiância média mensal da cidade da Lapa durante o ano de 2017 (Radiasol 2).

Tabela 3 – Irradiância média mensal (W/m<sup>2</sup>) da cidade da Lapa

Horário	IRRADIÂNCIA MÉDIA MENSAL (W/m <sup>2</sup> ) LAPA											
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
00:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
01:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
03:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05:00:00	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	67
06:00:00	224	179	113	40	0	0	0	4	107	157	236	247
07:00:00	429	340	341	257	170	163	177	250	310	360	455	423
08:00:00	520	547	475	461	345	318	350	457	460	523	604	631
09:00:00	676	691	649	591	484	484	479	615	676	705	755	773
10:00:00	793	782	704	688	558	571	588	702	752	769	831	802
11:00:00	813	800	860	729	608	583	639	671	770	818	863	843
12:00:00	772	764	737	686	559	559	604	657	687	806	815	837
13:00:00	681	651	615	565	453	431	459	567	590	652	706	679
14:00:00	493	531	434	397	309	296	318	385	435	496	556	552
15:00:00	345	320	309	246	165	153	174	224	273	314	365	374
16:00:00	197	182	143	90	59	42	50	70	114	176	200	203
17:00:00	84	60	46	12	0	0	0	1	30	61	77	93
18:00:00	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	22
19:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W/h/m <sup>2</sup> /dia	6072	5847	5426	4762	3710	3600	3838	4603	5204	5837	6479	6546
HSP	6,072	5,847	5,426	4,762	3,71	3,6	3,838	4,603	5,204	5,837	6,479	6,546
HSP/ano	5,160333333											

Fonte: Radiasol 2 (2018).

Para garantir a confiabilidade dos dados obtidos pelo Radiasol 2, buscou-se os valores de irradiação solar diária média do mesmo local, segundo o CRESESB, durante 2017. Percebe-se que a discrepância entre os dois não é exacerbada, portanto os valores da Tabela 4 foram tomados como base para a continuação do projeto.

Tabela 4 – Irradiância diária média (kWh/m<sup>2</sup>.dia) da cidade da Lapa

Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m <sup>2</sup> .dia]															
			Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Lapa	PR	BRASIL	25,601° S	49,649° O		5,5	5,41	5,18	4,58	3,80	3,05	2,74	2,93	3,91	3,93	4,49	5,36	5,65
Lapa	PR	BRASIL	25,601° S	49,749° O		6,2	5,46	5,23	4,64	3,81	3,07	2,76	2,96	3,95	3,97	4,58	5,40	5,69
Lapa	PR	BRASIL	25,701° S	49,649° O		9,4	5,38	5,20	4,58	3,76	3,02	2,72	2,90	3,89	3,90	4,48	5,34	5,63

Fonte: CRESESB (2018).

#### 4.1.6 DADOS DE CONSUMO

Os dados de consumo da escola foram obtidos analisando as faturas de energia elétrica disponibilizadas pela Copel Distribuição do Paraná. Os resultados estão na Tabela 5, onde compõem os meses de janeiro a dezembro do ano de 2017 e serão utilizados como base para a conclusão sobre a efetividade do projeto.

Tabela 5 – Consumo mensal de energia elétrica

Mês	Energia (kWh)
janeiro	118
fevereiro	158
março	195
abril	225
maio	230
junho	245
julho	242
agosto	238
setembro	233
outubro	225
novembro	231
dezembro	190
<b>Média do consumo mensal</b>	<b>210</b>

Fonte: Copel Distribuição (2018).

#### 4.1.7 MÓDULO FOTOVOLTAICO

Utilizando os parâmetros principais para o procedimento de análise e escolha do módulo fotovoltaico adequado para a instalação, elaborou-se a Tabela 6, representada abaixo.

Tabela 6 – Comparação entre modelos de módulos fotovoltaicos comerciais

Marca	CANADIAN	SERAPHINE	KOMAES	JINCO			
Modelo	C56K-295MS	C56K-270P	C56P-265P	YL275D-30P	SRP-265-6PB	KOMAES 250W	JKM270PP
Características elétricas em condições de teste padrão (STC)							
Eficiência do painel (%)	18,02	16,5	16,47	16,9	16,29	15,3	16,5
Potência máxima - P <sub>mpp</sub> (W)	295	270	265	275	265	250	270
Tensão em potência max. - V <sub>mpp</sub> (V)	32,3	30,8	30,6	31,2	31,1	31,3	31,7
Corrente em potência max. - I <sub>mpp</sub> (A)	9,14	8,75	8,66	8,82	8,53	7,99	8,52
Tensão de circuito aberto- Voc (V)	39,5	37,9	37,7	38,9	37,4	37,5	38,8
Corrente de curto-circuito - Isc (A)	9,75	9,32	9,23	9,34	9,22	8	9,09
Características térmicas							
Coefficiente de temp. de Potencia (%/°C)	0,39	0,41	0,41	0,42	0,41	0,47	0,4
Coefficiente de temp. de Tensão (%/°C)	0,3	0,31	0,31	0,32	0,32	0,35	0,3
Coefficiente de temp. de Corrente (%/°C)	0,053	0,053	0,053	0,05	0,05	0,07	0,05
Características de mecânicas							
Dimensões (mm)	1650 x 992 x 40	1650X992X40	1638X98240	1640X990X40	1640X992X40	1950X990X50	1650X992X40
Peso (kg)	18,2	18,2	18	18,5	19	19,8	19
Tipo de células	60, mono	60, poli	60, poli	60, mono	60, poli	60, poli	60, poli
Faixa de operação (°C)	-40 a 85	-40 a 85	-40 a 85	-40 a 85	-40 a 85	-40 a 85	-40 a 85
Características de garantia							
Garantia (anos)	10	10	10	10	10	10	10
Garantia de rendimento (anos)	25	25	25	25	25	25	25
Preço	R\$ 669,00	R\$ 569,00	R\$ 790,00	R\$ 749,00	606,47	R\$ 766,29	R\$ 668,00
R\$/Wp	2,28 R\$/Wp	2,22 R\$/Wp	2,35 R\$/Wp	2,72 R\$/Wp	2,29 R\$/Wp	3,07 R\$/Wp	2,47 R\$/Wp

Fonte: Autoria própria (2018).

A análise da tabela acima considerou todos os fatores expostos, mas principalmente a boa eficiência, menor preço por kW e coeficiente de potência baixo, de modo que as perdas com o aumento de temperatura serão menos significativas. A conclusão da comparação levou a escolha do módulo de modelo CS6K-270P procedente da marca *Canadian*.

#### **4.1.8 INVERSOR FOTOVOLTAICO**

Analogamente a escolha do módulo, produziu-se a Tabela 7 com o intuito de comparar modelos de algumas das melhores marcas de inversores fotovoltaicos do mercado para selecionar o ideal.

Tabela 7– Comparação entre modelos inversores comerciais

Marca	SMA		FRONIUS			ENERGYBIO	REFUSOL
Modelo	SB 5000TL-21	SMC 7000HV-11	Galvo 3.1-1	IG Plus 55V-1	Symo 12.5-3-M	Grid-tie 3kw	LAN MODBUS/RS485
Características Elétricas da Entrada							
Potência Máxima de Entrada (W)	5250	7500	3310	5250	12500	3200	13000
Tensão Máxima de Entrada (V)	750	800	550	600	1000	500	1000
Maior Valor da Faixa de MPP (V)	500	560	440	500	800	450	890
Corrente Máxima de Entrada (A)	12	23	20.7	22.9	27/16.5	18	40
Características Elétricas da Saída							
Potência Nominal de Saída (W)	4600	7000	3100	5000	12500	3000	11000
Corrente Máxima de Saída (A)	22	31	15	21.7	19.9	15	29
Mechanical Characteristics							
Dimensões (mm)	440 x 339 x 214	468 x 613 x 242	645 x 431 x 204	968 x 434 x 250	510 x 225 x 725	330 x 350 x 125	536 x 601 x 277
Massa (kg)	26	65	16.8	36.9	34.8	12	38.4
Temperatura de Operação (°C)	-25°C a +60°C	-25°C a +60°C	-25°C a +50°C	-25°C a +50°C	-25°C a +60°C	-20°C a +60°C	-20°C to +60°C
Outras Características							
Eficiência Máxima (%)	97	96.2	96.1	95.7	98	97	98.2
Garantia (anos)	5	5	5	5	5	5	5
Preço	R\$ 13.490,00	R\$ 14.390,00	R\$ 8.790,00	R\$ 12.690,00	R\$ 18.590,00	R\$ 9.072,00	R\$ 11.545,80
Preço/W	3,02	2,14	2,95	2,65	1,52	3,12	1,07

Fonte: Autoria própria (2018).

Os principais fatores para essa seleção foram a maior eficiência, o menor preço por W e a potência máxima de entrada, de modo que fosse necessária a menor quantidade de inversores no projeto. Atendendo o tipo de alimentação

trifásico 220 V da escola, escolheu-se o inversor LAN MODBUS/RS485 fabricado pela marca *Refusol* como melhor opção.

#### 4.1.9 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

A potência instalada total necessária para suprir a energia consumida foi calculada a partir da equação 2. Onde o consumo diário é obtido pela divisão do valor médio de consumo mensal, apresentado na Tabela 5, por 30 (número médio de dias em cada mês), o HPS é obtido da Tabela 3 e taxa de desempenho (TD) é comumente considerada 0,80.

$$P_{FV} = \frac{\frac{210}{30}}{5,16 * 0,80}$$

$$P_{FV} = 1,7024655 \text{ kW}_p$$

A quantidade de módulos fotovoltaicos necessários para esse número de potência instalada foi estimado com a divisão da potência total instalada pela potência individual do painel, conforme a equação 3.

$$N_{tot_{modulos}} = \frac{1,7024655}{270}$$

$$N_{tot_{modulos}} = 6 \text{ módulos}$$

Observa-se que a área do telhado disponível é capaz de conter 108 módulos, levando em consideração a possibilidade de distribuir a energia excedente para outros consumidores oriundos do mesmo proprietário, optou-se por projetar um sistema fotovoltaico que contemple toda a capacidade de geração do local. De forma que a prefeitura possa distribuir o remanescente para outras escolas ou até outros edifícios pertencentes à mesma.

A potência total instalada que deverá ser suprida foi calculada com o auxílio da equação 3.

$$P_{FV} = 270 * 108$$

$$P_{FV} = 29,16 \text{ kW}_p$$

Uma vez estimado o número de módulos a serem arranjados e a potência total instalada, definiu-se a faixa de operação em máxima potência do inversor calculando os valores máximos e mínimos de tensão, operando em temperatura externa, pois mesmo com esse equipamento instalado dentro da escola, a temperatura não possuirá grandes variações uma vez que não há aquecedor ou ar-condicionado no local. Para isso foi necessário analisar a Tabela 8 com as temperaturas mensais da Lapa.

Tabela 8 – Temperaturas mensais da Lapa durante o ano de 2017

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Temperatura média (°C)	20.6	20.5	19.3	16.6	13.7	12.3	12.3	13.7	15.2	16.9	18.3	19.6
Temperatura mínima (°C)	15.1	15.2	14	11.1	8	6.6	6.1	7.3	9.5	11.4	12.5	13.8
Temperatura máxima (°C)	26.2	25.8	24.6	22.1	19.4	18	18.5	20.1	21	22.4	24.2	25.5
Temperatura média (°F)	69.1	68.9	66.7	61.9	56.7	54.1	54.1	56.7	59.4	62.4	64.9	67.3
Temperatura mínima (°F)	59.2	59.4	57.2	52.0	46.4	43.9	43.0	45.1	49.1	52.5	54.5	56.8
Temperatura máxima (°F)	79.2	78.4	76.3	71.8	66.9	64.4	65.3	68.2	69.8	72.3	75.6	77.9
Chuva (mm)	160	145	115	81	84	111	70	78	111	125	105	135

Fonte: Climate-data (2018).

Através da Tabela 8 é possível notar que a temperatura mínima foi de 6,1 °C, no entanto será adotado 0 °C como segurança para os cálculos. No caso da temperatura máxima o valor registrado foi de 26,2 °C, esses valores normalmente ocorrem durante horas de sol e isso acarretaria em perdas por efeito joule nos módulos, portanto estimou-se 70 °C para o maior valor alcançado pelo painel. Utilizando os dois casos foi possível calcular a tensão em máxima potência (MPP) através da equação 5.

$$V_{mpp(Tmin)} = \left( 1 + \frac{(0 - 25) * \left( \frac{-0,31}{100} * 30,8 \right)}{1000} \right) * 30,8$$

$$V_{mpp(Tmin)} = 30,87 \text{ V};$$

$$V_{mpp(Tmax)} = \left( 1 + \frac{(70 - 25) * \left( \frac{-0,31}{100} * 30,8 \right)}{1000} \right) * 30,8$$

$$V_{mpp(Tmax)} = 30,67 \text{ V.}$$

Com o auxílio do *datasheet* da Tabela 7 obteve-se os dados de máximo e mínimo valor de tensão para cada entrada rastreadora de máxima tensão (MPPT), mostrados a seguir.

$$V_{mpp\_min} = 350 \text{ V e } V_{mpp\_max} = 890 \text{ V}$$

Com os dados de tensões de entrada do inversor e de tensões de operação em MPP do painel definidos, calculou-se os limites de painéis por *string* em cada arranjo através da equação 4.

$$\frac{350}{30,87} < N^{\circ}_{mod/string} < \frac{890}{30,67};$$

$$11,34 < N^{\circ}_{mod/string} < 29,02$$

O calculo feito para encontrar qual o numero de *strings* será suportado por cada inversor baseado em sua corrente máxima de entrada MPPT é apresentado abaixo através da equação 6.

$$N_{Strings\_Paralelo} \leq \frac{40,00}{9,32}$$

$$N_{Strings\_Paralelo} = \sim 4 \text{ strings}$$

O número de *strings* escolhido foi de 3, de modo que cada uma delas será composta por 18 módulos, resultando em 54 módulos por inversor que compõem os

108 módulos almejados. Portanto a tensão de circuito aberto do inversor foi obtida pela equação 7.

$$V_{max,inv} = 18 * 37,9$$

$$V_{max,inv} = 682,2 V$$

Como o valor da máxima tensão atingida foi menor que 890 V que é a máxima admitida pelo inversor, pôde-se prosseguir o projeto calculando o fator de dimensionamento (FDI), de forma que o inversor opere em sua maior eficiência. O valor encontrado é apresentado utilizando a equação 8.

$$FDI = \frac{13000}{270 * 18 * 3}$$

$$FDI = 0,89$$

Sabendo que esse valor de FDI é favorável para a eficiência do inversor, calculou-se a tensão a qual o mesmo estará submetido durante o período de conversão. Para esse fim, utilizou-se a equação 17 e obteve-se um valor desejado menor que 890 V.

$$V_{mppt} = N_{\text{módulos em série}} * V_{mpp} \quad (17)$$

$$V_{mppt} = 18 * 30,8$$

$$V_{mppt} = 554,4 V$$

Para cada arranjo a corrente de entrada em MPPT do inversor é mensurada utilizada a corrente de curto circuito dos módulos, segundo a equação 18.

$$I_{sc,MPPT1} = I_{sc} * N_{strings} \quad (18)$$

$$I_{sc,MPPT1} = 9,32 * 2$$

$$I_{sc,MPPT1} = 18,64 A$$

De acordo com o *datasheet* em anexo, o inversor suporta uma corrente de entrada de 41,8 A, portanto a corrente calculada está de acordo com os limites do inversor.

Para o caso da corrente de operação do arranjo, deve-se calcular a própria corrente de máxima potência do módulo multiplicada pelo número de *strings* por MPPT como apresentado pela equação 19.

$$I_{mppt} = 8,75 * N_{arranjos} \quad (19)$$

$$I_{mppt} = 8,75 * 3$$

$$I_{mppt} = 26,25 A$$

Após estimar os valores de tensão e corrente, dimensionou-se os condutores do circuito para suportar o fluxo de energia e minimizar as perdas do sistema através da equação 10. Todos os valores compõem a Tabela 9 abaixo, sendo que os trechos A e B significam a distância de ida e volta dos módulos até cada um dos dois inversores e os trechos 1 e 2 contemplam o comprimento entre os inversores e o quadro de distribuição geral.

Tabela 9 – Seção dos condutores que compõem o circuito fotovoltaico.

DC						
Trecho	Comprimento (m)	Condutividade do material ( $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ )	Corrente (A)	$\Delta V$ (%)	Seção ( $\text{mm}^2$ )	Valores comerciais ( $\text{mm}^2$ )
A	128,6	0,0178	8,75	2	10,014725	16
B	167,9	0,0178	8,75	2	13,0752125	16
CA						
Trecho	Comprimento (m)	Condutividade do material ( $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ )	Corrente (A)	$\Delta V$ (%)	Seção ( $\text{mm}^2$ )	Valores comerciais ( $\text{mm}^2$ )
1	1,5	0,0178	29,2	4	0,19491	4
2	1,5	0,0178	29,2	4	0,19491	4

Fonte: Autoria própria (2018).

Um sistema seguro é essencial para o futuro da instalação e para alcançá-lo deve-se dimensionar um ótimo sistema de proteção. Portanto a seguir serão apresentados os passos desse dimensionamento.

O calculo dos fusíveis foi executado com o utensilio da equação 11.

$$I_{fusivel} \geq 1,5 * 9,32$$

$$I_{fusivel} \geq 13,98 A$$

Os fusíveis comerciais encontrados mais próximos do valor dimensionado foram de 15 A.

Mensurou-se o DPS de corrente contínua pertencente à classe 2 utilizando a equação 14.

$$V_{DPS,CC} = 1,2 * 18 * 37,9$$

$$V_{DPS,CC} = 818,64 V$$

Portanto o valor comercial mais próximo é de 1kV.

Na região de corrente alternada o DPS ideal foi calculado como a equação 15 propõe.

$$V_{DPS,CA} = 1,1 * 127$$

$$V_{DPS,CA} = 139,7 V$$

O valor encontrado no mercado referente à classe 1+2 mais próximo é de 275 V.

No caso dos disjuntores referentes a corrente alternada mensurou-se o equipamento a partir da equação 12.

$$I_{disjuntor,CC} \geq 1,25 * 9,32$$

$$I_{disjuntor,CC} \geq 11,65 A$$

Logo, considerando os valores comerciais, serão utilizados disjuntores bipolares de 15 A e 1000 V.

Para a previsão dos disjuntores tripolares de corrente alternada empregou-se a equação 13.

$$29,2 \leq 30 \leq 30$$

O valor dimensionado foi de 30 A, porém ficaria muito próximo da corrente nominal de saída do inversor (29,2 A). Portanto, como segurança, optou-se por utilizar disjuntores de 36 A.

Finalmente, realizou-se com o auxílio da equação 20, o cálculo do disjuntor geral de corrente alternada.

$$I_{disj\ geral,CA} = N_{inv} * I_N \quad (20)$$

$$I_{disj\ geral,CA} = 2 * 29,2$$

$$I_{disj\ geral,CA} = 58,2 A$$

Chegando a conclusão que o dispositivo a ser empregado no projeto será de 60 A, pois é o valor comercial mais próximo de 58,2 A.

A partir dos dados obtidos anteriormente, pôde-se simular toda a energia que seria gerada com o projeto fotovoltaico.

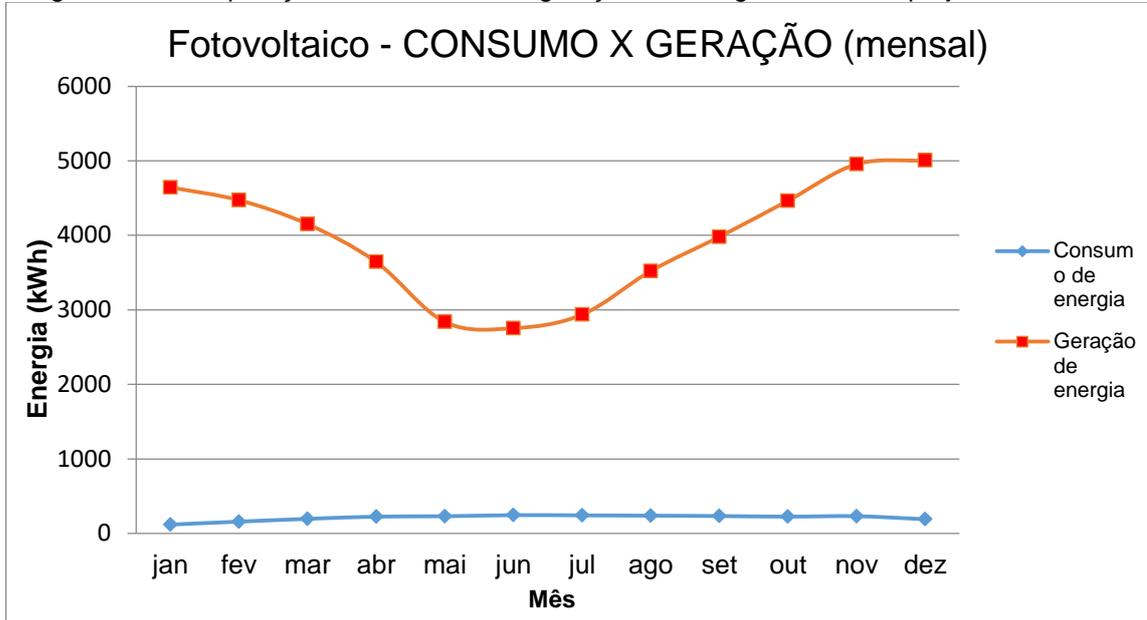
Tabela 10– Estimativo de geração do projeto fotovoltaico na cidade da Lapa durante um ano

Horário	Estimativa de geração											
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
00:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
01:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
03:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05:00:00	892,2219	0	0	0	0	0	0	0	0	0	331,3966873	1707,967542
06:00:00	5710,22	4563,077463	2880,601974	1019,682115	0	0	0	101,9682115	2727,649657	4002,2523	6016,124477	6296,637059
07:00:00	10936,09	8667,297975	8692,790028	6551,457587	4333,648988	4165,204618	4512,093368	6373,013217	7902,536389	9177,139033	11698,88406	10783,13836
08:00:00	13255,87	13944,15292	12108,72511	11751,83637	8794,75824	8106,472812	8922,218504	11649,86816	11726,34432	13332,34365	16397,19993	16085,48636
09:00:00	17232,63	17615,00853	16544,34231	15065,80325	12338,15359	12338,15359	12210,69332	15677,61251	17232,62774	17971,89727	19246,49992	19705,35687
10:00:00	20215,2	19934,78534	17946,40522	17538,53237	14224,5655	14555,96219	14989,32709	17895,42711	19170,02376	19603,38866	21183,89593	20444,6284
11:00:00	20725,04	20393,64229	21923,16547	18583,70654	15499,16814	14861,86682	16289,42178	17105,16747	19628,88071	20852,49925	21999,64163	21489,80057
12:00:00	19679,86	19475,92839	18787,64296	17487,54827	14250,05755	14250,05755	15397,19993	16748,27873	17513,04032	20546,59461	20776,02309	21336,84825
13:00:00	17360,09	16595,32642	15677,61251	14403,00987	11547,89995	10987,07479	11700,85227	14453,99398	15040,31119	16620,81847	17997,38933	17309,1039
14:00:00	12567,58	13536,28007	11063,55094	10120,34499	7877,044336	7545,647649	8106,472812	9814,440354	11089,043	12644,05822	14173,58139	14071,61318
15:00:00	8794,758	8157,456918	7877,044336	6271,045006	4206,188723	3900,284089	4435,617199	5710,219843	6959,330433	8004,504601	9304,59297	9534,027773
16:00:00	5021,934	4639,553622	3645,36356	2294,284758	1504,031119	1070,66622	1274,602643	1784,443701	2906,094027	4486,601305	5098,410574	5174,886732
17:00:00	2141,332	1529,523172	1172,634432	305,9046344	0	0	0	25,49205287	764,7615861	1555,015225	1962,888071	2370,760917
18:00:00	254,9205	0	0	0	0	0	0	0	0	0	76,47615861	560,8251631
19:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>KWh/dia</b>	154,7877	149,0520331	138,3198789	121,3931558	94,57561614	91,77139033	97,83849891	117,3399194	132,6606431	148,7971126	165,1630105	166,8709781
<b>KWh/mês</b>	4643,632	4471,560994	4149,596366	3641,794673	2837,265484	2753,14171	2936,154967	3520,197581	3979,819294	4463,913378	4954,890316	5006,129342
<b>KWh/ano</b>	47357,09645											

Fonte: Autoria própria (2018).

Os dados foram computados e representados na Figura 27, abaixo.

Figura 27 – Comparação entre consumo e geração de energia elétrica do projeto fotovoltaico



Fonte: Autoria própria (2018).

Acima é perceptível a expressiva diferença entre consumo e geração em cada mês. De fato esse resultado era esperado uma vez que o projeto fora dimensionado para contemplar todo o potencial energético do telhado. Também é indicado que os maiores valores de geração seriam alcançados nos meses de menor consumo do local, pois no período entre novembro e fevereiro o telhado fica exposto a mais horas de sol e as escolas costumam estar em férias. Enquanto a geração mínima ocorreria durante maio, junho e julho fazendo a escola consumir mais energia elétrica no inverno, pois há menos horas de sol que resultam no aumento do uso das lâmpadas. No entanto não haveria empecilho, visto que a prefeitura poderia distribuir essa energia excedente para suas edificações em toda cidade.

#### 4.1.10 Fator de Capacidade

Finalizando a parte de dimensionamento do projeto calculou-se o fator de capacidade através da equação 16.

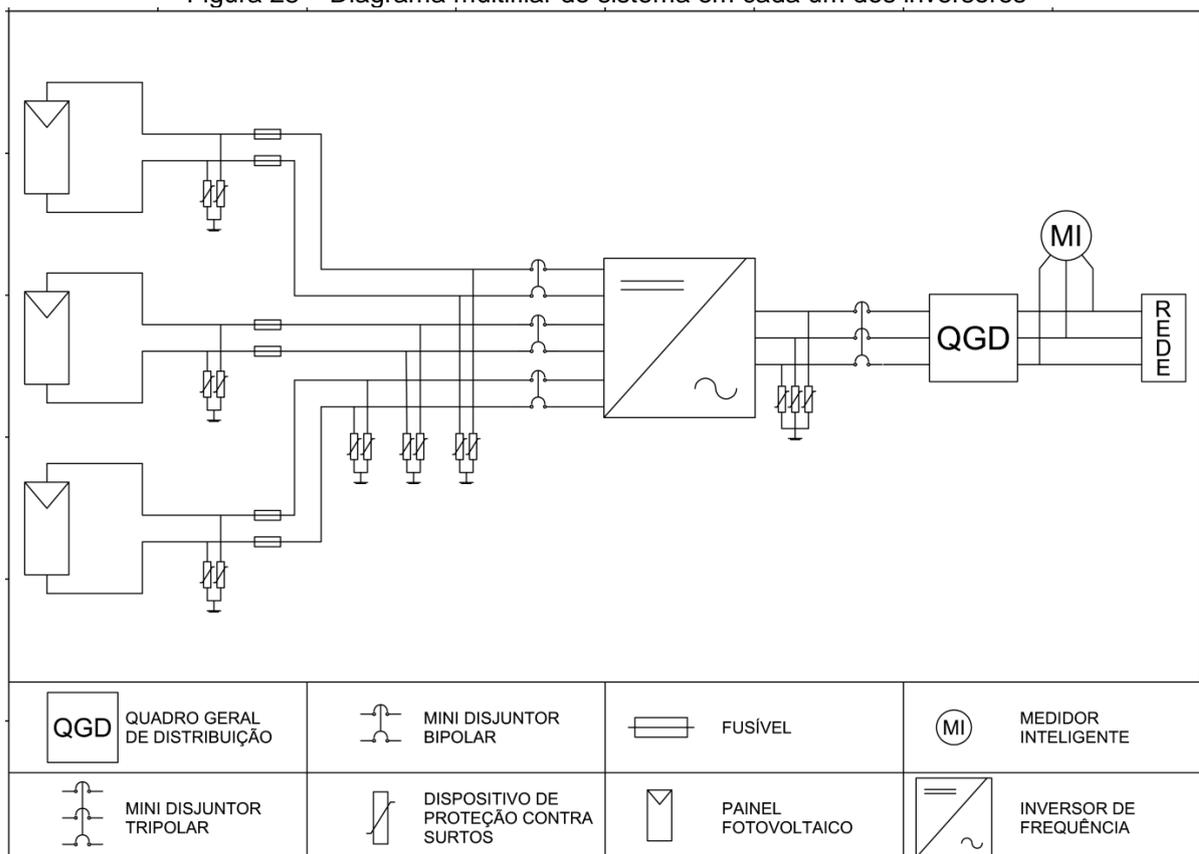
$$FC = \left( \frac{47357,09645 * 10^3}{8760 * 270 * 108} \right)$$

$$FC = 0,1854$$

Percebe-se que a relação entre a energia gerada efetivamente e a energia gerada supondo geração integral no período de um ano é relativamente baixa pelo fato do sistema produzir somente durante aproximadamente oito horas por dia somado a posicionamento e clima não ideais. Sendo que esse fator costuma ser baixo e é caracterizado como um dos principais problemas da geração fotovoltaica.

Para exemplificar o dimensionamento do sistema completo contemplando os módulos e o sistema de proteção até a rede de cada inversor construiu-se o diagrama multifilar da Figura 17 abaixo.

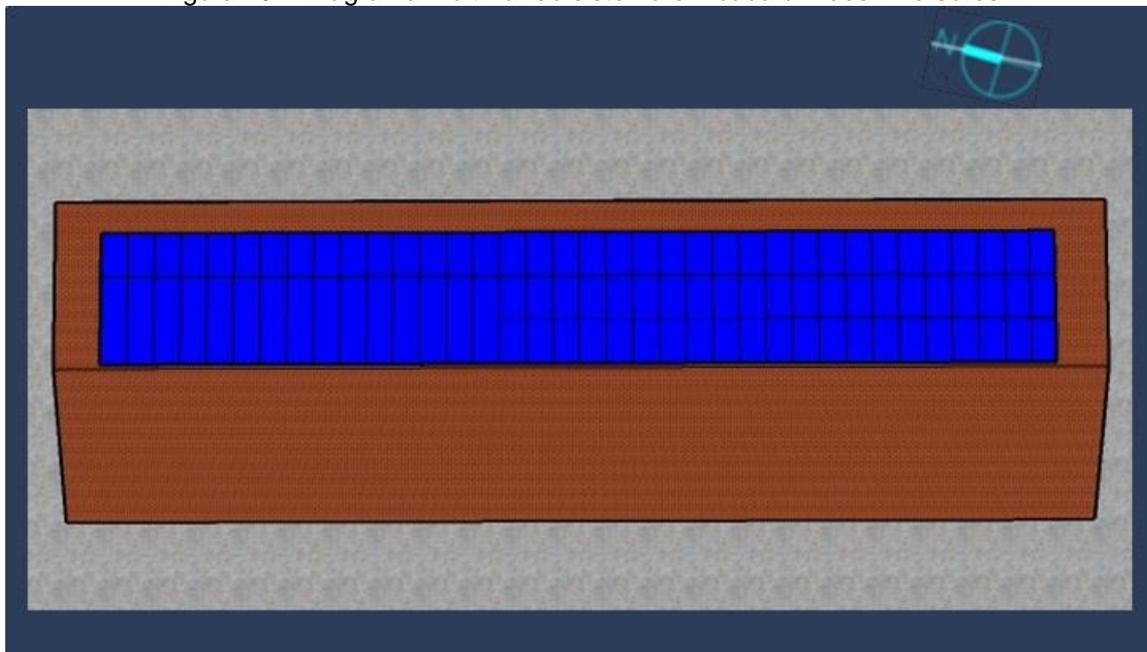
Figura 28 – Diagrama multifilar do sistema em cada um dos inversores



Fonte: Autoria própria (2018).

Os módulos ficarão posicionados sobre o telhado da escola conforma as Figuras 18 e 19.

Figura 29 – Diagrama multifilar do sistema em cada um dos inversores



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 30 – Diagrama multifilar do sistema em cada um dos inversores



Fonte: Autoria própria (2018)

## 5 PROJETO DO SISTEMA EÓLICO

### 5.1 SELEÇÃO DOS DADOS METEOROLÓGICOS

Para determinar o potencial de geração de energia elétrica a partir de fontes eólicas, é preciso, inicialmente, realizar um estudo da velocidade do vento na região da unidade consumidora à qual será implementado o microgrid. Para isso, foram considerados dados de diferentes organizações confiáveis, visando a obtenção de um quadro mais condizente à realidade.

Através do BDMEP, um banco de dados online, o INMET fornece uma grande base de informações meteorológicas, incluindo a velocidade do vento e a sua direção, obtidos em 3 medições diárias, nos horários 00:00, 12:00 e 18:00. Contudo, tais medições fornecidas neste banco, são realizadas por uma estação localizada na cidade de Curitiba, apresentando valores ligeiramente diferentes àqueles que seriam de fato os registrados no local do projeto, situado em um município vizinho. Para obter dados mais coerente, os dados obtidos pelo BDMEP, passaram por um tratamento matemático.

As informações adquiridas sobre a velocidade média do vento no local são disponibilizadas pelo CRESESB - CEPEL e referem-se à noções trimestrais para cada estação do ano. Na tabela abaixo encontra-se uma comparação entre os valores das velocidades médias do vento de mensurações preparadas em Curitiba e na cidade da Lapa, por estações do CRESESB - CEPEL.

Tabela 11 – Valores Médios de Velocidade do Vento em Curitiba e na Lapa

		<b>Verão</b>	<b>Outono</b>	<b>Inverno</b>	<b>Primavera</b>	<b>Anual</b>
<b>Curitiba</b>	velocidades do vento (m/s)	3,19	3,84	4,25	3,82	3,78
<b>Lapa</b>		4,91	5,84	6,28	6,01	5,76

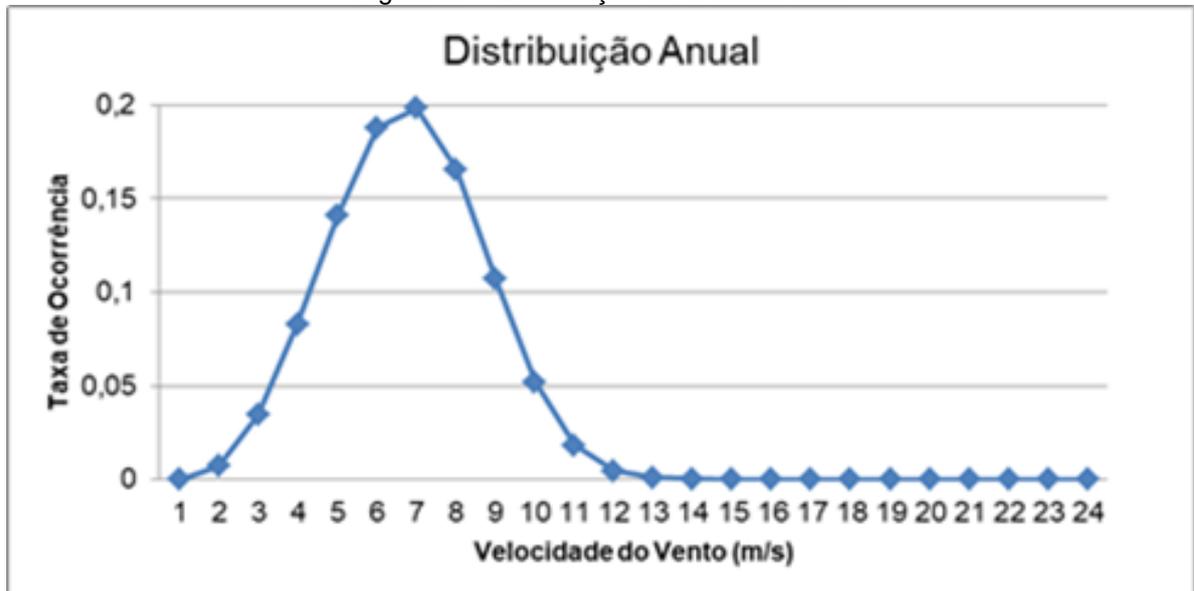
Fonte: CRESESB - CEPEL (2018)

Assim, o tratamento executado nos dados da Lapa é baseado na técnica de proporcionalidade. Os valores fornecidos pelo BDMEP foram divididos pela sua média mensal, no intervalo de Maio de 2017 à Abril de 2018, e em seguida esse resultado foi multiplicado pelos valores médios fornecidos pelo CRESESB referentes a cada estação do ano. Por fim, obteve-se um banco de dados novo, relativo às velocidades do vento registradas no local da escola, agora com uma base horária.

Apoiando-se neste novo montante de informações, aplicou-se a técnica de Distribuição de Weibull, que traduz-se em uma função de distribuição de probabilidade contínua biparamétrica e permite a análise específica de uma distribuição. Um estudo gráfico e matemático cuidadosos dos aspectos do vento em função de sua ocorrência são viabilizados por esse método, amplamente adotado em artigos acadêmicos para aproveitamento da energia eólica (Silva, 1999).

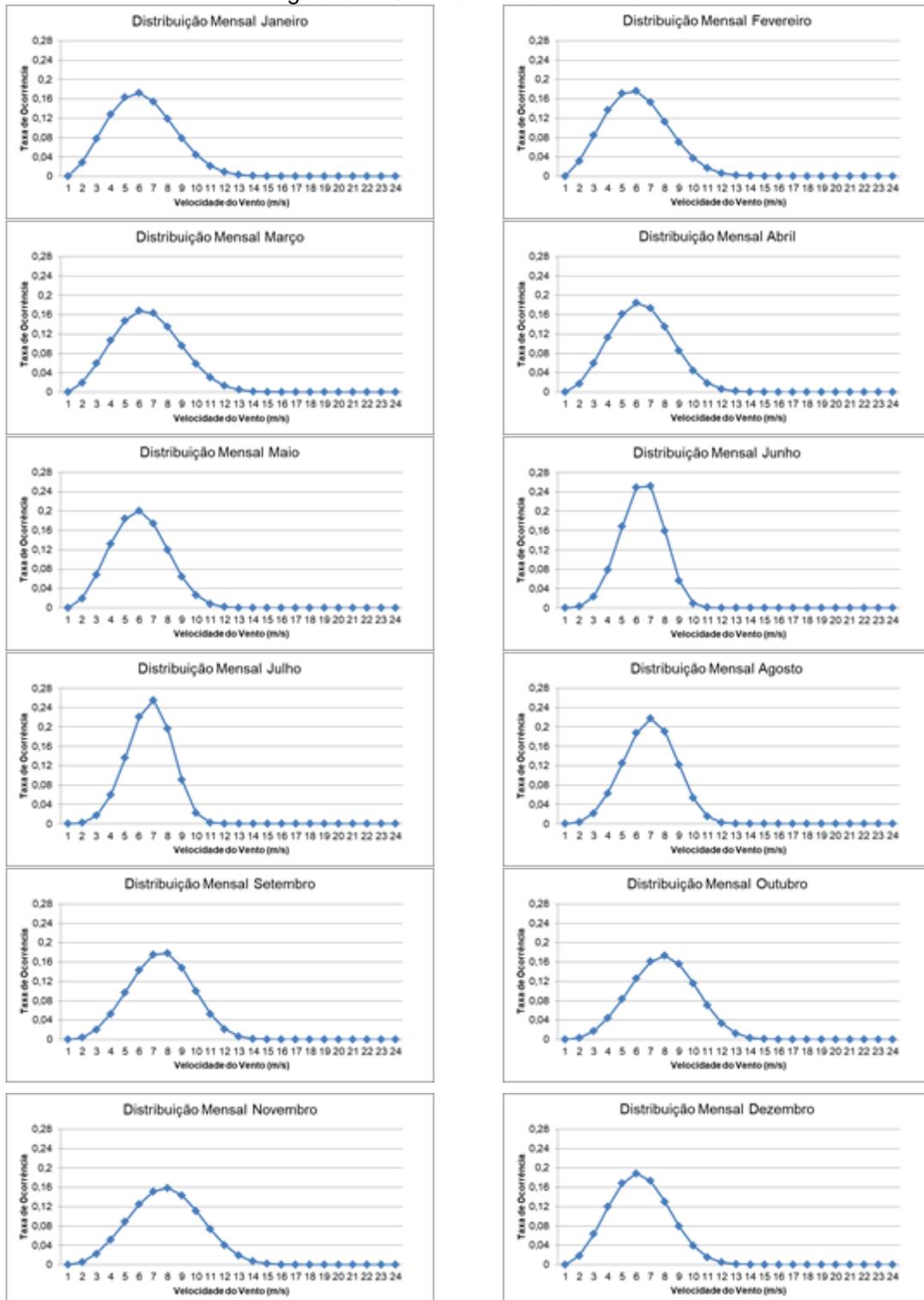
A curva conseguinte da aplicação da técnica de Weibull nos dados meteorológicos do local onde será implantado o sistema é apresentada abaixo, nas Figuras 20 e 21.

Figura 31 – Distribuição de Weibull Anual



Fonte: Autoria própria (2018)

Figura 32 – Curvas de Weibull Mensais



Fonte: Autoria própria (2018)

## 5.2 SELEÇÃO DO AEROGERADOR

A definição da marca e modelo do aerogerador a ser empregue no dimensionamento de um sistema de geração elétrica a partir da força dos ventos é de extrema importância. A máquina elegida irá estipular os parâmetros essenciais para o funcionamento da usina geradora e para a produção de energia.

Dentre as características técnicas do sistema determinadas pelo aerogerador, destacam-se as seguintes:

- Máxima Potência de Geração;
- Velocidade de Acionamento;
- Velocidade Nominal;
- Velocidade Máxima de Operação;
- Velocidade de Sobrevivência.

De maneira complementar, diversos outros fatores intervêm na operação do sistema, como o diâmetro do rotor, sua massa total, a altura da torre, o número de pás, entre outros. A influência dessas características infere uma avaliação completa no modelo escolhido. Além disso, mais uma especificação de papel trivial assoma-se ao projeto: a capacidade do aerogerador realizar comando mecânico para controlar a velocidade de rotação das pás, tanto do tipo Estol (Stall) ou do tipo Passo (Pitch), acoplados ao instrumento.

Compreendendo todos os pormenores, foram analisados alguns modelos de três marcas distintas e intentando facilitar esta apuração, um tabela comparativa foi desenvolvida.

Tabela 12 – Análise Comparativa dos Aerogeradores

Marca	TREBA			Southwest Windpower Skystream Land 3.7	Eurowind Eoltec Sirocco	WES - Wind Energy WES50	WES100 Solutions
	TREBA-0160	TREBA-0210	TREBA-0201				
Características Elétricas							
Potência Máxima de Entrada (kW)	60	10,1	1,7	2,4	6	72	100
Tensão Máxima de Entrada (V)	400	400	400	120 - 240	230	400 (3 fases + neutro)	400 (3 fases + neutro)
Frequência Elétrica (Hz)	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60
Características Mecânicas							
Número de Pás	3	3	3	3	2	2	2
Diâmetro do Rotor (m)	19,8 ou 21,2	13,8	2,4	3,72	5,8	20	18
Massa Total (kg)	5000	3500	150	77	202	3300	3300
Altura da Torre (m)	24 ou 30	18 ou 24	8 ou 12 ou 18	*	18 ou 24 ou 30	24 ou 30	8 ou 24 ou 30
Ruído Sonoro emitido (dBI)	não informado	não informado	não informado	46,4 a 60m	65 a 20m	45 a 100m	45 a 100m
Temperatura de Operação (°C)	-20 a 50	-20 a 50	-20 a 50	não informado	20	-20 a 40	-20 a 40
Características de Velocidade							
Velocidade de Aterramento (m/s)	2,3	2	3	3,5	4	3	3
Velocidade Nominal (m/s)	8,7	7	13,5	9	12	9,5	13
Velocidade Máxima para Operação (m/s)	25	18	18	25	14	25	25
Velocidade Máxima para Sobrevida (m/s)	52,5	37,5	42	63	60	52,5	60
Tipo de Controle da Velocidade da Turbin	Pitch, Yaw	Pitch, Yaw	Pitch, Yaw	Inexistente	Yaw	Estbl	Estbl
Outras Características							
Expectativa de Vida Mínima (anos)	20	20	20	20	25	20	20
Grau de Proteção (Código IP)	IP55	IP55	IP55	não informado	5	IP55	IP55

Fonte: Autoria própria (2018)

Conforme apresentado no Item 5.1, o local da instalação possui valores de velocidade de vento relativamente baixos, impondo que a máquina eleita para o projeto tenha valores de velocidade de acionamento e velocidade nominal consideravelmente baixos também.

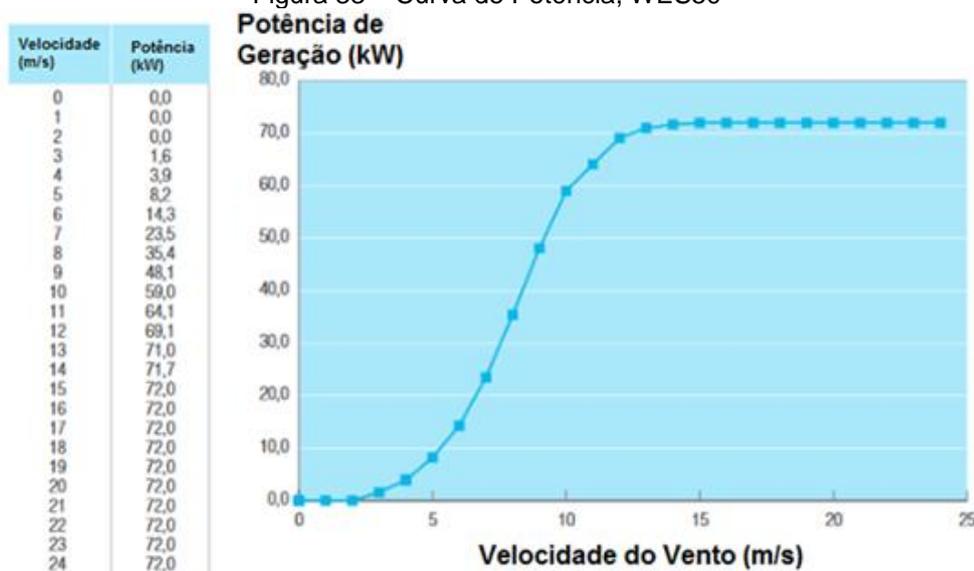
Esta determinação torna os valores de máxima velocidade de operação e máxima velocidade de sobrevivência menos decisivos para a escolha do modelo do aerogerador desta instalação.

Por fim, destacaram-se os modelos, TREBA-0160, TREBA-0210, WES50 e Eoltec Sirocco.

Os modelos da marca TREBA e Eurowind possuem função de comando tipo YAW, permitindo um domínio da rotação da cabine da torre para melhor proveito da incidência eólica. Contudo, os equipamentos providos pela TREBA oferecem controle ativo da velocidade de rotação da turbina, do tipo Pitch, o qual disponibiliza maior eficácia em relação ao controle passivo, tipo Estol, do modelo WES50. Já o aerogerador Eoltec não possui sistema para gerência de sua velocidade de rotação, mostrando uma baixa competência em velocidades superiores à sua velocidade nominal.

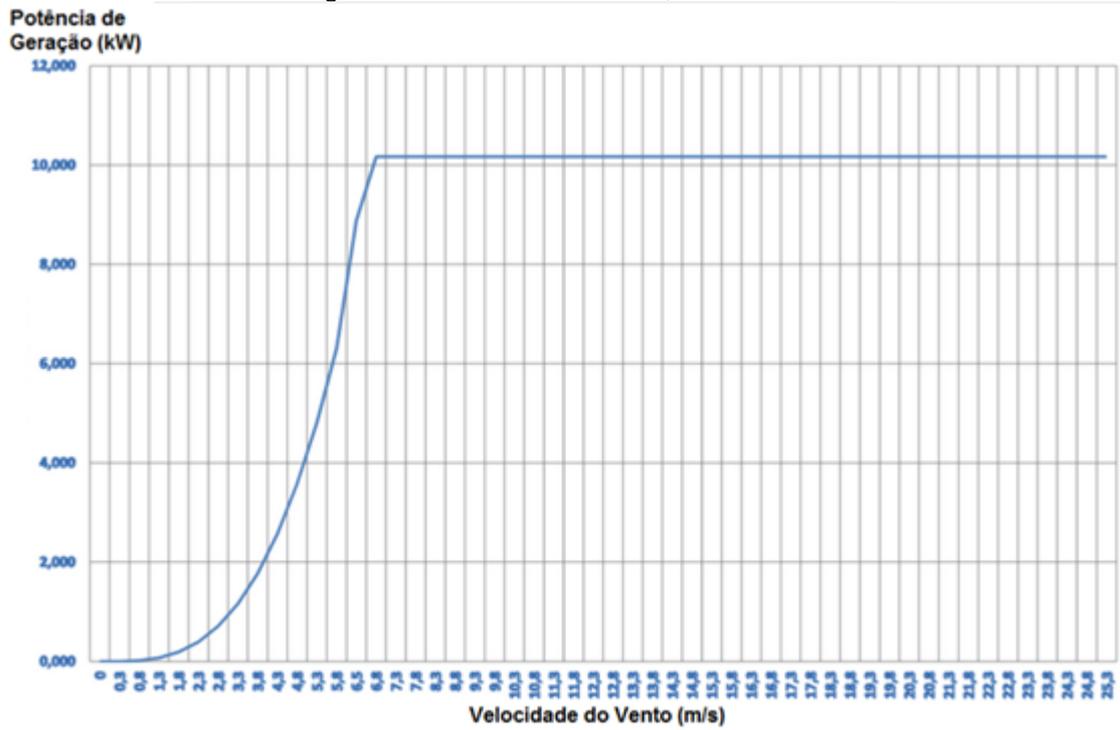
As curvas de potência de cada modelo, utilizadas para análise das capacidades de geração de cada modelo de acordo com a velocidade do vento, estão expostas a seguir nas Figuras 22, 23, 24 e 25.

Figura 33 – Curva de Potência, WES50



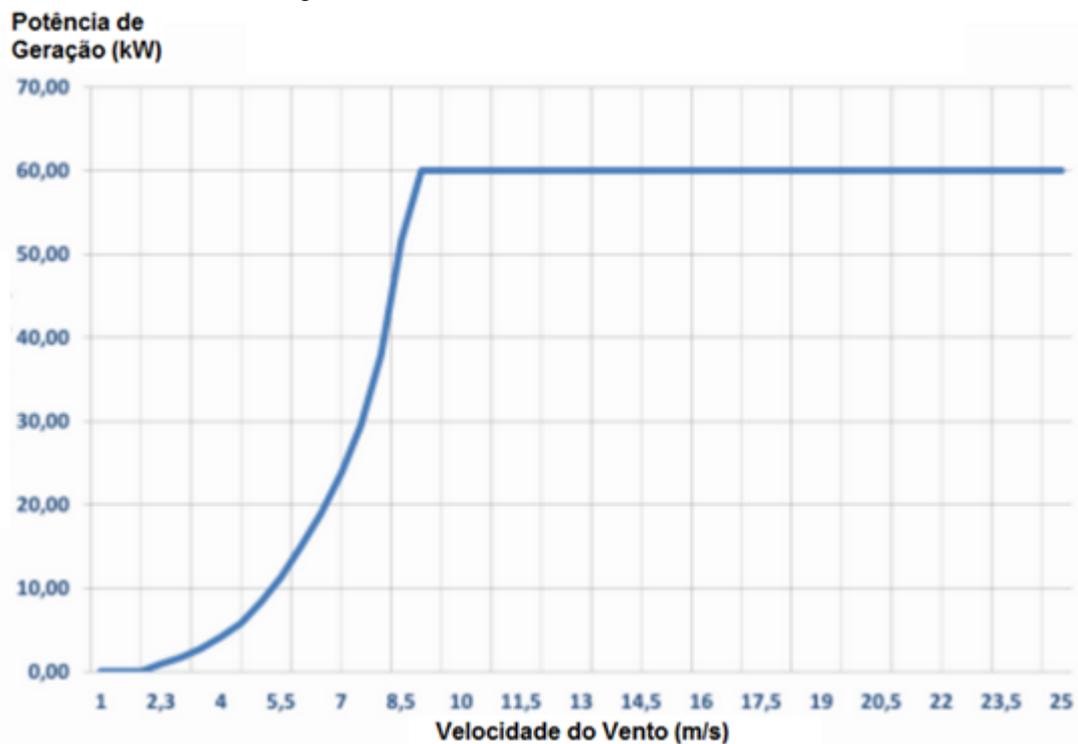
Fonte: Wind Energy Solutions (2018)

Figura 34 – Curva de Potência, TREBA-0210



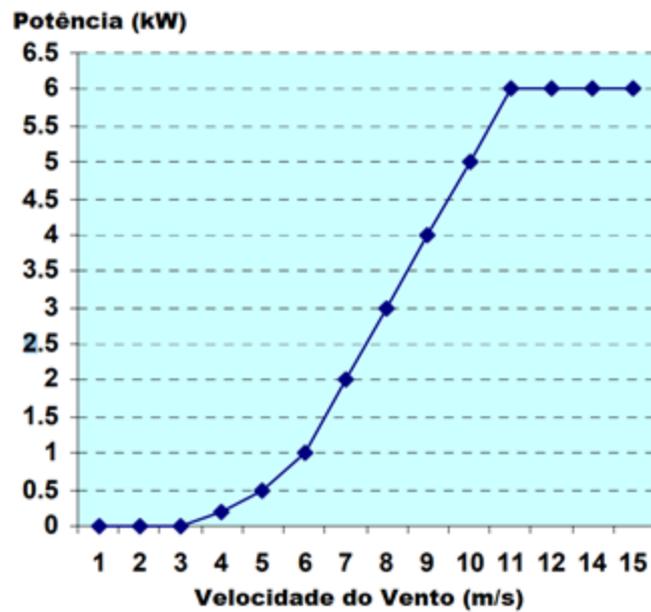
Fonte: Treba (2018)

Figura 35 – Curva de Potência, TREBA-0160



Fonte: Treba (2018)

Figura 36 – Curva de Potência, Eoltec Sirocco



Fonte: Eurowind (2018)

Examinando o desempenho de cada dispositivo, verifica-se que o modelo TREBA-0210 alcança sua máxima potência em um valor menor de velocidade e, conseqüentemente, revela maior eficiência para um valor de velocidade igual à média registrada na região da instalação, aproximadamente 5 m/s.

Feito este balanço entre protótipos, optou-se pelo aerogerador modelo TREBA-0210 para dimensionamento do projeto.

### 5.3 CORREÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO PARA A ALTURA DO AEROGERADOR

Segundo o site do CRESESB - CEPEL, a altura da obtenção dos valores de velocidade do vento é de 50m. Porém, o equipamento escolhido é disposto em apenas duas opções de alturas: 18m e 24m. Dessa maneira, é indispensável corrigir as velocidades do vento da base de dados para a altura adequada.

A torre escolhida tem altura de 24 m para que a máquina seja exposta a valores Primeiramente, escolhe-se a torre de altura 24m, pois sua altura mais elevada estará exposta a maiores volumes de força eólica atuante. Em seguida, a operação

matemática à qual os valores da velocidade do vento registrados serão submetidos está reproduzida a seguir na Equação 17.

$$v = v_0 \cdot \left( \frac{H}{H_0} \right)^a \quad (17)$$

Onde

$v$  é a velocidade do vento na altura  $H$  [m/s]

$v_0$  é a velocidade do vento na altura  $H_0$  [m/s]

$H_0$  é a altura da torre [m]

$H$  é a altura na qual as medições foram realizadas [m]

$a$  é o coeficiente de atrito do terreno, ou coeficiente de Hellman [ad.]

A grandeza de  $a$  pode ser definido a partir da Tabela 13, abaixo.

Tabela 13 – Coeficiente de atrito para vários tipos de terreno

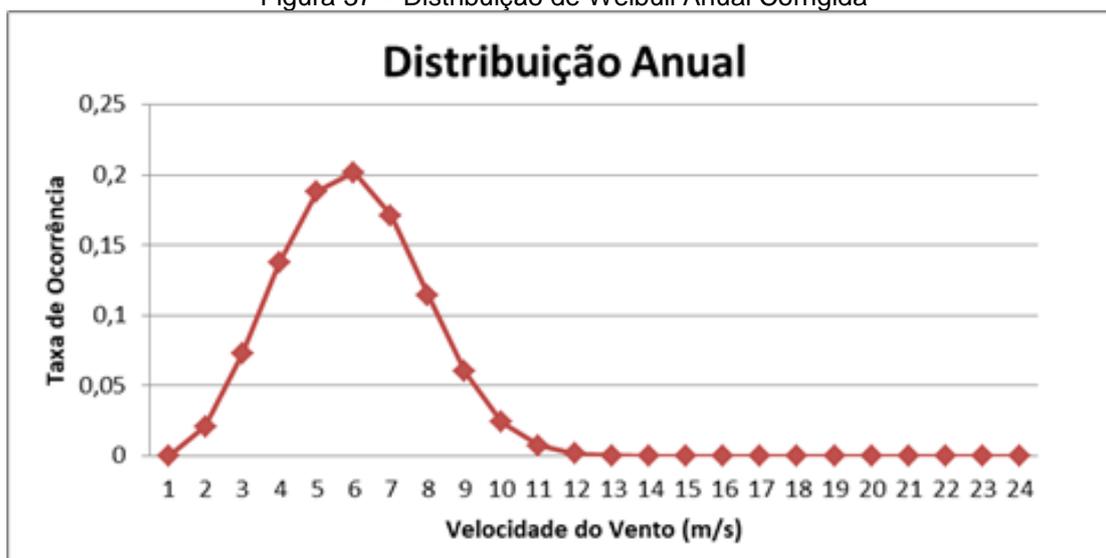
Característica do terreno	Coeficiente de atrito
Calma superfície aquática ou solo suave	0,10
Gramma alto ao nível do solo	0,15
Arbustos e cercas	0,20
Áreas rurais com muitas árvores	0,25
Pequenas cidades com árvores e arbustos	0,30
Grandes cidades com prédios elevados	0,40

Fonte: ROHATGI (1994)

Ponderando as propriedades do local da instalação, o qual não apresenta edifícios de grande porte e possui poucas árvores, elege-se um valor para o coeficiente de Hellman igual a 0,2.

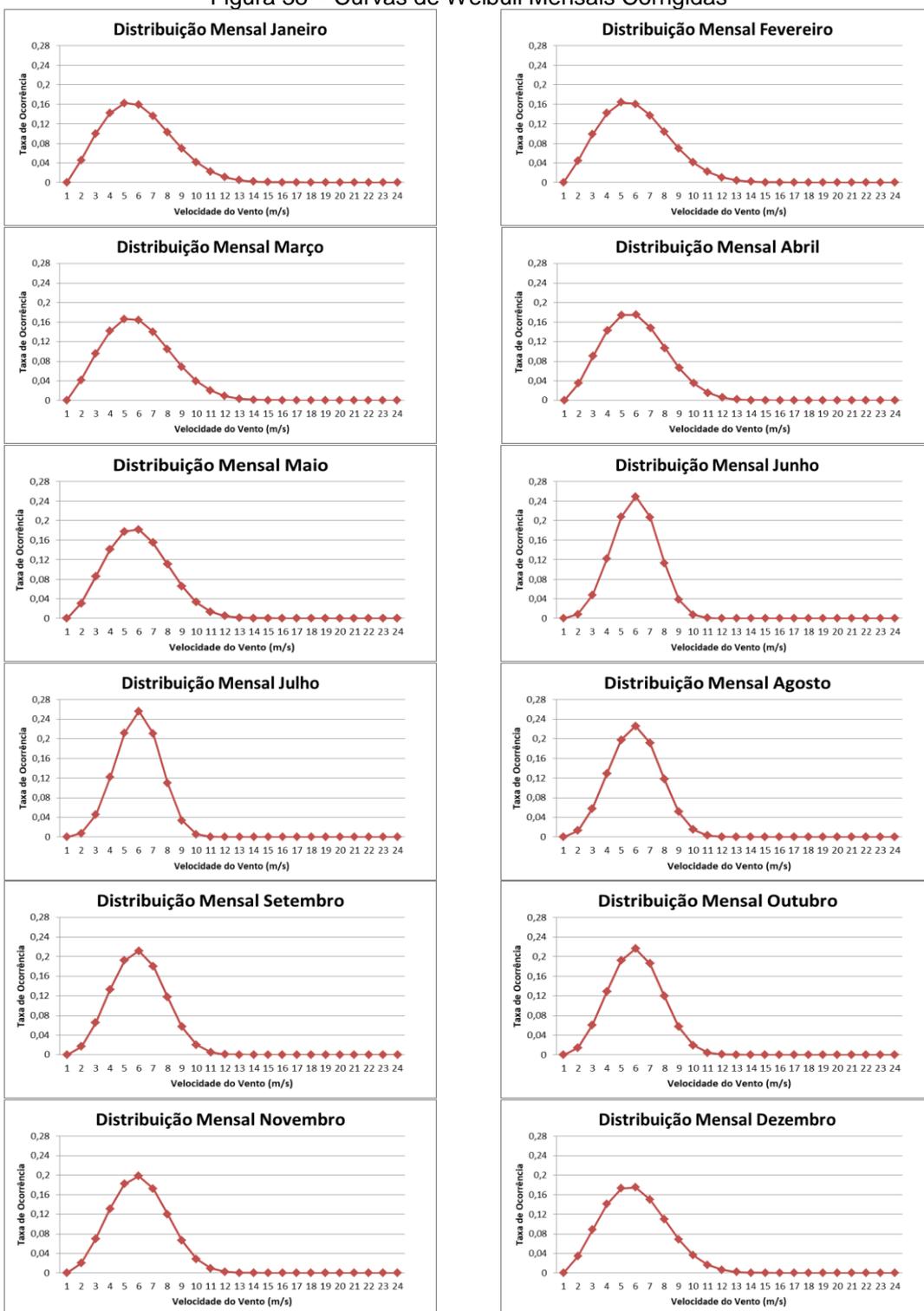
Com as medidas ajustadas ao tamanho da torre, concebe-se um novo banco de dados definitivo para o projeto, assim como novas curvas a partir da distribuição de Weibull, aplicada novamente. As novas curvas estão indicadas nas Figuras 26 e 27.

Figura 37 – Distribuição de Weibull Anual Corrigida



Fonte: Autoria própria (2018)

Figura 38 – Curvas de Weibull Mensais Corrigidas



Fonte: Autoria própria (2018)

## 5.4 ARRANJO DOS AEROGERADORES

A área disponível para a instalação dos geradores situa-se nos fundos do terreno com 21 m de largura e 62 m de extensão, somando 1302 m<sup>2</sup>. A Figura 28, abaixo, ilustra uma vista de topo do espaço cedido pela escola.

Figura 39 – Área Disponível para a Instalação dos Aerogeradores no local

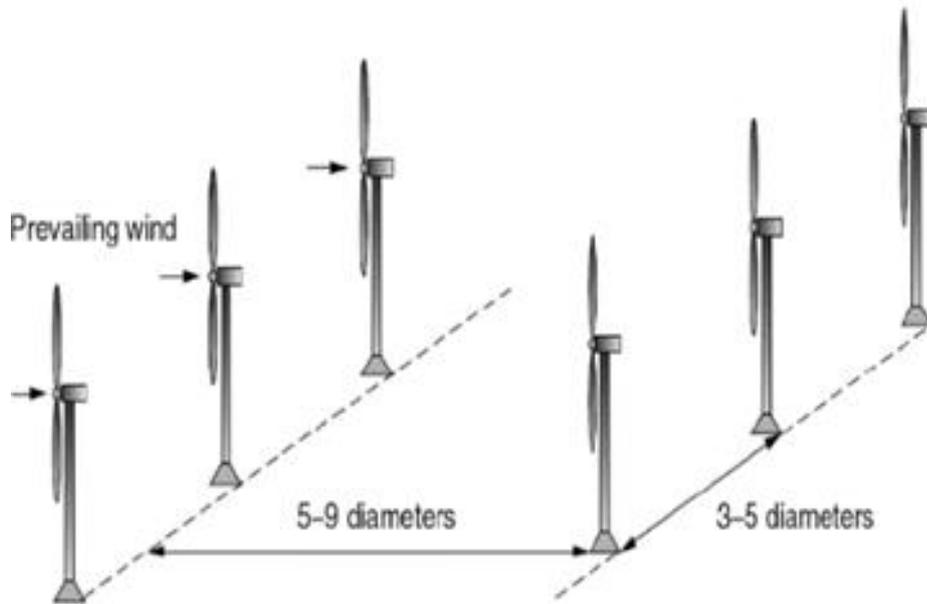


Fonte: Autoria própria (2018)

Para uma obtenção máxima de eficiência da conversão de energia eólica é preciso garantir a separação correta entre os aparelhos, tanto entre os pontos laterais, quanto frontais.

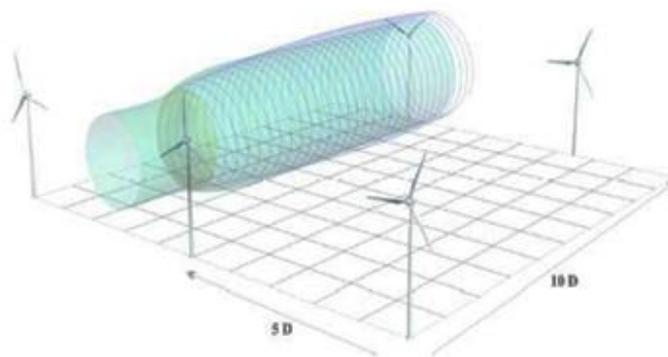
Entre as bibliografias referência no tema, não existe um consenso em relação a essas separações. As Figuras 29 e 30 exemplificam a divergência sobre as determinações de distanciamento entre duas fontes distintas.

Figura 40 – Alternativa para Posicionamento de Aerogeradores



Fonte: ECE7800 (2010)

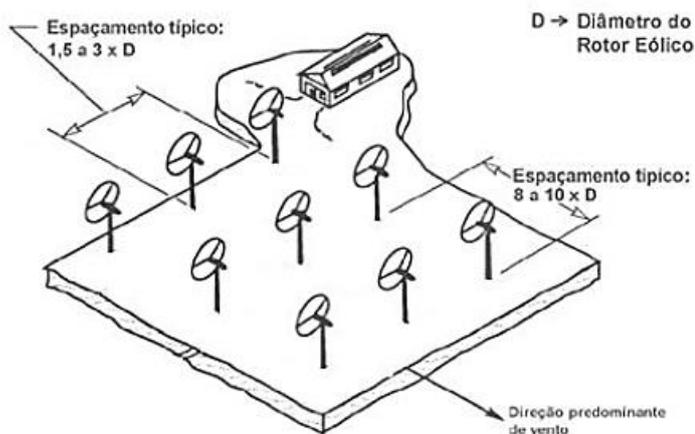
Figura 41 – Alternativa para Posicionamento de Aerogeradores



Fonte: SANSON (2006)

Assim, os intervalos aplicados neste projeto seguem os princípios optou-se por um espaçamento conforme pronunciado no “Manual de Implantação de Sistemas Híbridos Fotovoltaico-Eólico-Diesel para Geração de Energia Elétrica”, Projeto BRA/99/011, Carta de Acordo 001/2007. Este esquema está apresentado na Figura 42.

Figura 42 – Posicionamento de Aerogeradores selecionado



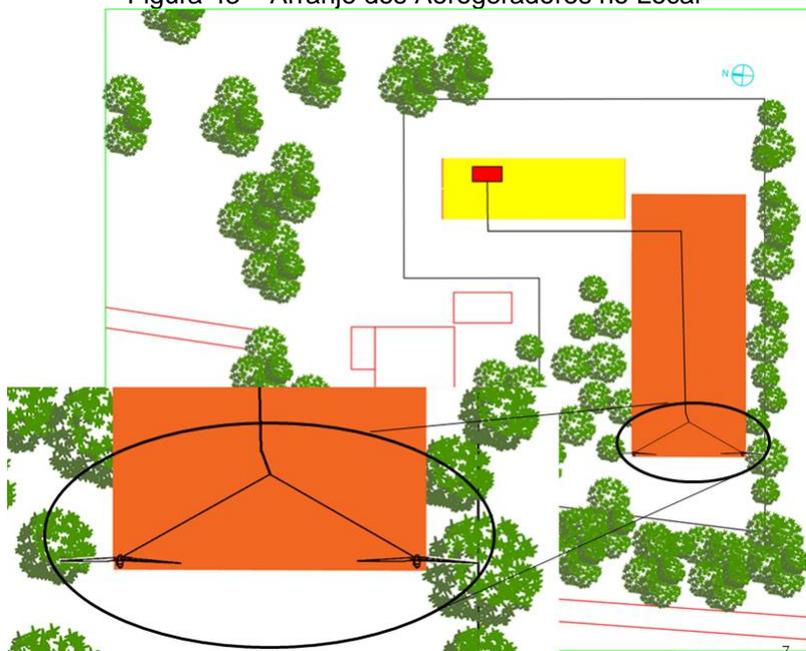
Fonte: Projeto BRA/99/011 (2007)

O diâmetro do rotor do modelo selecionado é igual a 13,8m e, respeitando o esquema de espaçamento adotado, define-se um espaçamento frontal igual a 110 m e um espaçamento lateral de 20,7 m.

Aplicando as medidas anteriormente mencionadas para distanciamentos entre os aerogeradores, o número máximo de torres admitido é de 2 torres, uma em cada extremidade mais afastada da área cedida.

Assim, a disposição dos mecanismos será feita segundo a ilustração da Figura 43.

Figura 43 – Arranjo dos Aerogeradores no Local

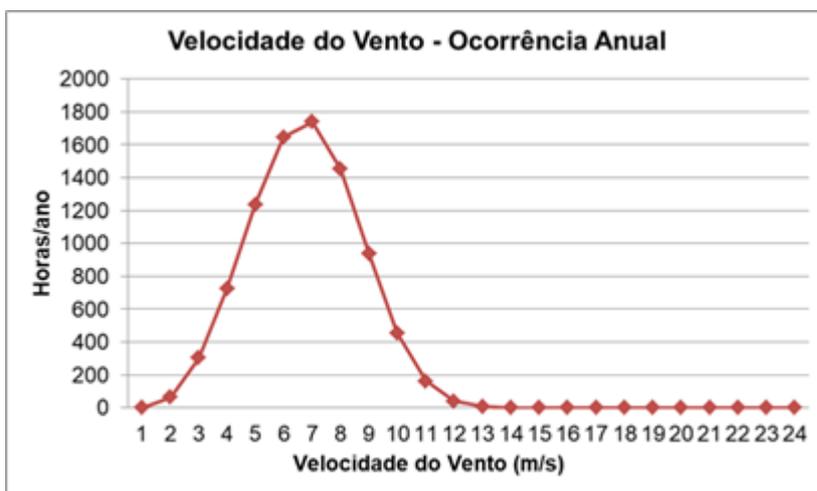


Fonte: Autoria própria (2018)

## 5.5 CAPACIDADE DE GERAÇÃO DO SISTEMA EÓLICO

Servindo-se da distribuição de Weibull para a velocidade dos ventos no local onde serão instaladas as torres da instalação, é possível traçar a curva da velocidade dos ventos em função de quantas horas por ano estas ocorrem, através da multiplicação dos valores da curva de Weibull pelo número de horas em um ano, ou seja, 8760 horas. Esta curva está exposta da Figura .

Figura 44 – Curva Velocidade dos Ventos X Horas de Ocorrência/Ano



Fonte: Autoria própria (2018)

Fundamentando-se na curva acima, em conjunto com a curva de potência do aerogerador estabelecido, é possível determinar o retrato esperado para a geração padrão de energia a partir das fontes eólicas deste projeto. Para isso, multiplica-se o potencial de geração de cada velocidade pela quantidade de horas no ano referente à velocidade respectiva, conforme a equação (18).

$$E_{eól} = P_g(v_{vento}) * t_{ocor}(v_{vento}) \quad (18)$$

Onde

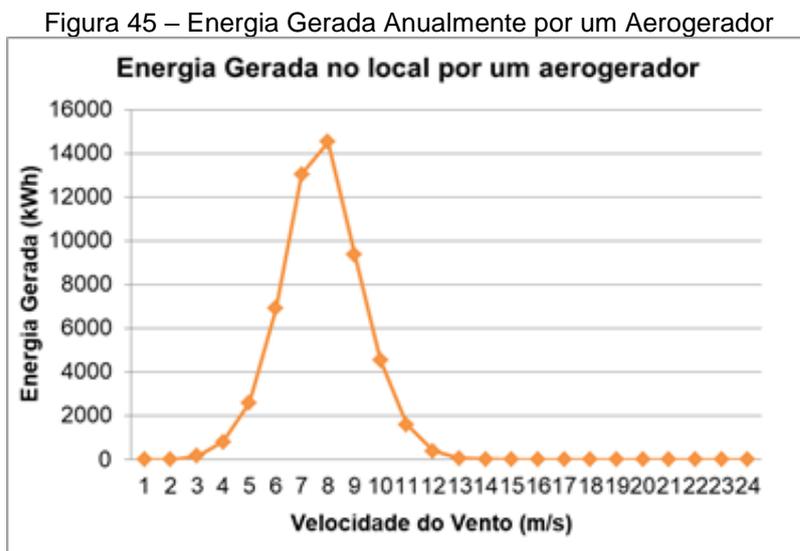
$E_{eól}$  é a energia eólica gerada [W.h]

$P_g$  é a potência do aerogerador [W]

$v_{vento}$  é a velocidade do vento [m/s]

$t_{ocor}$  é o tempo de ocorrência durante o ano [h]

Como resultado, adquire-se uma nova curva, tendo como parâmetros a energia elétrica produzida anualmente por um aerogerador do modelo escolhido em função da velocidade do vento registrada no local. Esta curva está apresentada na Figura 33.



Fonte: Autoria própria (2018)

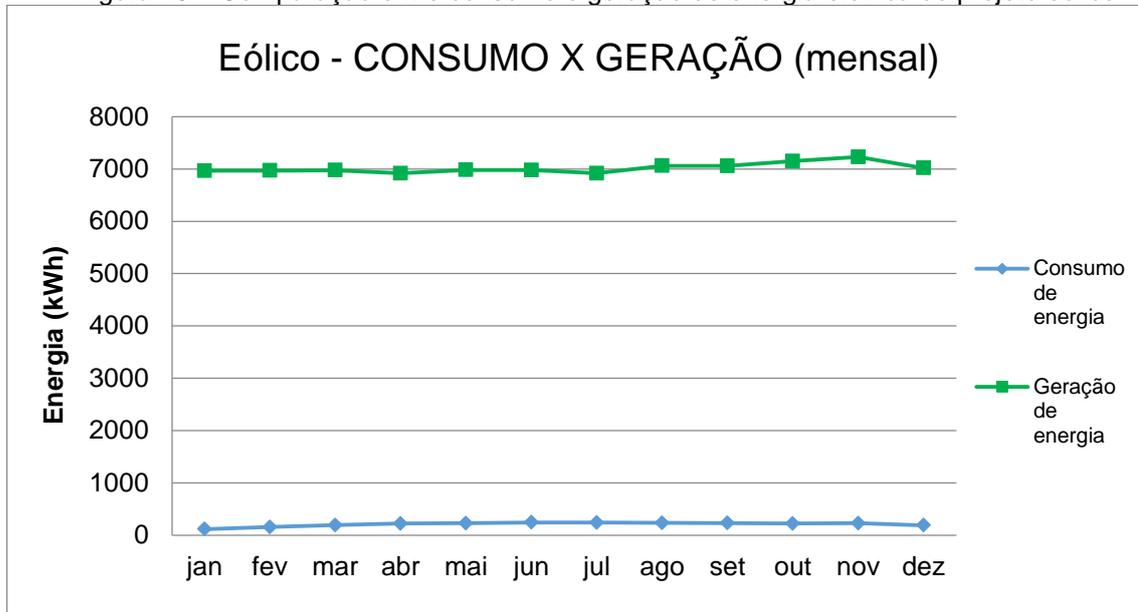
Ao realizar a integração desta curva, constata-se que com apenas um gerador instalado, o sistema alcançará uma capacidade total de geração equivalente a 54 MWh anualmente.

Efetuando a razão entre a energia produzida anualmente e o número de horas em um ano, ou seja, 8760 horas, obtém-se a potência média de um aerogerador, quando em operação no local. No contexto deste dimensionamento, este valor corresponde a aproximadamente 6 kWh.

Visto que o local pode comportar até dois geradores, o sistema eólico terá um montante de 108 MWh conferido à capacidade total de fornecimento de energia. Mesmo este número sendo maior que o consumo da escola, optou-se por usufruir todo o espaço ocioso da escola cedido ao projeto para que total o potencial eólico fosse aproveitado e a energia excedente fosse compartilhada entre as outras unidades consumidoras próximas, competindo à prefeitura essa distribuição na região.

A Figura 46 abaixo ilustra um comparativo da geração esperada mensalmente pelo sistema eólico dos dados de consumo de energia elétrica da instalação.

Figura 46 – Comparação entre consumo e geração de energia elétrica do projeto eólico



Fonte: Autoria própria (2018)

## 5.6 FATOR DE CAPACIDADE

Denomina-se fator de capacidade a divisão de toda a energia efetivamente concebida pelo sistema de geração eólica pela energia que seria constituída pela mesma instalação, considerando a situação utopista em que os aerogeradores operam com sua potência nominal durante todo o processo de geração. Abaixo, apresenta-se o cálculo executado para encontrar o fator de capacidade deste sistema de geração eólico.

$$FC = \left( \frac{PAE}{8760 * P_n} \right)$$

Onde

$PAE$  é a Produção de energia elétrica Anual Estimada [W.h]

$P_n$  é a Potência nominal do sistema [W]

Aplicando a este estudo, obtém-se o desenvolvimento abaixo.

$$FC = \left( \frac{108003,19 * 10^3}{8760 * 2 * 10 * 10^3} \right)$$

$$FC = 0,61645$$

## 5.7 RESULTADO

A projeção obtida é um fator de capacidade igual a 61,7%. Como esperado para a região em questão, identifica-se um médio fator de capacidade, embora durante o dimensionamento do conjunto tenha-se optado por um aerogerador compatível às condições do local, como menores valores de velocidade nominal e velocidade de acionamento da turbina mais baixa. Isso em vista, presume-se que o investimento talvez não seja tão vantajoso, porém esta questão será avaliada de maneira detalhada na análise econômica dos sistemas no próximo capítulo.

## 5.8 CONEXÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA COM A REDE

A geração de energia elétrica provinda de aerogeradores produz corrente alternada, com variações irregulares de frequência de acordo com a variação da velocidade do vento. Por conseguinte, para tornar concebível o vínculo entre um aerogerador e a rede elétrica da empresa distribuidora de energia, que possui uma frequência de 60Hz, é necessária a utilização de alguns equipamentos apropriados.

Em geral, são empregados retificadores, ou conversores CA/CC, e estes aparelhos convertem a energia gerada em corrente alternada, em corrente contínua.

Então, esta corrente contínua é mais uma vez transformada em corrente alternada, através do uso de inversores de frequência, ou conversores CC/CA.

Todavia, o aerogerador escolhido TREBA-0210 já possuiu um conversor Back-to-Back (IGBT), que possibilita a interligação entre a rede e o gerador elétrico, de maneira semelhante à descrita acima. A corrente elétrica produzida pelo gerador de ímã permanente é transformada por meio deste conversor CA/CC/CA de baixa tensão, sem que dispositivos complementares sejam adicionados para efetuar essa interconexão, também nomeada como operação grid-tie.

O conversor que compõe o aerogerador designado para esta proposta tem operação limitada a uma tensão máxima de 400V, para um sistema de 3 fases e neutro. Soma-se a isto, a limitação de frequência de operação do conversor que trabalha tanto na frequência de 60Hz, quanto na frequência de 50Hz.

O conversor constituinte é instalado no chão, em um gabinete externo à torre, podendo situar-se à uma distância máxima de 10m da mesma. Dessa forma, facilita-se o acesso ao sistema de controle da operação de cada torre.

Neste gabinete, estarão contidos:

- Uma chave de emergência, para desativação automática ou manual do gerador elétrico;
- Unidade de alimentação 24Vcc;
- Fusíveis e disjuntores termomagnéticos, para proteção contra surtos, curto-circuitos e temperaturas acima do limite de operação;
- Sistema CLP com módulos I/O, para controle dos sistema YAW e Pitch;
- Filtros, para eliminar ruídos provenientes do sistema de geração que poderiam ser injetados à rede;
- Transformador trifásico a seco;
- Conversor IGBT duplo.

Os dispositivos de segurança do sistema garantem que o aerogerador e o conversor serão desconectados da rede caso a tensão esteja fora dos parâmetros de operação pré-definidos, segundo os casos a seguir:

- Tensão em um nível igual ou superior à 115% da tensão nominal por um tempo igual ou superior à 0,2s;
- Tensão em um nível igual ou superior à 110% da tensão nominal por um tempo igual ou superior à 3s;
- Tensão em um nível igual ou inferior à 85% da tensão nominal por um tempo igual ou superior à 0,4s;
- Tensão em um nível igual ou inferior à 40% da tensão nominal por um tempo igual ou superior à 0,2s;

Os dispositivos de proteção também deverão atuar para os casos em que a frequência da rede atinja dimensões fora dos padrões fixados abaixo.

- Frequência com um valor de 1,5 Hz acima da frequência de operação por um tempo igual ou superior a 0,1s;
- Frequência com um valor de 2,5 Hz abaixo da frequência de operação por um tempo igual ou superior a 0,1s;

Atentando-se à conexão dos aerogeradores com a rede, para a escolha do cabeamento é primordial avaliar a corrente máxima que cada gerador irá produzir e injetar na rede. Considerando a potência máxima do modelo eleito é igual à 10kW, e a tensão trifásica do sistema será de 220V (tensão fase-neutro igual à 127V), conclui-se que a corrente em cada condutor será igual à aproximadamente 27A.

Tendo conhecimento do valor projetado da corrente de cada gerador, pode-se dimensionar o tamanho dos condutores e os dispositivos de proteção que serão utilizados.

Para deliberar os condutores empregues neste plano de instalação, adotou-se os parâmetros estipulados pela norma NBR 5410:2004 Instalações elétricas de baixa tensão da ABNT.

Os condutores a serem inseridos no projeto serão cabos unipolares contidos em um eletroduto de PVC enterrado. Conseqüentemente, o procedimento de instauração dos condutores será o 61A, e a técnica de referência, o tipo D. Com tais particularidades, é necessário atentar-se para a possível indispensabilidade da

aplicação dos fatores de correção presentes na norma aplicada dispostos nas seções a seguir.

- Tabela 40 — Fatores de correção para temperaturas ambientes diferentes de 30°C para linhas não-subterrâneas e de 20°C (temperatura do solo) para linhas subterrâneas.
- Tabela 41— Fatores de correção para linhas subterrâneas em solo com resistividade térmica diferente de 2,5 K.m/W.
- Tabela 42 — Fatores de correção aplicáveis a condutores agrupados em feixe (em linhas abertas ou fechadas) e a condutores agrupados num mesmo plano, em camada única.

Considerando as informações contidas nas tabelas mencionadas acima, assim como, o processo de instalação aplicado e a corrente trifásica de grandeza igual a 27A, apoia-se nas informações constantes na Tabela 36, referente às capacidades de condução de corrente em ampères, para os métodos de referência A1, A2, B1, B2, C e D, da norma ABNT NBR 5410:2004 para deliberar a seção dos condutores que farão a conexão entre os aerogeradores e a rede. Os materiais utilizados para cabeamento terão secção transversal de 10mm<sup>2</sup>.

A amplitude da corrente de cada máquina junto com a importância de capacidade de condução dos condutores selecionados, fundamentam a estimativa dos dispositivos de proteção para o sistema. Acatando a medida encontrada para a corrente trifásica equivalente a 27A, poderão ser designados disjuntores trifásicos, do tipo DIN, de corrente nominal parêlo à 32A, instalados no interior do quadro elétrico principal da escola.

## 5.9 ATERRAMENTO DOS AEROGERADORES DO SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA

O sistema de aterramento das torres dos aerogeradores será realizado de acordo com o especificado no manual do produto fornecido pelo fabricante. Isto é, um condutor circular de cobre de 50mm<sup>2</sup>, será designado para cada torre e

posicionado a uma distância de 1m da fundação da torre, com profundidade de aproximadamente 1m abaixo da superfície.

Este condutor circular será integrado a duas barras de aterramento revestidas de cobre, de seção igual a 16mm<sup>2</sup>, e comprimento igual a 6m. Em sequência, a base da torre, que é constituída de aço e possui uma camada protetora de zinco, será conectada ao condutor.

Na hipótese de a resistência de aterramento não seja satisfatoriamente baixa, as duas barras de aterramento podem ter seu comprimento alongado em até 4m. Caso a medida de resistência continue acima do valor esperado, poderão ser acrescentadas outras duas barras de 10m, de forma um quadrado seja formado entre as hastes.

É fundamental que as lâminas das torres disponham de um complexo para recebimento de descargas atmosféricas, que deve estar conectado à torre e, por consequência, ao sistema de aterramento da mesma. O modelo de aerogerador nomeado para o projeto, já tem incluso tal sistema de proteção contra descargas atmosférica.

## 5.10 IMPACTOS DA IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA

Apesar do sistema de geração de energia elétrica a partir da energia eólica ser capaz de gerar energia de forma limpa, sem gerar resíduos prejudiciais ao meio ambiente, a sua operação ainda causa diversos impactos socioambientais que não podem ser desprezados no desenvolvimento do seu projeto. As seções deste capítulo abordam os principais impactos resultantes da utilização deste sistema.

### 5.10.1 Emissão de Ruídos

Um dos aspectos mais conhecidos sobre a geração eólica é a concepção indesejada de ruídos sonoros, que apresentam duas fontes principais. O ruído mecânico provém das engrenagens e geradores e o ruído aerodinâmico tem sua origem nas pás das turbinas. Máquinas modernas de produção de eletricidade a partir do vento, contam com estruturas de isolamento sonoro, eliminando

praticamente todo o barulho, tornando-o imperceptível no meio externo ao aerogerador. Já o ruído aerodinâmico, decorrente da incidência do vento sobre as pás, tem proporcionalidade direta com a velocidade de ponta (FILHO; AZEVEDO, 2013).

Até então não existe um consenso nas bibliografias do âmbito e legislações de diversos países sobre o valor de uma distância segura a ser respeitada até locais com concentração de pessoas. No Brasil, quesitos pertinentes à emissão de ruídos sonoros são explanados pelas normas técnicas da ABNT 10.151 e 10.152. Contudo, as informações sobre a emissão de ruídos não é provida pelo fabricante do modelo eleito, impossibilitando a elaboração da projeção do sistema consoante a estas normas.

Assim, neste plano de instalação, a distância mínima projetada entre a cozinha da escola, situada no último cômodo da construção, e o aerogerador mais próximo foi de grandeza igual à o valor correspondente a 3 vezes a altura da torre utilizada, respeitando recomendações presentes na legislação de países como Dinamarca, Holanda e Bélgica, que ostentam grande desenvolvimento no setor energético eólico. Detendo a torre, 24m de altura, a distância mínima, consoante o critério aplicado é de 72m.

De qualquer modo, as torres mantêm-se ainda a uma proximidade significativa em relação aos locais de estudo e trabalho da escola. Conclui-se, reafirmando a inconveniência da produção acentuada de ruído sonoro, conhecida previamente, a partir do sistema de geração eólico, o que acarreta em uma grande desvantagem na comparação com o sistema de geração fotovoltaico.

### **5.10.2 Impactos Visuais**

Implantar um complexo de aerogeração eólica no terreno da escola ocasionará, também, em uma poluição na paisagem local e a localização da escola em uma região rural, ajuda a minimizar este impacto.

De um modo complementar, durante a decisão do posicionamento das torres nos fundos, precaveu-se da possibilidade de interferência das mesmas sob os painéis fotovoltaicos, presentes no esquema híbrido.

Ademais, outro possível efeito procedente da presença dos aerogeradores, pode ser a impressionabilidade inerente à estas grandes estruturas por parte de alunos, funcionários e visitantes da escola. Embora acredite-se que este tipo de instalação cause uma boa impressão, por tratar-se de uma tecnologia limpa, o baixo fator de capacidade decorrente da baixa velocidade de vento no local causará uma baixa velocidade de rotação das turbinas, podendo estimular nas pessoas a falsa conclusão de tratar-se de um gênero ineficiente de geração de energia.

### **5.10.3 Impactos Ambientais**

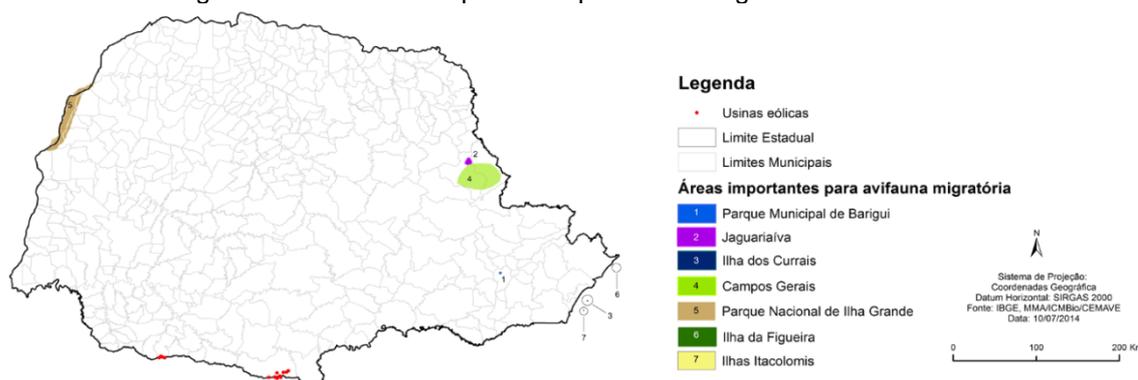
Os impactos ambientais decorrentes da implementação de turbinas eólicas podem ser divididos conforme o momento de sua ocorrência, pois existem impactos ambientais seguintes da instalação dos aerogeradores, e impactos ambientais consequentes de sua operação.

As perturbações consecutivas ao processo de instalação das torres no espaço cedido ocorrerão devido à necessidade de retirada de vegetação do ponto de instalação e à necessidade de cumprir-se a técnica de terraplanagem da área. Neste projeto, ambos os procedimentos não afetarão drasticamente o local, visto que o mesmo já não possui grande concentração de vegetação e já passou pelo processo de terraplanagem previamente ao estudo.

Os efeitos resultantes da operação de sistemas de geração de energia elétrica a partir de grandes aerogeradores, além da emissão de ruídos, manifestam-se principalmente sobre o âmbito da avifauna. Parques eólicos de grande porte localizados em zonas de migração de aves podem provocar acidentes envolvendo a colisão destas aves com as torres, pás ou até com linhas de transmissão.

Felizmente, segundo informações obtidas do Relatório Anual de Rotas e Áreas de Concentração de Aves Migratórias no Brasil, 2016 apontam que o local está a uma distância considerável de locais importantes para rotas de aves migratórias. Essa situação está ilustrada na Figura, a seguir.

Figura 47 – Áreas de Importância para Aves Migratórias no Paraná



Fonte: ICMBIO MMA (2016)

Ao observar a figura acima, constata-se que o local de influência na avifauna migratória no estado do Paraná mais próximo à escola, localizada na cidade da Lapa, é o Parque Municipal Barigui, na cidade de Curitiba. A partir de informações disponibilizadas pelo software Google Maps, averiguou-se que a distância entre o Parque e a Empresa é de aproximadamente 59 km.

Segundo Tolmasquim (2004), a instalação de parques eólicos em locais fora de rotas típicas de imigração de pássaros migratórios não lhes produzem perturbações, em razão de sua tendência à alteração de rotas de voo em distâncias de 100 a 200 metros passando acima ou ao redor da turbina, ao passo de suas necessidades. Portanto, infere-se que o empreendimento terá um impacto muito pequeno sobre a avifauna do Paraná.

## 6 PROJETO DO SISTEMA HÍBRIDO

Os sistemas híbridos de energia elétrica deliberam a utilização de mais de uma fonte para geração e distribuição, otimizando o espaço e os custos de instalação e operação, a uma determinada carga conectada ou não a outras redes. A maior vantagem desse tipo de aplicação é a possibilidade de uma fonte suprir a falta temporária de outra, por conseguinte, costumam ser implantadas em locais afastados ou isolados da rede elétrica convencional para aumentar a confiabilidade do fornecimento e garantir os recursos energéticos.

Como a escola disponível para a presente aplicação fica localizada em área rural, optou-se por dimensionar um sistema híbrido a partir de fonte fotovoltaica e

eólica com o intuito de analisar se a união dos dois projetos seria mais viável economicamente e energeticamente. Portanto, julgou-se adequado para a comparação 1 aerogerador em união com 54 módulos fotovoltaicos, produzindo assim, o equivalente a média da geração avulsa representada na Tabela 14.

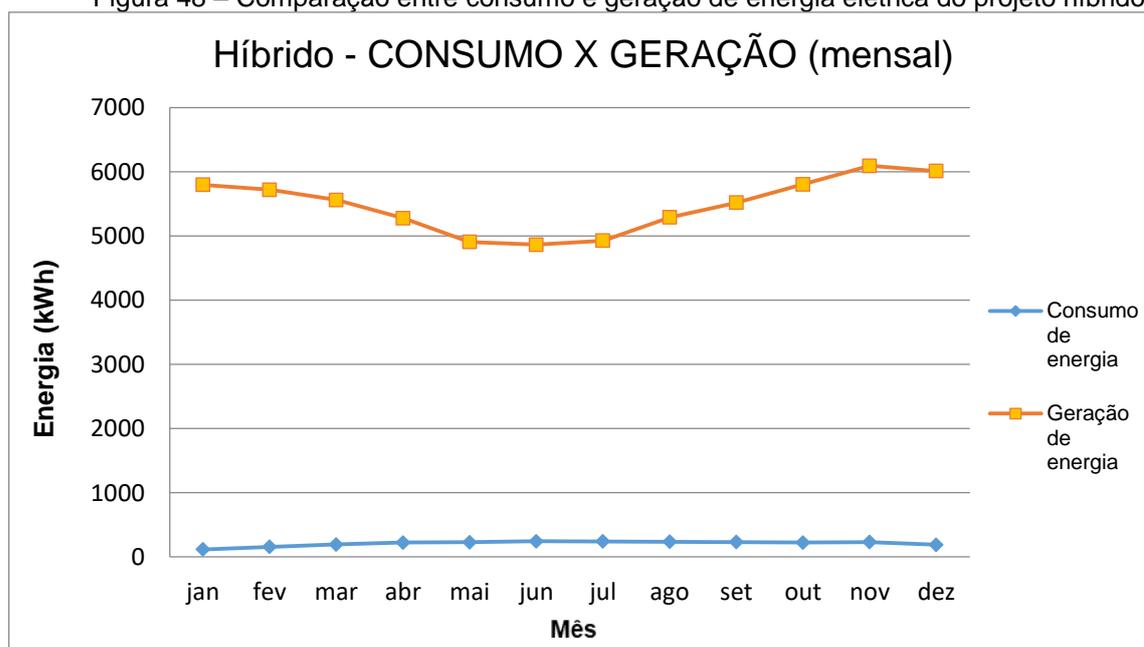
Tabela 14 – Estimativo de geração do projeto fotovoltaico na cidade da Lapa durante um ano

Mês	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Eólico (kWh/mês)	3482,87	3484,96	3487,19	3457,98	3489,83	3488,45	3459,2	3530,61	3529,22	3573,86	3614,83	3509,12
Fotovoltaico (kWh/mês)	2315,12	2235,78	2074,8	1820,89	1418,63	1376,57	1467,58	1760,1	1989,91	2231,96	2477,46	2503,06
Híbrido (kWh/mês)	5797,99	5720,74	5561,99	5278,87	4908,46	4865,02	4926,78	5290,71	5519,13	5805,82	6092,29	6012,18
kWh/ano	65779,98											

Fonte: Autoria própria (2018).

A partir da definição dos resultados do projeto híbrido durante um ano esquematizou-se o gráfico comparativo entre consumo e geração exemplificado na Figura 15.

Figura 48 – Comparação entre consumo e geração de energia elétrica do projeto híbrido

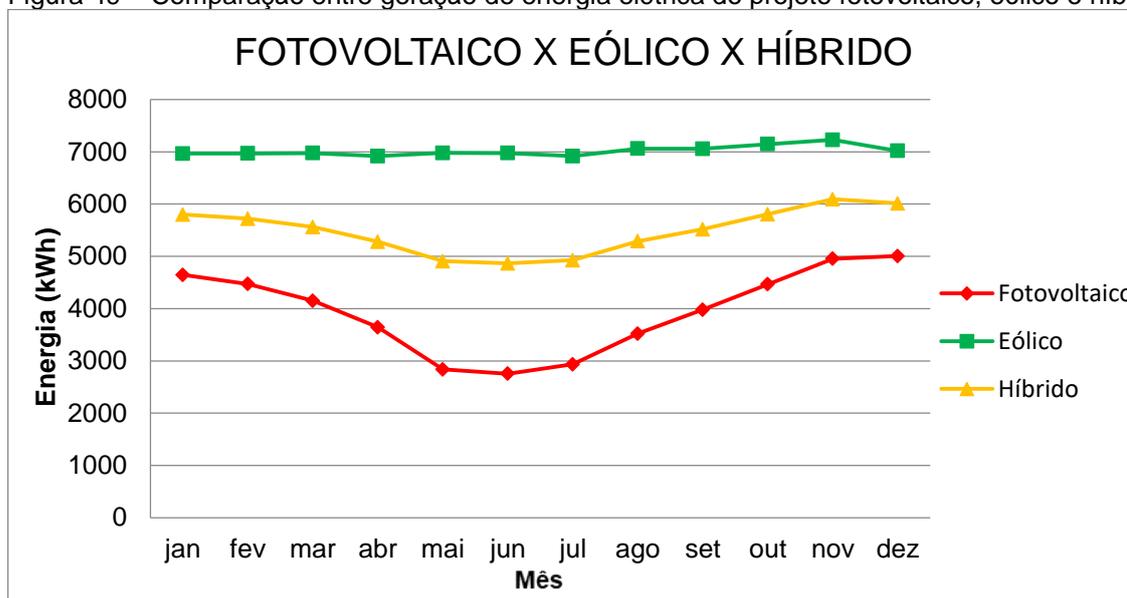


Fonte: Autoria própria (2018).

Pode-se concluir que atendendo as expectativas, o sistema geraria demasiadamente acima do necessário para suprir toda a demanda da escola, tendo uma variação menor nos meses de maio, junho e julho por conta do decaimento da geração fotovoltaica no inverno, entretanto não é significativa porque a produção eólica possui curva contínua em toda a extensão.

Finalmente foi possível elaborar um gráfico comparativo entre os três projetos propostos, onde visualiza-se que o sistema eólico proveria mais energia dada de forma contínua durante o ano, em contrapartida, o fotovoltaico seria o menos energético, com picos nos meses de verão e o híbrido disponibilizaria a soma entre a metade dos dois anteriores.

Figura 49 – Comparação entre geração de energia elétrica do projeto fotovoltaico, eólico e híbrido.



Fonte: Autoria própria (2018).

## 7 VIABILIDADE ECONÔMICA APLICADA

A projeção da viabilidade econômica do presente trabalho é fundamental para proporcionar as conclusões de qual das tecnologias será mais viável. Deve-se ressaltar que apenas o capital próprio foi ponderado nas análises.

### 7.1 RESULTADO DA ANÁLISE DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Previamente à análise dos fatores decisivos para concluir a viabilidade econômica do projeto fotovoltaico, realizou-se o levantamento de um orçamento

contemplando os equipamentos da proposta. Todos os custos e quantidades de materiais estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Custos dos componentes do projeto fotovoltaico

<b>Equipamento</b>	<b>Preço unitário</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Marca</b>	<b>Preço Parcial</b>
Módulo	R\$ 589,00	108	Canadian	R\$ 63.612,00
Inversor	R\$ 11.545,80	2	Refusol	R\$ 23.091,60
Estrutura	R\$ 63,00	108	-	R\$ 6.804,00
Instalação	R\$ 1.080,00	1	TECSUL Solar	R\$ 1.080,00
Cabo 4 mm <sup>2</sup>	R\$ 9,80	1	Sil Flexsil	R\$ 9,80
Cabo 16 mm <sup>2</sup>	R\$ 530,00	3	Ampére do Brasil	R\$ 1.590,00
Eletroduto	R\$ 5,74	100	Chroma	R\$ 575,25
Caixa de conexão	R\$ 343,84	1	Tigre	R\$ 343,84
DPS CC	R\$ 989,27	12	Schneider	R\$ 11.871,24
DPS CA	R\$ 136,44	2	Clamper	R\$ 272,88
Disjuntor CC	R\$ 319,00	6	Schneider	R\$ 1.914,00
Disjuntor CA	R\$ 54,12	2	Soprano	R\$ 108,24
Disjuntor geral	R\$ 115,90	1	Fame	R\$ 115,90
Fusível	R\$ 48,90	12	Suntree	R\$ 586,80
Medidor inteligente	R\$ 269,99	1	Forlong	R\$ 269,99
Total				R\$ 112.245,54

Fonte: Autoria própria (2018).

Com o orçamento total definido, foi possível estipular os dados essenciais para as projeções de valores futuros que estão na Tabela 16.

Tabela 16 – Fatores considerados para a análise econômica do sistema fotovoltaico

<b>Número de painéis</b>	<b>108</b>
<b>Reajuste tarifário a.a.</b>	<b>7,52%</b>
<b>TMA (SELIC) a.a.</b>	<b>6,65%</b>
<b>O&amp;M a.a.</b>	<b>1,00%</b>
<b>Investimento</b>	<b>R\$ 112.245,54</b>
<b>ICMS</b>	<b>25%</b>
<b>PIS/COFINS</b>	<b>9,3%</b>
<b>Queda de eficiência anual a.a.</b>	<b>0,8%</b>
<b>Tarifa de energia em 2018</b>	<b>0,53827</b>
<b>Depreciação econômica a.a.</b>	<b>4,00%</b>

Fonte: Autoria própria (2018).

A porcentagem de reajuste tarifário anual tem procedência a partir da média fornecida pela Copel Distribuição dos últimos 17 anos. Em seguida, estabeleceu-se a taxa de Atratividade Mínima (TMA) como 6,65%, para que se obtenha um retorno igual ou mais rentável que a taxa básica de juros brasileira (SELIC). Na sequência, os custos relacionados à operação e manutenção do sistema são o O&M com reajuste de 1% a cada ano e visto que o Paraná é um dos cinco estados do país que

ainda não aderiram à isenção do ICMS sobre a circulação de energia, esse imposto foi considerado nos cálculos. Foram calculados também, o PIS e o CONFINS, que são tributos incidentes sobre a receita e o faturamento da distribuidora, cobrados na tarifa de energia elétrica. A queda de eficiência anual, empregada nas contas, é informada pelo fabricante dos módulos solares e a tarifa de energia é estabelecida pela ANEEL, obtida no conjunto de informações providas pela distribuidora local.

Através desses dados aplicou-se a equação 26 para encontrar os valores de VPL, TIR e *payback*, e os resultados foram compilados na Tabela 17 abaixo.

Tabela 17 – Análise econômica do sistema fotovoltaico

Ano	Geração anual	Tarifa	Lucro líquido	Payback	Fluxo de caixa
0				-R\$ 112.245,54	-R\$ 112.245,54
1	47357,09614	0,53827	R\$ 19.878,63	-R\$ 87.877,09	R\$ 24.368,45
2	46978,23937	0,57875	R\$ 21.565,06	-R\$ 61.822,21	R\$ 26.054,88
3	46602,41345	0,62227	R\$ 23.364,43	-R\$ 33.967,96	R\$ 27.854,26
4	46229,59415	0,66906	R\$ 25.284,29	-R\$ 4.193,85	R\$ 29.774,11
5	45859,75739	0,71938	R\$ 27.332,65	R\$ 27.628,62	R\$ 31.822,47
6	45492,87933	0,77348	R\$ 29.518,09	R\$ 61.636,53	R\$ 34.007,91
7	45128,9363	0,83164	R\$ 31.849,73	R\$ 97.976,08	R\$ 36.339,55
8	44767,90481	0,89418	R\$ 34.337,32	R\$ 136.803,22	R\$ 38.827,14
9	44409,76157	0,96142	R\$ 36.991,26	R\$ 178.284,30	R\$ 41.481,08
10	44054,48348	1,03372	R\$ 39.822,62	R\$ 222.596,75	R\$ 44.312,45
11	43702,04761	1,11146	R\$ 42.843,24	R\$ 269.929,81	R\$ 47.333,07
12	43352,43123	1,19504	R\$ 46.065,73	R\$ 320.485,36	R\$ 50.555,55
13	43005,61178	1,28491	R\$ 49.503,52	R\$ 374.478,70	R\$ 53.993,34
14	42661,56688	1,38153	R\$ 53.170,98	R\$ 432.139,50	R\$ 57.660,80
15	42320,27435	1,48542	R\$ 33.991,80	R\$ 470.621,12	R\$ 38.481,62
16	41981,71215	1,59713	R\$ 61.257,10	R\$ 536.368,05	R\$ 65.746,92
17	41645,85846	1,71723	R\$ 65.709,50	R\$ 606.567,36	R\$ 70.199,32
18	41312,69159	1,84636	R\$ 70.459,15	R\$ 681.516,34	R\$ 74.948,97
19	40982,19006	1,98521	R\$ 75.525,87	R\$ 761.532,03	R\$ 80.015,69
20	40654,33254	2,13450	R\$ 80.930,78	R\$ 846.952,63	R\$ 85.420,60
21	40329,09788	2,29501	R\$ 86.696,40	R\$ 938.138,85	R\$ 91.186,22
22	40006,46509	2,46760	R\$ 92.846,78	R\$ 1.035.475,45	R\$ 97.336,60
23	39686,41337	2,65316	R\$ 99.407,53	R\$ 1.139.372,80	R\$ 103.897,35
24	39368,92207	2,85268	R\$ 106.406,01	R\$ 1.250.268,63	R\$ 110.895,83
25	39053,97069	3,06720	R\$ 113.871,36	R\$ 1.368.629,81	R\$ 118.361,18
				VPL	R\$ 462.390,28
				TIR	28%

Fonte: Autoria própria (2018).

Observa-se que com o projeto funcionando, até o quarto ano, o *payback* seria negativo, sendo que a partir do quinto os resultados são satisfatórios e permitem concluir que haveria retorno de investimento em cinco anos.

O VPL seria de R\$ 462.390,28, resposta satisfatória uma vez que um valor positivo era esperado. Igualmente, o TIR supriu as expectativas atingindo 21,35% acima do proposto na Tabela 16.

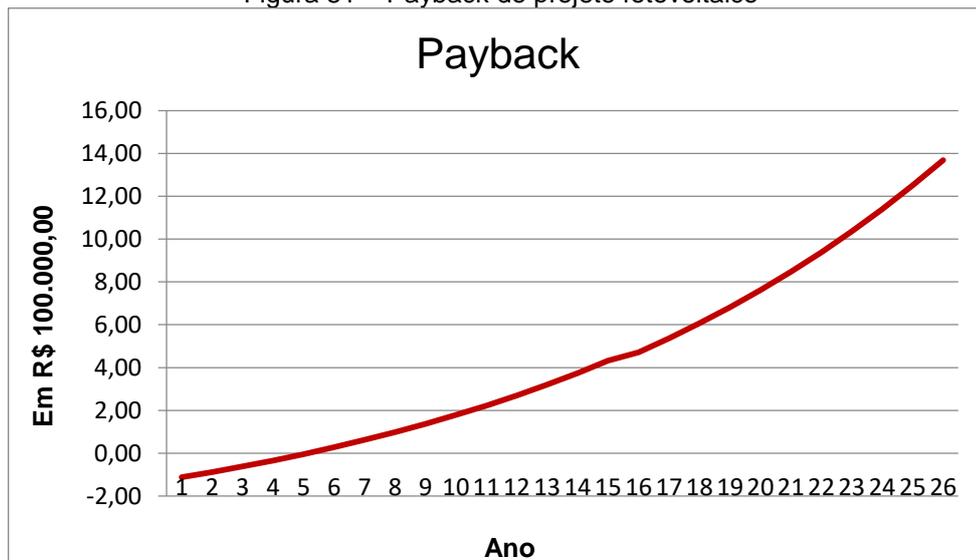
As Figuras 37 e 38 ilustram os gráficos do fluxo de caixa e *payback* respectivamente.

Figura 50 – Fluxo de caixa do projeto fotovoltaico



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 51 – Payback do projeto fotovoltaico



Fonte: Autoria própria (2018).

## 7.2 RESULTADO DA ANÁLISE DO SISTEMA EÓLICO

Inicia-se este processo de avaliação, estabelecendo os custos para os materiais e instrumentos estipulados para o projeto durante o dimensionamento.

Infelizmente, o acesso a uma grande parcela dos preços de diversos itens do empreendimento eólico foi impossibilitado devido à confidencialidade e omissão de referências por parte das empresas fabricantes, o que inviabilizou a elaboração de uma conjectura de despesas precisa para o sistema. Diversas solicitações de orçamento foram efetuadas em diferentes fornecedores, incluindo as empresas Eletrovento e Energia Pura, ambas do estado de São Paulo, porém não se obteve retorno.

Assim, duas referências distintas serviram de base para estimar o custo do projeto e a média entre os valores alcançados foi aplicada. A primeira designação, sugere um custo de R\$ 4,2 milhões por MW instalado (SOUZA, 2013). Já a fabricante *Bergey Windpower* sugere um custo entre U\$ 48.000,00 e U\$ 65.000,00 por turbina de 10 kW a ser instalada na realização do escopo. Abaixo, a Tabela expõe as características da análise do sistema eólico. Os resultados apresentados a seguir, exprimem as formas de investimento consideradas no estudo, similares às concebidas na geração fotovoltaica.

Tabela 18 – Fatores considerados para a análise econômica do sistema eólico

Número de aerogeradores	2
Reajuste tarifário a.a.	7,52%
TMA (SELIC) a.a.	6,65%
O&M a.a.	1,00%
Investimento	R\$ 332.986,00
ICMS	25%
PIS/COFINS	9,3%
Queda de eficiência anual a.a.	0,8%
Tarifa de energia em 2018	0,53827

Fonte: Autoria própria (2018).

Devido à baixa disponibilidade de informações, estimou-se proporções de O&M, de 1% do investimento inicial, reajustado ao longo dos anos, e de QUEDA DE EFICIÊNCIA ANUAL, de 0,8% ao ano. Os fatores de reajuste tarifário anual, taxa de Atratividade Mínima (TMA), PIS e CONFINS, e a tarifa de energia são iguais aos

encontrados para o projeto fotovoltaico, alterando-se apenas o valor de aplicação, igual a R\$ 332.986,00.

Este montante de investimento compreende todos os gastos do sistema. Contudo, bem como para o método solar, foram calculados separadamente os custos de itens com preços conhecidos, como cabeamento, que já estão inclusos no montante total mencionado anteriormente e são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Custos dos componentes do projeto fotovoltaico

Equipamento	Preço unitário	Quantidade	Marca	Preço Parcial
Cabo 10 mm <sup>2</sup>	R\$ 320,00	1	Ampére do Brasil	R\$ 320,00
Eletroduto 32 mm <sup>2</sup>	R\$ 36,16	2	Eletrorastro	R\$ 72,32
Disjuntor 32 A	R\$ 103,28	2	Schneider	R\$ 206,56
Disjuntor geral	R\$ 115,90	1	Fame	R\$ 115,90
Medidor inteligente	R\$ 269,99	1	Forlong	R\$ 269,99
Total				R\$ 984,77

Fonte: Autoria própria (2018).

Através dos dados da Tabela 20 aplicou-se a equação 26 para encontrar os valores de VPL, TIR e payback, e os resultados foram compilados na Tabela , abaixo.

Tabela 20 – Análise econômica do sistema eólico

Ano	Geração anual	Tarifa	Lucro líquido	Payback	Fluxo de caixa
0				-R\$ 332.986,00	-R\$ 332.986,00
1	84216,248	0,53827	R\$ 28.681,78	-R\$ 290.984,78	R\$ 42.001,22
2	83542,51802	0,57875	R\$ 31.716,20	-R\$ 245.949,14	R\$ 45.035,64
3	82874,17787	0,62227	R\$ 34.957,89	-R\$ 197.671,81	R\$ 48.277,33
4	82211,18445	0,66906	R\$ 38.420,89	-R\$ 145.931,48	R\$ 51.740,33
5	81553,49497	0,71938	R\$ 42.120,21	-R\$ 90.491,83	R\$ 55.439,65
6	80901,06701	0,77348	R\$ 46.071,86	-R\$ 31.100,53	R\$ 59.391,30
7	80253,85848	0,83164	R\$ 50.292,92	R\$ 32.511,83	R\$ 63.612,36
8	79611,82761	0,89418	R\$ 54.801,66	R\$ 100.632,93	R\$ 68.121,10
9	78974,93299	0,96142	R\$ 59.617,56	R\$ 173.569,92	R\$ 72.937,00
10	78343,13352	1,03372	R\$ 64.761,42	R\$ 251.650,78	R\$ 78.080,86
11	77716,38846	1,11146	R\$ 70.255,47	R\$ 335.225,69	R\$ 83.574,91
12	77094,65735	1,19504	R\$ 76.123,42	R\$ 424.668,56	R\$ 89.442,86
13	76477,90009	1,28491	R\$ 82.390,60	R\$ 520.378,60	R\$ 95.710,04
14	75866,07689	1,38153	R\$ 89.084,05	R\$ 622.782,09	R\$ 102.403,49
15	75259,14827	1,48542	R\$ 96.232,62	R\$ 732.334,15	R\$ 109.552,06
16	74657,07509	1,59713	R\$ 103.867,16	R\$ 849.520,75	R\$ 117.186,60
17	74059,81849	1,71723	R\$ 112.020,56	R\$ 974.860,74	R\$ 125.340,00
18	73467,33994	1,84636	R\$ 120.727,95	R\$ 1.108.908,14	R\$ 134.047,39
19	72879,60122	1,98521	R\$ 130.026,86	R\$ 1.252.254,44	R\$ 143.346,30
20	72296,56441	2,13450	R\$ 139.957,34	R\$ 1.405.531,21	R\$ 153.276,78
				VPL	R\$ 486.956,91
				TIR	18%

Fonte: Autoria própria (2018).

Observa-se que até o sexto ano de operação, o payback permanece negativo, com valores favoráveis apenas a partir do sétimo ano. Ou seja, o retorno financeiro decorre a partir de sete anos.

De acordo com os fatores estabelecidos, esperava-se um valor positivo de VPL, então, a soma de R\$ 486.956,91 encontrada é qualificada como satisfatória. O TIR supriu as expectativas atingindo 18% acima do proposto na Tabela 18.

Figura 52 – Gráfico de fluxo de caixa do projeto eólico



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 53 – Gráfico de payback do projeto eólico



Fonte: Autoria própria (2018).

### 7.3 RESULTADO DA ANÁLISE DO SISTEMA HÍBRIDO

Como nas projeções econômicas dos sistemas separados, houve a necessidade de estipular o orçamento total da geração híbrida. De modo que os valores da Tabela 15 foram consultados para chegar ao custo de R\$ 57.320,16 na parte fotovoltaica e os mesmo critérios da viabilidade econômica eólica foram aplicados, porém alterando a quantidade de geradores para concluir que o preço da outra fonte de geração seria de R\$ 166.493,00. Finalmente, obteve-se que o valor total da junção seria de R\$ 223.813,16.

A análise da viabilidade teve continuidade com a aplicação dos fatores da Tabela 20 abaixo nos conceitos de VPL, TIR e *payback* e a utilização da equação 1.

Tabela 21 – Fatores considerados para a análise econômica do sistema híbrido

Número de aerogeradores	2
Número de painéis	54
Reajuste tarifário a.a.	7,52%
TMA (SELIC) a.a.	6,65%
O&M a.a.	1,00%
Investimento	R\$ 223.813,16
ICMS	25%
PIS/COFINS	9,3%
Queda de eficiência anual a.a.	0,8%
Tarifa de energia em 2018	0,53827

Fonte: Autoria própria (2018).

Tais resultados foram exemplificados na Tabela 21 a seguir. Através dos resultados, é possível concluir que com a simulação do projeto ativo durante um ano, seria possível reparar o valor investido com um *payback* de 6 anos. Já o VPL foi estimado em R\$ 577.642,85 e o TIR satisfatoriamente chegou a 21%.

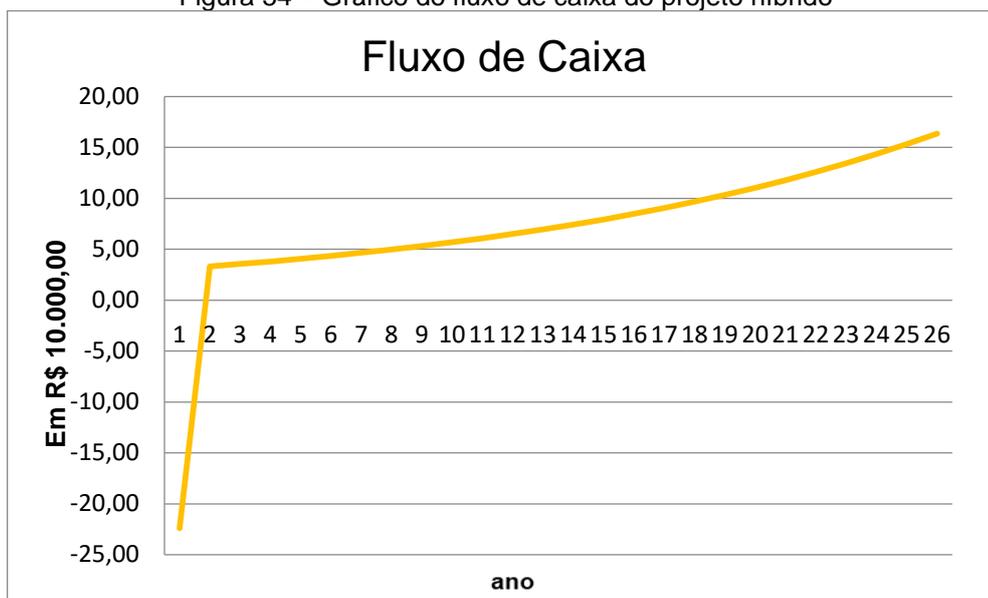
As Figuras 41 e 42 representam graficamente a síntese dos resultados de fluxo de caixa e *payback*.

Tabela 22 – Análise econômica do sistema híbrido

Ano	Geração anual	Tarifa	Lucro líquido	Payback	Fluxo de caixa
0				-R\$ 223.813,16	-R\$ 223.813,16
1	65779,98045	0,53827	R\$ 24.216,73	-R\$ 190.643,90	R\$ 33.169,26
2	65253,7406	0,57875	R\$ 26.552,43	-R\$ 155.138,95	R\$ 35.504,95
3	64731,71068	0,62227	R\$ 29.044,94	-R\$ 117.141,48	R\$ 37.997,47
4	64213,85699	0,66906	R\$ 31.704,73	-R\$ 76.484,22	R\$ 40.657,26
5	63700,14614	0,71938	R\$ 34.542,95	-R\$ 32.988,74	R\$ 43.495,48
6	63190,54497	0,77348	R\$ 37.571,50	R\$ 13.535,28	R\$ 46.524,03
7	62685,02061	0,83164	R\$ 40.803,06	R\$ 63.290,87	R\$ 49.755,59
8	62183,54044	0,89418	R\$ 44.251,17	R\$ 116.494,57	R\$ 53.203,70
9	61686,07212	0,96142	R\$ 47.930,27	R\$ 173.377,37	R\$ 56.882,79
10	61192,58354	1,03372	R\$ 51.855,74	R\$ 234.185,63	R\$ 60.808,27
11	60703,04287	1,11146	R\$ 56.044,02	R\$ 299.182,18	R\$ 64.996,54
12	60217,41853	1,19504	R\$ 60.512,61	R\$ 368.647,31	R\$ 69.465,14
13	59735,67918	1,28491	R\$ 65.280,20	R\$ 442.880,04	R\$ 74.232,73
14	59257,79375	1,38153	R\$ 70.366,72	R\$ 522.199,29	R\$ 79.319,25
15	58783,7314	1,48542	R\$ 75.793,43	R\$ 606.945,25	R\$ 84.745,95
16	58313,46155	1,59713	R\$ 81.582,98	R\$ 697.480,76	R\$ 90.535,51
17	57846,95386	1,71723	R\$ 87.759,57	R\$ 794.192,85	R\$ 96.712,09
18	57384,17823	1,84636	R\$ 94.348,97	R\$ 897.494,35	R\$ 103.301,50
19	56925,1048	1,98521	R\$ 101.378,71	R\$ 1.007.825,59	R\$ 110.331,24
20	56469,70396	2,13450	R\$ 108.878,12	R\$ 1.125.656,23	R\$ 117.830,64
21	56017,94633	2,29501	R\$ 116.878,48	R\$ 1.251.487,24	R\$ 125.831,01
22	55569,80276	2,46760	R\$ 125.413,20	R\$ 1.385.852,96	R\$ 134.365,72
23	55125,24434	2,65316	R\$ 134.517,85	R\$ 1.529.323,34	R\$ 143.470,38
24	54684,24238	2,85268	R\$ 144.230,42	R\$ 1.682.506,28	R\$ 153.182,95
25	54246,76844	3,06720	R\$ 144.230,42	R\$ 1.682.506,28	R\$ 153.182,95
				VPL	R\$ 577.642,85
				TIR	21%

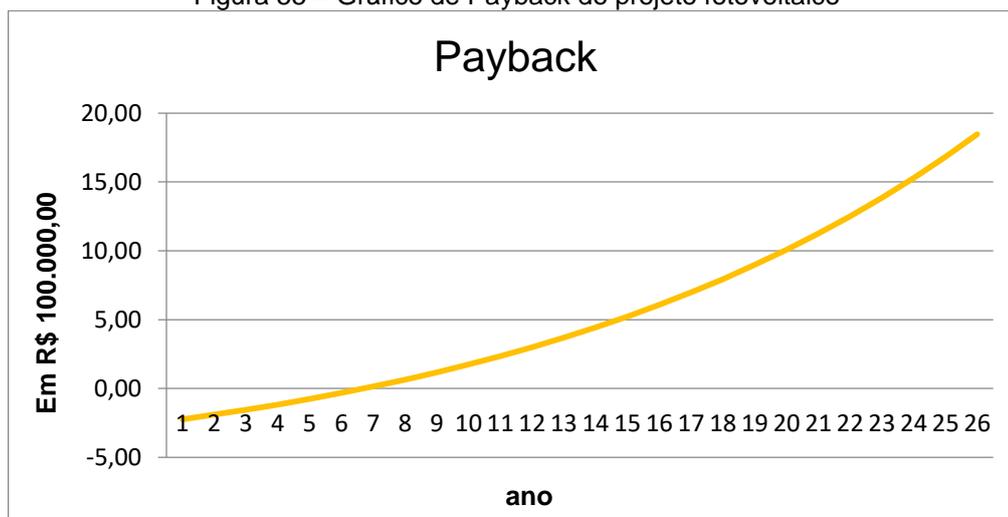
Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 54 – Gráfico do fluxo de caixa do projeto híbrido



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 55 – Gráfico de Payback do projeto fotovoltaico



Fonte: Autoria própria (2018).

## CONCLUSÃO

O consumo exacerbado de energia, associado à esfera que engloba sua criação e fornecimento, está diretamente relacionado à emissão de gases do aquecimento global. Com a pressão de organizações internacionais para a redução de ejeções de gases poluentes na atmosfera, visando estabilizar a queda de temperatura do planeta, o Brasil comprometeu-se, no acordo de Paris, à diminuir suas próprias emissões. Mesmo que insignificantes quando comparadas às outras potências mundiais, as providências governamentais brasileiras para honrar este compromisso, concentram-se no estímulo da aplicação de energias limpas e sustentáveis para produção de energia.

Este documento relata o estudo e projeto de dimensionamento de sistemas de geração distribuída, numa escola pública municipal na cidade da Lapa no Paraná. Respeitando o modesto incentivo público para o emprego de energias provenientes de origens favoráveis ao meio ambiente para essa categoria de tecnologia, as fontes escolhidas para esta elaboração foram a solar fotovoltaica e a eólica. Vale ressaltar que deliberou-se por dimensionar os empreendimentos contemplando toda a capacidade produtiva do local, valorizando seu potencial energético. Apesar do estereótipo climático da região, conhecido por bruscas variações no tempo, baixas temperaturas em relação ao resto do país e médias de velocidade de vento modestas, este artigo analisa a praticabilidade da inauguração dessas engenharias nas propriedades do educandário, incluindo o aspecto econômico. Por fim, um sistema híbrido foi simulado para que mais uma proposição fosse integrada à seleção do melhor método a ser implantado, compreendendo a proposta mais eficaz econômica e energeticamente.

Durante o desenvolvimento do trabalho, ficou evidente, a ingente desigualdade entre literaturas que abordam as técnicas escolhidas. Diversos autores abrangem a fonte solar, enquanto a fonte eólica carece de informações para o desdobramento de projetos. Esta condição reflete-se imediatamente no mercado: as inovações do setor solar são mais acessíveis, e ostentam maior leque de ofertas. Mesmo com o empecilho da escassez de referência do método eólico, ambos os sistemas foram concebidos.

Conforme os resultados da pesquisa de viabilidade econômica realizada, as três opções apresentadas revelaram-se investimentos de perfil vantajoso, todas supririam com sobra o consumo da escola, permitindo que a conta de energia fosse zerada. Tratando-se de uma instituição de ensino da prefeitura da cidade, a energia produzida, que excede o montante consumido pela escola, poderia ser redistribuída entre outras escolas, que somam mais de 40 unidades nas proximidades, e também entre outras edificações públicas, no período de férias escolares, quando a geração atinge valores prósperos. Além disso, as métricas de Payback, TIR e VPA são promissoras, acima da média. Para o projeto fotovoltaico, a partir do quinto ano, os resultados são satisfatórios com VPL de R\$ 462.390,28 e TIR atingindo 21,35%. O retorno do investimento eólico emerge em sete anos, o VPL seria de R\$ 486.956,91, o TIR supriu as expectativas atingindo 18%. Para a opção híbrida, tem-se um payback de 6 anos, já o VPL foi estimado em R\$ 577.642,85 e o TIR satisfatoriamente chegou a 21%.

É importante destacar que, mesmo com a comprovação da exequibilidade do propósito pela análise econômica, as incitações do governo não são atrativas o suficiente para que o aproveitamento dessas tecnologias tenha avanço apreciável. O investimento nesses desenvolvimentos de engenharia energética ainda é muito elevado, financiamentos com taxas mais atrativas aumentaria o número de novos consumidores dessa modernização e o tempo de payback seria reduzido caso isentasse-se tributos sobre a geração excedente.

Avaliando todos os casos, a alternativa eleita fora a solar fotovoltaica isoladamente, uma vez que esta obteve melhores resultados de VPL, payback e TIR, além de manifestar o menor preço de investimento entre as três. A etapa de instalação no sistema eólico é o fator que mais sobrecarrega o seu custo de projeto, visto que as torres são exuberantemente grandes e os recursos necessários para auxílio de suas instalações são muito maiores que para o quadro solar. Mesmo no projeto híbrido, a instalação das torres com os aerogeradores recai sobre o orçamento. No Brasil, a capacidade instalada da geração fotovoltaica é aproximadamente 45 vezes maior que a eólica, como descrito na Tabela 1, o que facilita o acesso à equipagem dessa inovação tecnológica e favorece a instalação fotovoltaica na área viabilizada.

Como conclusão, incentiva-se uma continuação deste estudo, considerando sua inserção, operação e duração de vida útil. No campo da Engenharia Civil, uma investigação sobre a fundação da escola e das medidas necessárias a serem tomadas para que o edifício suporte o peso das placas e de toda a instalação e no ramo da Engenharia Química, é essencial um aprofundamento no quesito residual que este projeto trará no momento de troca das placas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, **Norma Brasileira - Instalações Elétricas de Baixa Tensão NBR 5410:2004 versão corrigida**, 2008.

ARAÚJO, Felipe de Oliveira. **Análise de Viabilidade Técnica e Econômica para Instalações Fotovoltaicas para Consumidores do Grupo B**. Campo Grande, 2017.

ALVES, Guilherme Henrique. **Projeto e Análise da Viabilidade Econômica da Instalação de Painéis Fotovoltaicos no Setor Industrial**. São Carlos, 2016.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica**. 2. ed. Brasília. 2016.

AMERICANAS. **Loja Virtual**. 2018. Disponível em: <[https://www.americanas.com.br/produto/24036686?pfm\\_carac=Kit%20Tubo%20Eletrudo%20Pvc%203%2F4x3m%20Chroma%20C%2F10%20-%20Com%2010%20Unidades&pfm\\_index=0&pfm\\_page=search&pfm\\_pos=grid&pfm\\_type=search\\_page%20](https://www.americanas.com.br/produto/24036686?pfm_carac=Kit%20Tubo%20Eletrudo%20Pvc%203%2F4x3m%20Chroma%20C%2F10%20-%20Com%2010%20Unidades&pfm_index=0&pfm_page=search&pfm_pos=grid&pfm_type=search_page%20)>. Acesso em: 06/11/2018.>. Acesso em: 09/11/2018.

AMERICANAS. **Loja Virtual**. 2018. Disponível em: <[https://www.americanas.com.br/produto/20745143/medidor-wattimetro-de-consumo-trifasico-100a-100-amperes-bivolt-220v-380v-240v-400v-volts?WT.srch=1&epar=bp\\_pl\\_00\\_go\\_pla\\_casaconst\\_geral\\_gmv&gclid=CjwKCAiAt4rfBRBKEiwAC678KUxPbQ2gdr2X68wuF5ULOHB8GPZa1SBWicjWyAMUNuvUjv4OtYGp-RoCxhsQAvD\\_BwE&opn=YSMESP&sellerId=22820775000146](https://www.americanas.com.br/produto/20745143/medidor-wattimetro-de-consumo-trifasico-100a-100-amperes-bivolt-220v-380v-240v-400v-volts?WT.srch=1&epar=bp_pl_00_go_pla_casaconst_geral_gmv&gclid=CjwKCAiAt4rfBRBKEiwAC678KUxPbQ2gdr2X68wuF5ULOHB8GPZa1SBWicjWyAMUNuvUjv4OtYGp-RoCxhsQAvD_BwE&opn=YSMESP&sellerId=22820775000146)>. Acesso em: 15/11/2018.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Histórico das Taxas de Juros**. 2018. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/Pec/Copom/Port/taxaSelic.asp#notas>>. Acesso em: 12/11/2018.

CRESEB, CEPEL, **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro. Março, 2014.

CUSTÓDIO, R. S.; **Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica**; Rio de Janeiro, Eletrobrás, 2009.

COPEL. **Tributos.** 2018. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F3EE1D015FA3F433203257EE6003E128E>>. Acesso em: 12/11/2018.

COPEL. **Alterações Tarifárias.** 2018. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a1032571000064b22e%2F04afb43850ca33c503257488005939b7>>. Acesso em: 12/11/2018.

COPEL. **Taxas e Tarifárias.** 2018. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Ftarifas%2Fpagcopel2.nsf%2Fverdocatual%2F23BF37E67261209C03257488005939EB>>. Acesso em: 13/11/2018.

DE OLIVEIRA, L. M. **Projeto Básico de um Parque Eólico e Estudos de Conexão**, 2014;

DE SOUZA, R. S. **Estudo de Viabilidade de Implantação de Geração Distribuída com Sistema Eólico para a Ponte Anita Garibaldi em Laguna**. SC, 2016

DE SOUZA, T. C. R. **Dimensionamento Técnico e Avaliação Econômica da Microgeração Solar – Estudo de Caso: Novo Prédio de Engenharia Elétrica**. 2013.

DALCIONE, Marcos de Oliveira, SANTOS, Erika Helen, SILIDONIO, Luiz Carlos Junior. **Implantação de um sistema de energia solar residencial Grid Tie**. Fundação Universitária Vida Cristã, p. 8-26, 2015.

ENERGIA LIVRE. **Loja Virtual.** 2018. Disponível em: <<https://lojaenergialivre.commercesuite.com.br/materiais-eletricos/dps>>. Acesso em: 06/11/2018.

FILHO, W. P. B.; DE AZEVEDO, A. C. S. **Impactos Ambientais em Usinas Eólicas**.

HUGO, Lima Moreira, BASTOS, Augusto Mendes, SANTOS, Romualdo Barbosa. **Análise Comparativa da Viabilidade Econômica de Sistemas Fotovoltaicos e Eólicos Para Microgeração de Energia Elétrica**. Gramado, 2018.

JWT BRASIL. **Loja Virtual**. 2018. Disponível em: <<https://jwtbrasil.com.br/produto/6466/disjuntor-tripolar-30a-preto-soprano>>. Acesso em: 06/11/2018.

LORA, E.E.S.; HADDAD, J. (coord.). **Geração distribuída: aspectos tecnológicos, ambientais e institucionais**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

LOJA ELÉTRICA. **Loja Virtual**. 2018. Disponível em: <<http://www.lojaeletrica.com.br/protetor-dps-275v-12560ka-vcl-slim-5137-clamper,product,2410603610489,dept,0.aspx>>. Acesso em: 06/11/2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional**. 2017

MOREIRA, J. R. S.; Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

MILLER, Francisco Mateus. **Estudo da Geração Heliotérmica Aplicada às Condições do Recurso Solar Brasileiro**. 2017. Disponível em: <[http://designconsulti.com.br/wp-content/uploads/2017/08/Francisco-Mateus-Miller-IV-Dia-da-Heliotermica-Petrobras-ago\\_2017-1.pdf](http://designconsulti.com.br/wp-content/uploads/2017/08/Francisco-Mateus-Miller-IV-Dia-da-Heliotermica-Petrobras-ago_2017-1.pdf)>. Acesso em: 16/08/2018.

MINHA CASA SOLAR. **Loja Virtual**. 2018. Disponível em: <<https://www.minhacasasolar.com.br/produto/painel-solar-295w-monocristalino-canadian-solar-cs6k-295ms-79314>>. Acesso em: 18/08/2018.

MERCADO LIVRE. **Loja Virtual**. 2018. Disponível em: <[https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1000083857-4-suportes-p-paineis-solares-p-telha-cermica-e-cimento-\\_JM?quantity=1](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1000083857-4-suportes-p-paineis-solares-p-telha-cermica-e-cimento-_JM?quantity=1)>. Acesso em: 07/11/2018.

MERCADO LIVRE. **Loja Virtual.** 2018. Disponível em: <[https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1103755901-100-metros-de-cabo-160mm-marca-ampere-do-brasil-\\_JM?quantity=1](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1103755901-100-metros-de-cabo-160mm-marca-ampere-do-brasil-_JM?quantity=1)>. Acesso em: 13/11/2018.

MERCADO LIVRE. **Loja Virtual.** 2018. Disponível em: <[https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1094282082-disjuntor-nema-tripolar-60a-fnh-fame-\\_JM?quantity=1](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1094282082-disjuntor-nema-tripolar-60a-fnh-fame-_JM?quantity=1)>. Acesso em: 06/11/2018.

MERCADO LIVRE. **Loja Virtual.** 2018. Disponível em: <[https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-807931361-quadro-distribuico-embutir-com-barramento-2736-disjuntores-\\_JM?quantity=1](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-807931361-quadro-distribuico-embutir-com-barramento-2736-disjuntores-_JM?quantity=1)>. Acesso em: 07/11/2018.

POWER TECHNOLOGY. **The Maricopa Solar Plant Project, USA.** 2018. Disponível em: <<https://www.power-technology.com/projects/maricopasolarplantar/>>. Acesso em: 15/08/2018.

TORRESOL ENERGY. **Gemasolar es la primera planta a escala comercial en el mundo en aplicar la tecnología de receptor de torre central y almacenamiento térmico con un único fluido térmico (sales fundidas).** 2018. Disponível em: <<http://torresolenergy.com/gemasolar/>>. Acesso em: 15/08/2018.

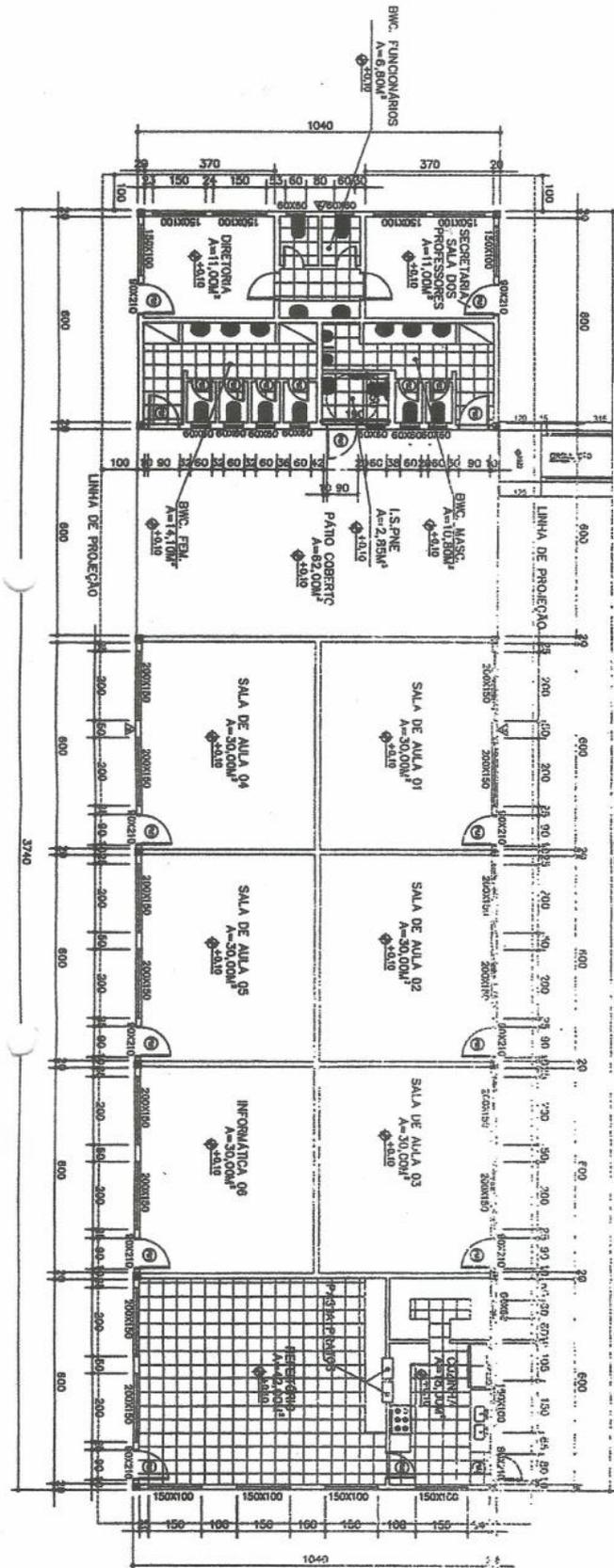
VILLASANTE, Cristóbal. **Tecnologías Solares Termoeléctricas.** 2018. Disponível em: <<http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/termoelectrica/revision/revision.html>>. Acesso em: 15/08/2018.

MILLER, Francisco Mateus. **Estudo da Geração Heliotérmica Aplicada às Condições do Recurso Solar Brasileiro.** 2017. Disponível em: <[http://designconsulti.com.br/wp-content/uploads/2017/08/Francisco-Mateus-Miller-IV-Dia-da-Heliotermica-Petrobras-ago\\_2017-1.pdf](http://designconsulti.com.br/wp-content/uploads/2017/08/Francisco-Mateus-Miller-IV-Dia-da-Heliotermica-Petrobras-ago_2017-1.pdf)>. Acesso em: 16/08/2018.

NEO SOLAR. **Loja Virtual.** 2018. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/disjuntor-schneider-1000dc-15a-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 03/11/2018.

TAVARES, E. **Energia Eólica: Viabilidade Técnica e Econômico – Financeira**, 2016.

# ANEXO A – Planta baixa da escola



## ANEXO B – Catálogo do módulo fotovoltaico



### CS6K-260 | 265 | 270 | 275P

Canadian Solar's modules use the latest innovative cell technology, increasing module power output and system reliability, ensured by 15 years of experience in module manufacturing, well-engineered module design, stringent BOM quality testing, an automated manufacturing process and 100% EL testing.



\*Black frame product can be provided upon request.

#### KEY FEATURES

-  Excellent module efficiency of up to 16.80 %
-  High PTC rating of up to 91.89 %
-  Outstanding low irradiance performance of up to 96.5 %
-  IP67 junction box for long-term weather endurance
-  Heavy snow load up to 6000 Pa, wind load up to 4000 Pa \*

**25 years** linear power output warranty

**10 years** product warranty on materials and workmanship

#### MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATES\*

ISO 9001:2008 / Quality management system  
 ISO 14001:2004 / Standards for environmental management system  
 OHSAS 18001:2007 / International standards for occupational health & safety

#### PRODUCT CERTIFICATES\*

IEC 61215 / IEC 61730: VDE / TÜV-Rheinland / CE / MCS / CEC AU / INMETRO / CQC  
 UL 1703 / IEC 61215 performance: CEC listed (US) / FSEC (US Florida)  
 UL 1703: CSA / IEC 61701 ED2: VDE / IEC 62716: VDE  
 UNI 9177 Reaction to Fire: Class 1  
 IEC 60068-2-68: SGS  
 Take-e-way



\* As there are different certification requirements in different markets, please contact your local Canadian Solar sales representative for the specific certificates applicable to the products in the region in which the products are to be used.

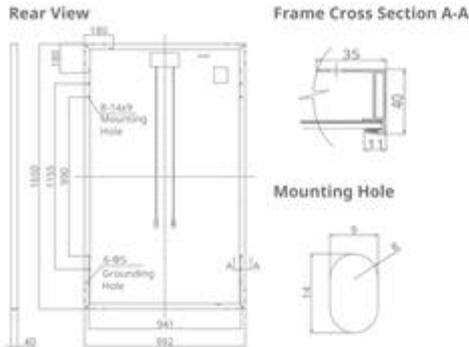
**CANADIAN SOLAR INC.** is committed to providing high quality solar products, solar system solutions and services to customers around the world. As a leading PV project developer and manufacturer of solar modules with over 17 GW deployed around the world since 2001, Canadian Solar Inc. (NASDAQ: CSIQ) is one of the most bankable solar companies worldwide.

\*For detail information, please refer to Installation Manual.

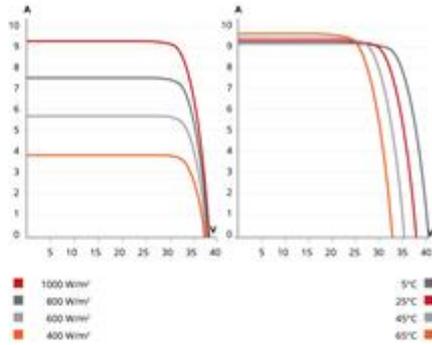
#### CANADIAN SOLAR INC.

545 Speedvale Avenue West, Guelph, Ontario N1K 1E6, Canada, [www.canadiansolar.com](http://www.canadiansolar.com), [support@canadiansolar.com](mailto:support@canadiansolar.com)

### ENGINEERING DRAWING (mm)



### CS6K-270P / I-V CURVES



### ELECTRICAL DATA | STC\*

CS6K	260P	265P	270P	275P
Nominal Max. Power (Pmax)	260 W	265 W	270 W	275 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	30.4 V	30.6 V	30.8 V	31.0 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.56 A	8.66 A	8.75 A	8.88 A
Open Circuit Voltage (Voc)	37.5 V	37.7 V	37.9 V	38.0 V
Short Circuit Current (Isc)	9.12 A	9.23 A	9.32 A	9.45 A
Module Efficiency	15.88%	16.19%	16.50%	16.80%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C			
Max. System Voltage	1000 V (IEC) or 1000 V (UL)			
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)			
Max. Series Fuse Rating	15 A			
Application Classification	Class A			
Power Tolerance	0 ~ + 5 W			

\* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

### MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Poly-crystalline, 6 inch
Cell Arrangement	60 (6×10)
Dimensions	1650×992×40 mm (65.0×39.1×1.57 in)
Weight	18.2 kg (40.1 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame Material	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP67, 3 diodes
Cable	4 mm² (IEC) or 4 mm² & 12 AWG 1000 V (UL), 1000 mm (39.4 in)
Connector	T4 series or PV2 series
Per Pallet	26 pieces, 520 kg (1146.4 lbs)
Per container (40' HQ)	728 pieces

### ELECTRICAL DATA | NOCT\*

CS6K	260P	265P	270P	275P
Nominal Max. Power (Pmax)	189 W	192 W	196 W	199 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	27.7 V	27.9 V	28.1 V	28.3 V
Opt. Operating Current (Imp)	6.80 A	6.88 A	6.97 A	7.05 A
Open Circuit Voltage (Voc)	34.5 V	34.7 V	34.8 V	34.9 V
Short Circuit Current (Isc)	7.39 A	7.48 A	7.55 A	7.66 A

\* Under Nominal Operating Cell Temperature (NOCT), irradiance of 800 W/m², spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

### TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.41 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.31 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.053 % / °C
Nominal Operating Cell Temperature	45±2 °C

### PERFORMANCE AT LOW IRRADIANCE

Outstanding performance at low irradiance, with an average relative efficiency of 96.5 % from irradiances, between 1000 W/m² and 200 W/m² (AM 1.5, 25°C).

The specification and key features described in this datasheet may deviate slightly and are not guaranteed. Due to on-going innovation, research and product enhancement, Canadian Solar Inc. reserves the right to make any adjustment to the information described herein at any time without notice. Please always obtain the most recent version of the datasheet which shall be duly incorporated into the binding contract made by the parties governing all transactions related to the purchase and sale of the products described herein.

Caution: For professional use only. The installation and handling of PV modules requires professional skills and should only be performed by qualified professionals. Please read the safety and installation instructions before using the modules.

### PARTNER SECTION



## ANEXO C – Catálogo do inversor fotovoltaico

Technical datasheet



### REFU sol/ 008K-020K

For medium-sized to megawatt installations



- Lightweight & compact
- Highest efficiency (98.2%)
- Easy installation
- Outdoor (IP65)
- Maintenance free

The three-phase string inverters in the 8.25 to 20 kW power classes are perfect for rooftop systems from 8 kW upwards, right through to megawatt parks. They comply with all requirements for IP65 protection – their housing provides reliable protection from dust and water, including high pressure washing. These systems can therefore be installed out in the open without any problem. All five string inverters are **easy to handle and compact**. For example, they can be installed on an area smaller than three A4 pages laid side by side. Operation and monitoring are easy, further facilitated by the graphic display, the integrated RS485 interface and an Ethernet connection.

Fast MPP tracking and a wide input voltage range also ensure the high levels of efficiency that are typical in REFU sol systems. Even at low irradiation, the three-phase inverters

achieve an **efficiency of up to 98.2%**. As a result of these high efficiency levels convection cooling is all that's needed to dissipate the heat. Thanks to the low voltage fluctuations against earth, the transformerless devices can also be used for many thin-film modules.

The integrated data-logger can send all important operating data to the REFU log internet portal. For visualization and evaluation purposes, data can be transferred via the standard cable or an optional wireless connection using the new REFU connect radio module. Comprehensive information on operating conditions and the productivity of your plant is available at any time.

TECHNICAL DATA	REFU <sub>sol</sub> 008K	REFU <sub>sol</sub> 010K	REFU <sub>sol</sub> 013K	REFU <sub>sol</sub> 017K	REFU <sub>sol</sub> 020K
Item no.	803R008	803R010	808R013	808R017	808R020

#### DC DATA

Recommended max. PV power, kWp	9.9	12.0	15.6	20.4	24.0
MPPT range, V	370 ... 850	410 ... 850	430 ... 850	460 ... 850	490 ... 850
DC start voltage, V	350				
Max. DC voltage, V	1000				
Max. DC current, A	23.0	25.0	31.1	38.3	41.8
MPP tracker	1				
Number of DC connections	3 x MC4		4 x MC4	6 x MC4	
DC isolator	Yes				

#### AC DATA

Rated AC power, kW	8.25	10.0	13.0	17.0	20.0
Max. apparent power, kVA	8.25	10.0	13.0	17.0	20.0
AC power supply connection	L1, L2, L3, N, PE				
Rated power factor / range	1 / 0.8i ... 0.8c				
Rated voltage AC, V	400				
Voltage range AC, V	320 ... 460				
Rated frequency / frequency range, Hz	50, 60 / 45 ... 65				
Max. AC current, A	3 x 12	3 x 16	3 x 21	3 x 29	3 x 29,2
Max. distortion factor THD, %	2.5	1.8	2.5	1.8	
Max. efficiency, %	98.0			98.2	
European efficiency, %	97.3	97.4	97.5	97.8	
Feed-in starting at, W	50				
Internal consumption in night operation, W	< 0.5				

#### FEATURES

Cooling	Natural convection				
Ambient temperature, °C	-25 ... +55				
Relative ambient humidity, %	0 ... 100				
Site altitude, m	2000		4000*		
Noise level, dBA	< 45				
Internal overvoltage protection (EN 61643-11)	Type 3				
Protection class (IEC 62103)	I				
Overvoltage category (EN 60664-1)	DC: II, AC: III				
Environmental classifications IEC 721-3-4	4K4H				
Certificates	Current certificates can be found on our website				
Automatic disconnection	Acc. to VDE 0126-1-1				

#### GENERAL DATA

Interfaces	Ethernet, RS485, isolation and irradiation sensor				
Protection class (IEC 60529)	IP65				
Dimensions w x h x d, mm	535 x 601 x 225		535 x 601 x 277		
Weight, kg	28.5		32.2	38.4	

\*Observe derating of the DC voltage.

C:\Data\Tech\_EN-VT3-20140909

## ANEXO D – Catálogo do aerogerador

**TREBA**  
Wind technology

### **SPECIFICA TECNICA**



## **GENERATORE EOLICO 10 Kw** **Codice TREBA-0210**

Rev1 – 25/10/2013

---

TREBA Wind Technology  
Verona - Montegalda (Vi) Italy  
Tel. +390452021222 - Fax. +390452021222  
E-mail: trebawind@libero.it

1 / 19

## Sommario

DESCRIZIONE GENERALE .....	3
CARATTERISTICHE TECNICHE .....	4
CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEL GENERATORE.....	5
Generatore elettrico.....	7
Pale.....	8
Sistema per la gestione passo pale “Pitch” .....	8
Sistema per la gestione imbardata “Yaw”.....	8
Sistema di frenatura .....	8
Sensori per la gestione delle sicurezze.....	9
Sistema di raffreddamento; .....	9
TORRE DI SOSTEGNO AEROGENERATORE.....	10
PLC LOGICA PER LA GESTIONE ELETTRONICA .....	10
GRUPPO DI CONVERSIONE .....	11
ARMADIO ELETTRICO.....	12
CABLAGGIO ELETTRICO .....	13
MESSA A TERRA DEL SISTEMA .....	15
ACCESSO AL SITO PER L’INSTALLAZIONE E LA MANUTENZIONE .....	16
PLINTO DI FONDAZIONE DELLA TORRE .....	17
INDICI DI OCCUPAZIONE.....	17
LAYOUT: TURBINA EOLICA 10 Kw .....	18
CURVA POTENZA/VELOCITA’ DEL VENTO: TURBINA EOLICA 10 Kw .....	19

## DESCRIZIONE GENERALE

---

Il presente documento definisce la descrizione tecnica per la fornitura di un impianto per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile eolica con potenza nominale da 10 Kw. L'impianto così descritto può essere collegata alla rete elettrica in modo conforme seguendo tutti i requisiti normativi richiesti. Le prestazioni, grazie anche alle innovazioni apportate all'impianto, sono assicurate anche nei periodi problematici di stress meccanico dovuti a condizioni climatiche non adatte (forte vento, pioggia, neve ecc...).

Mediante un sistema di telecontrollo è possibile monitorare e interagire costantemente con l'aerogeneratore. L'evoluzione delle tecnologie applicate ed una serie di sensori che mandano segnali da monitorare al PLC, prevengono le manutenzioni e riducono le tempistiche di manutenzione.

Questi sistemi sono in grado di reagire agli eventi modificando il funzionamento in modo da prevenire dei guasti e/o addirittura fermare l'aerogeneratore in caso di situazioni gravi.

Le nuove turbine presentano le caratteristiche di compattezza e sono studiate in modo tale da generare corrente elettrica per mezzo del motore/generatore sincrono a magneti permanenti di ultima generazione.

L'impianto è costituito dalle seguenti parti:

- **Turbina eolica** con utilizzo di nuova configurazione di moltiplicatore + generatore elettrico e sviluppo di nuove pale con alto rendimento aerodinamico.
- **Torre di supporto** altezza standard 18 metri fuori terra. (Altezza fuori standard 24 metri).
- **PLC** che si occuperà in base ai segnali provenienti dai sensori a bordo macchina, di garantire le migliori condizioni di funzionamento al generatore per ottimizzare la produzione di energia elettrica.
- **Gruppo di conversione elettrica AC/DC/AC** completo di dispositivo di interfaccia alla rete in bassa tensione come richiesto dalle normative.
- **Armadio elettrico** per la gestione di tutti i componenti elettrici ed elettronici presenti.
- **Cablaggio** di tutto il sistema dalla navicella al gruppo di conversione.

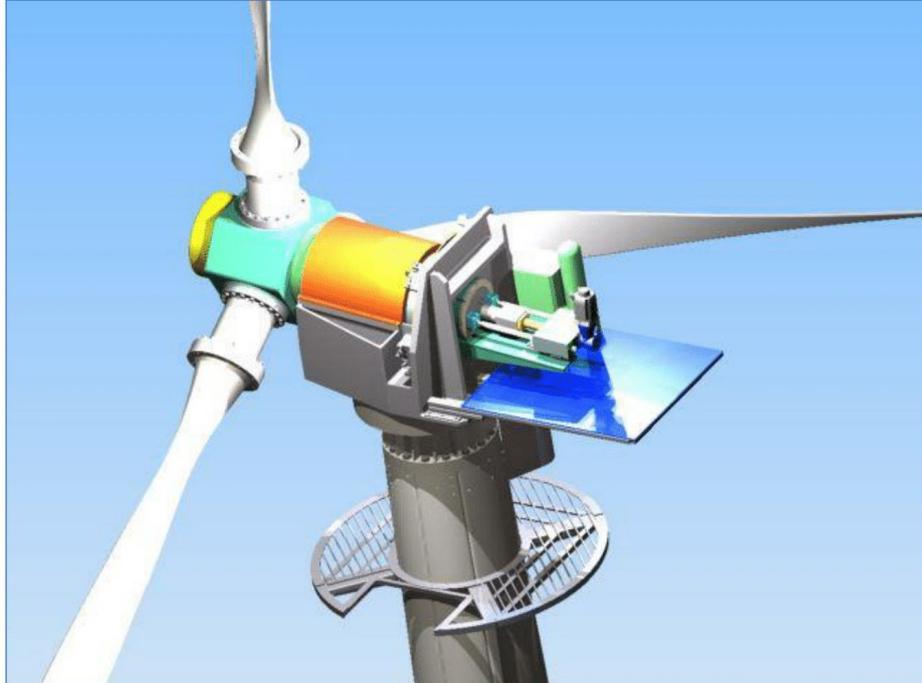
Tutti i componenti assemblati rispettano le rispettive normative di riferimento.

**CARATTERISTICHE TECNICHE**

Le principali caratteristiche del generatore sono le seguenti:

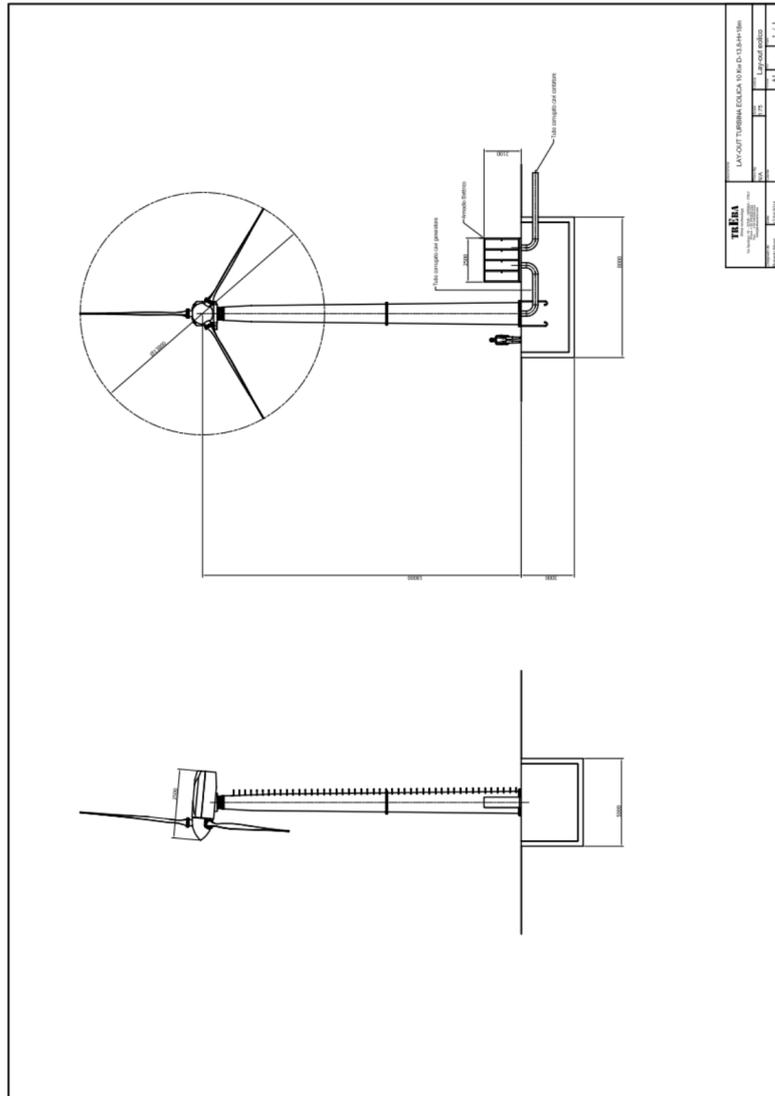
<i>Nominal power</i>   Potenza nominale	10 kW
<i>Number of blades</i>   Numero pale	3
<i>Blades material</i>   Materiale pale	Fiberglass   Vetrotresina
<i>Blade profile</i>   Profilo delle pale	Specific   Specifico
<i>Rotor diameter</i>   Rotore diametro	13,8 m
<i>Generator weight</i>   Peso generatore	3500 Kg
<i>Blade Orientation</i>   Orientazione	Upwind   Sopravento
<i>Nominal turns speed shaft</i> Numero di giri nominale albero veloce	750 rpm
<i>Nominal turns slow shaft</i> Numero di giri nominale albero lento	70 rpm
<i>Standard height of rotor (standard)</i> Altezza del rotore da terra (Standard)	18 m (24 m fuori standard)
<i>Cut in velocity</i>   Velocità di cut in	2,5 m/s
<i>Cut off velocity</i>   Velocità di cut off	16 m/s
<i>Nominal wind velocity</i> Velocità del vento nominale	7 m/s
<i>Yaw control</i>   Sistema di controllo imbardata	Active   Attivo
<i>Blade pitch control</i>   Sistema di controllo passo	Active   Attivo
<i>Over speed control</i>   Controllo sopravvelocità	Active   Attivo
<i>Generator</i>   Generatore	<i>Synchronous multi-pole permanent magnets</i>   Sincrono multipolare a magneti permanenti
<i>Maximum wind velocity</i> Velocità di sopravvivenza	37,5 m/sec
<i>Operating temperature</i>   Condizioni di temperatura	-20°C / + 50°C
<i>Generator class</i>   Classe del generatore	III CEI-IEC 61400-1
<i>Voltage output</i>   Tensione di uscita	400/50 V/Hz
<i>Remote data transmission</i> Trasmissione dati remoto	ADSL/GPRS/GSM
<i>PLC and electrical drives</i>   PLC e azionamenti	Siemens

Fig. 1-1



**LAYOUT: TURBINA EOLICA 10 Kw**

Configurazione generale:  
**TURBINA EOLICA CON GENERATORE ASINCRONO 10 Kw:**



TREBA Wind Technology  
Verona - Montegalda (Vi) Italy  
Tel. +390452021222 - Fax. +390452021222  
E-mail: trebawind@libero.it

**CURVA POTENZA/VELOCITA' DEL VENTO: TURBINA EOLICA 10 Kw**

La curva di potenza in funzione del vento del generatore eolico è la seguente:

