

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ENGENHARIA ELÉTRICA / CONTROLE E AUTOMAÇÃO

GUILHERME RICARDO
ISABELA CAVALCA LUCIO MACHADO
VANESSA RAFAELA HAAG ZEM

**ESTUDO DA COMPLEMENTARIEDADE ENTRE AS FONTES
EÓLICA E SOLAR FOTOVOLTAICA NA MATRIZ ELÉTRICA DO
ESTADO DO PARANÁ**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2015

GUILHERME RICARDO
ISABELA CAVALCA LUCIO MACHADO
VANESSA RAFAELA HAAG ZEM

**ESTUDO DA COMPLEMENTARIEDADE ENTRE AS FONTES
EÓLICA E SOLAR FOTOVOLTAICA NA MATRIZ ELÉTRICA DO
ESTADO DO PARANÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica / Controle e Automação, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Curitiba.

Orientador: Prof. Dr. Gerson Máximo Tiepolo

CURITIBA

2015

GUILHERME RICARDO
ISABELA CAVALCA LUCIO MACHADO
VANESSA RAFAELA HAAG ZEM

ESTUDO DA COMPLEMENTARIEDADE ENTRE AS FONTES EÓLICA E SOLAR FOTOVOLTAICA NA MATRIZ ELÉTRICA DO ESTADO DO PARANÁ

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

Curitiba, 01 de julho de 2015.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Gerson Máximo Tiepolo, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Gerson Máximo Tiepolo, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Jair Urbanetz Junior, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Carlos Henrique Karam Salata, Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

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

AGRADECIMENTOS

À Deus por nos iluminar e por todas as oportunidades oferecidas.

Aos nossos pais pela educação a qual nos foi dada, por acreditarem em nossos sonhos, pelo carinho e por todo companheirismo.

As nossos amigos pelo apoio e dedicação.

Aos mestres pelos ensinamentos e pela amizade obtida durante todos estes anos, em especial para nosso orientador professor Dr. Gerson Máximo Tiepolo, pela dedicação, paciência e incentivos. À banca examinadora, ao professor Dr. Jair Urbanetz Junior e ao professor Carlos Henrique Karam Salata por todos os conselhos e pela confiança.

À Companhia Paranaense de Energia (COPEL), com agradecimento especial ao Engenheiro Eletricista Marcos de Lima, por todo apoio e pelo fornecimento de informações que tornaram este trabalho possível.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho e nos incentivaram a buscar o conhecimento.

“Para realizar grandes conquistas, devemos não apenas agir, mas também sonhar; não apenas planejar, mas também acreditar.”

Anatole France

RESUMO

RICARDO, Guilherme, MACHADO, Isabela C. L., ZEM, Vanessa R. H. **Estudo da complementariedade entre as fontes eólica e solar fotovoltaica na matriz elétrica do Estado do Paraná.** 2015. 138f. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Elétrica / Controle e Automação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

A crise que afeta o setor elétrico é um dos assuntos mais discutidos atualmente no Brasil. Tal crise é refletida no alto preço das tarifas que atingem diretamente os consumidores, e é neste panorama que surge o debate da necessidade de novas políticas quanto à geração de energia elétrica no país, haja vista que o potencial proveniente das fontes hidrelétricas, predominantes no país, está próximo da saturação. Assim como tem mostrado fragilidade com a incapacidade de produzir energia elétrica em períodos de estiagem, sendo muito susceptível aos efeitos da sazonalidade. Desta forma, as energias renováveis, como solar fotovoltaica e eólica, surgem como uma excelente opção para suprir parte da demanda por eletricidade, principalmente pelo seu aspecto sustentável e pelo potencial expressivo destas fontes no território nacional. Diante disto, este trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo sobre a complementariedade das fontes solar fotovoltaica e eólica na matriz elétrica do Estado do Paraná, ou seja, levantar o potencial de quanto estas fontes seriam capazes de produzir de energia elétrica, com base nas características climáticas e geográficas do Estado, além de demonstrar de forma comparativa, através da análise de cenários, os impactos que estas fontes renováveis causariam na matriz elétrica paranaense. Para a elaboração deste trabalho, foi necessária uma revisão bibliográfica sobre os conceitos de energia solar fotovoltaica e eólica, bem como o levantamento dos seus potenciais e da matriz elétrica do Paraná. A partir deste levantamento foi possível estimar o quanto cada fonte - solar fotovoltaica e eólica, seriam capazes de produzir, cujos resultados foram confrontados com a matriz elétrica paranaense, mostrando uma relação de geração e consumo, e evidenciando com clareza a contribuição de cada uma das fontes. Com o resultado desta pesquisa, notou-se que a geração de energia elétrica por fonte fotovoltaica ou eólica é uma excelente opção técnica, capaz de complementar a demanda atual por energia elétrica do Estado e ainda contribuir com a matriz elétrica de outros estados brasileiros.

Palavras-chave: Energia elétrica. Energia solar fotovoltaica. Energia eólica. Complementariedade. Paraná.

ABSTRACT

RICARDO, Guilherme, MACHADO, Isabela C. L., ZEM, Vanessa R. H. **Study on the complementarity between solar photovoltaic and eolic sources in the electric supply of Parana.** 2015. 138p. Final dissertation – Bachelor Degree Electrical Engineering / Control and Automation. . Federal Technological University of Parana, Curitiba, 2015.

The crisis that affects the electric field is one of the most discussed topics nowadays in Brazil. Such crisis culminates on the high prices that consumers have to pay, and that is the panorama from which the debate on the necessity of new policies concerning the electrical generation in the country arises, considering that the potential of hydroelectric sources, widely exploited in the country, is close to be saturated. In the same way has shown a great deal of fragilities such as the incapacity to produce electric energy during long drought periods, being susceptible to seasonality effects. Thus, renewable energies, e.g. solar photovoltaic and Eolic, represent excellent options to fulfill part of the demand for electricity, mainly for its sustainable aspect and for the expressive potential of these sources within national territory. This work aims to develop the study of the complementarity among solar photovoltaic and Eolic sources in the energy supply of Parana, that is, to bring up the potential of how much these sources would be able to generate electric energy, based on the climatic and geographic conditions of the State, as well as to demonstrate, in a comparative way, through scenario analysis, the impacts that these renewable sources could bring in the Parana energy supply. To carry out this work, there was the necessity of a bibliographic review on the concepts of solar photovoltaic and Eolic energy, as well as the research of their potential and of the energy supply of Parana. From this research, it was possible to estimate how much energy each source – solar photovoltaic and Eolic, would be able to produce. Results were compared to the Parana energy supply, showing the relation of generation and consumption, and clearly evidencing the contribution of each source. Considering the results of this study, it became clear that the generation of solar photovoltaic and Eolic energy is an excellent technical option, capable of solving the problems of current demand for electric energy of the State and yet contribute with the energy supply of other Brazilian states.

Keywords: Electric energy. Solar photovoltaic energy. Wind energy. Complementarity. Parana.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Consumo total de energia elétrica no Brasil entre 2008 e 2012 por classe (GWh)..... | 27 |
| Figura 2 - Exemplificação do efeito fotovoltaico. | 39 |
| Figura 3 – Componentes da radiação solar..... | 40 |
| Figura 4 – Movimento anual da Terra em torno do sol..... | 43 |
| Figura 5 – Exemplo da declinação solar através das estações do ano. | 43 |
| Figura 6 – Célula fotovoltaica de silício monocristalino. | 45 |
| Figura 7 – Célula fotovoltaica de silício policristalino. | 46 |
| Figura 8 – Módulo de filme fino. | 47 |
| Figura 9 – Curva característica IxV típica de uma célula de silício monocristalino. | 48 |
| Figura 10 – Exemplificação do efeito causado pela temperatura em um módulo de silício cristalino. | 49 |
| Figura 11 – Efeito do sombreamento sobre as células. | 50 |
| Figura 12 – Sistema fotovoltaico isolado na ilha deserta de Faro, Portugal. | 51 |
| Figura 13 – Diagrama de um sistema fotovoltaico conectado à rede..... | 53 |
| Figura 14 – Sistema de tarifação net metering medidor bidirecional. | 54 |
| Figura 15 – Sistema de tarifação net metering com dois medidores..... | 54 |
| Figura 16 – Sistema de tarifação feed in com compensação financeira. | 55 |
| Figura 17 – Mapa de irradiação para o plano inclinado - média anual diária. .. | 57 |
| Figura 18 – Mapa de irradiação para o plano inclinado – média diária sazonal. | 58 |
| Figura 19 - Circulação geral dos ventos – Brasil. | 59 |
| Figura 20 – Exemplo de Rosa dos ventos..... | 62 |
| Figura 21 – Área atmosférica na qual uma turbina eólica está inserida. | 64 |
| Figura 22 – Princípio da conversão da energia cinética do vento em energia elétrica..... | 66 |
| Figura 23 – Principais partes de um aerogerador. | 66 |
| Figura 24 – Turbinas de eixos horizontal (a e b) e vertical (c)..... | 68 |
| Figura 25 – Vários modelos de turbinas de eixo vertical. (a) Darrieus; (b) Savonius; (c) Solarwind; (d) Helicoidal; (e) Noguchi; (f) Maglev e (g) Cochrane. | 69 |
| Figura 26 – Sistema de geração eólica conectada à rede. | 73 |
| Figura 27 – Sistema de geração eólica isolada..... | 74 |
| Figura 28 - Médias climatológicas sazonais de temperatura, precipitação e velocidade de vento sobre o Brasil..... | 75 |
| Figura 29 - Fluxo de potência eólica anual (W/m^2) e velocidade média anual do vento à 50m de altura (m/s)..... | 76 |
| Figura 30 - Velocidade média anual do vento à 50m de altura (m/s) em diferentes épocas do ano. | 77 |

| | |
|---|----|
| Figura 31 - Potencial eólico brasileiro estimado para o vento médio anual igual ou superior a 7,0 m/s..... | 78 |
| Figura 32 – Geração ITAIPU Binacional - 2014. | 79 |
| Figura 33 - Potenciais estimado, aproveitado e inventariado das bacias hidrográficas brasileiras. | 82 |
| Figura 34 – Comportamento da disponibilidade hídrica/consumo de energia elétrica durante o ano..... | 85 |
| Figura 35 – Mapa fotovoltaico do Estado do Paraná – anual para o plano inclinado..... | 88 |
| Figura 36 - Mapas Fotovoltaicos do Estado do Paraná - Média Diária Mensal (Plano Inclinado) – Janeiro à Junho. | 90 |
| Figura 37 - Mapas Fotovoltaicos do Estado do Paraná - Média Diária Mensal (Plano Inclinado) – Julho à Dezembro. | 91 |
| Figura 38 – Potencial de geração eólica no Estado do Paraná, por altura e faixas de velocidade de vento. | 94 |
| Figura 39 – Velocidade média anual do vento no Paraná – 100 metros de altura. | 95 |
| Figura 40 – Velocidade média sazonal do vento no Paraná – 100 metros de altura. | 96 |
| Figura 41 - Velocidade média sazonal do vento e da densidade de potência em Palmas - PR - 50 metros de altura. | 97 |
| Figura 42 - Velocidade média sazonal do vento e da densidade de potência em Guarapuava - PR - 50 metros de altura. | 98 |
| Figura 43 - Velocidade média sazonal do vento e da densidade de potência em Castro - PR - 50 metros de altura..... | 98 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Capacidade instalada global e no Brasil por fonte de energia elétrica em (GW)..... | 19 |
| Tabela 2 – Classificação da rugosidade da superfície de alguns tipos de terreno..... | 65 |
| Tabela 3 – Geração elétrica - Região Sul do Brasil – 2013..... | 79 |
| Tabela 4 - Geração elétrica e capacidade instalada - COPEL- Estado do Paraná – 2013..... | 80 |
| Tabela 5 – Valores da demanda média e máxima de energia elétrica paranaense no ano de 2014..... | 84 |
| Tabela 6 - Comparação da produtividade estimada total anual média entre regiões. | 87 |
| Tabela 7 - Valores de Irradiação no plano inclinado e de produtividade gerada estimada total anual do Estado do Paraná..... | 88 |
| Tabela 8 - Valores de Irradiação no plano inclinado e de produtividade gerada estimada diária média mensal e sazonal no Estado do Paraná..... | 89 |
| Tabela 9 - Valores de irradiação total e de produtividade gerada estimada total anual no plano inclinado nas principais cidades do Paraná, para TD 75%. | 93 |
| Tabela 10 - Valores das constantes calculadas e utilizadas nos períodos sazonais..... | 100 |
| Tabela 11 - Produção de energia elétrica de um aerogerador nas três cidades e em períodos sazonais. | 100 |
| Tabela 12 - Resumo com os principais dados levantados. | 102 |
| Tabela 13 - Cenário 1 com a potência instalada por fonte..... | 104 |
| Tabela 14 - Consumo, geração de energia elétrica por fonte e balanço de energia elétrica mês a mês - Cenário 1..... | 104 |
| Tabela 15 - Consumo e geração de energia elétrica por fonte pelo período de um ano - Cenário 1..... | 105 |
| Tabela 16 - Balanço de energia elétrica pelo período de um ano - Cenário 1. | 105 |
| Tabela 17 - Cenário 2 com a potência instalada por fonte..... | 106 |
| Tabela 18 - Consumo, geração de energia elétrica por fonte e balanço de energia elétrica mês a mês - Cenário 2..... | 107 |
| Tabela 19 - Consumo e geração de energia por fonte pelo período de um ano - Cenário 2..... | 108 |
| Tabela 20 - Balanço de energia elétrica pelo período de um ano - Cenário 2. | 108 |
| Tabela 21 - Cenário 3 com a potência instalada por fonte..... | 109 |
| Tabela 22 - Consumo, geração de energia elétrica por fonte e balanço de energia elétrica mês a mês - Cenário 3..... | 110 |
| Tabela 23 - Consumo e geração de energia elétrica por fonte pelo período de um ano - Cenário 3..... | 111 |

Tabela 24 - Balanço de energia elétrica pelo período de um ano - Cenário 3.
..... 111

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|-----|
| Gráfico 1 - Previsão da participação de fontes renováveis no mundo até o ano de 2100. | 20 |
| Gráfico 2 - Crescimento do uso de energia solar fotovoltaica no mundo. | 21 |
| Gráfico 3 - Países com maior capacidade instalada em energia eólica para produção de eletricidade de 2013. | 23 |
| Gráfico 4 - Capacidade mundial total instalada em energia eólica para produção de eletricidade até o ano de 2013. | 23 |
| Gráfico 5 - Aumento populacional brasileiro nos últimos anos e projeção até 2030. | 26 |
| Gráfico 6 – Geração de energia elétrica global por fonte em 2013. | 34 |
| Gráfico 7 - Evolução da matriz energética brasileira de 2010 à 2020. | 35 |
| Gráfico 8 - Geração de energia elétrica no Brasil por fonte em 2013..... | 37 |
| Gráfico 9 - Função Densidade de Probabilidade de Weibull com fator de forma (k) igual a 1, 2 e 3 e fator de escala (c) igual a 8..... | 61 |
| Gráfico 10 - Consumo de energia elétrica por setor no Paraná em 2013. | 81 |
| Gráfico 11 - Curva de demanda paranaense no ano de 2014 - Demanda média mensal e demanda máxima mensal..... | 85 |
| Gráfico 12 - Consumo e geração de energia elétrica para o cenário 1. | 105 |
| Gráfico 13 - Consumo e geração de energia elétrica para o cenário 2. | 108 |
| Gráfico 14 - Consumo e geração de energia elétrica para o cenário 3. | 110 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ACC | Análise de Comportamento de Carga |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| APAC | Asia Pacific (Ásia-Pacífico) |
| BEN | Balanço energético Nacional |
| CA | Corrente Alternada |
| CC | Corrente Contínua |
| CEGISE | Comitê de Gestão Integrada dos Empreendimentos de Geração do Setor Elétrico |
| CEPA | Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada |
| CEPEL | Centro de Pesquisas de Energia Elétrica |
| CNI | Confederação Nacional da indústria |
| CNPE | Conselho Nacional de Política Energética |
| COPEL | Companhia Paranaense de Energia |
| CPTEC | Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos |
| CRESESB | Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito |
| EIA | Agência Internacional de Energia |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| EPIA | Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica (<i>European Photovoltaic Industry Association</i>) |
| FF | Fator de Forma |
| FIESP | Federação das Indústrias do Estado de São Paulo |
| FMI | Fundo Monetário Internacional |
| GW | giga_watts |
| GWh | giga_watt_hora |

| | |
|---------|---|
| Hz | hertz |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IEA | Instituto de Aeronáutica e Espaço |
| Imp | Corrente de Máxima Potência |
| IPARDES | Instituto Paranaense Econômico e Social |
| Isc | Corrente de Curto Circuito |
| km | quilômetro |
| kW | quilo_watts |
| kWh | quilo_watt_hora |
| MCP | Medir – Correlacionar – Predizer |
| MEA | <i>Middle East and Africa</i> (Oriente Médio e África) |
| MMA | Ministério do Meio Ambiente do Brasil |
| MME | Ministério de Minas e Energia |
| MW | mega_watts |
| MWh | mega_watt_hora |
| OECD | Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico |
| ONS | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| PCH | Pequena Central Hidrelétrica |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| PROINFA | Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica |
| REN21 | Rede de Políticas Energéticas Renováveis para o Século XXI (<i>Renewable Energy Policy Network for the 21st Century</i>) |
| RoW | <i>Rest of the World</i> (Resto do Mundo) |
| SFVCR | Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede |
| SFVI | Sistema Fotovoltaico Isolado |
| SIN | Sistema Interligado Nacional |
| STC | <i>Standard Test Conditions</i> |
| TWh | tera_watt_hora |
| UDOP | União dos Produtores de Bioenergia |
| UHE | Usina Hidrelétrica de Energia |

| | |
|-----------------|--|
| UPS | Fornecimento de Energia Ininterrupta (<i>Uninterruptible Power Supply</i>) |
| UTFPR | Universidade Tecnológica Federal do Paraná |
| V _{mp} | Tensão de máxima potência |
| V _{oc} | Tensão de circuito aberto |
| WBGU | Conselho Consultivo Alemão para Alterações Climáticas (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) |
| W _p | Potência de Pico |
| WWF | <i>World Wide Fund for Nature</i> |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 TEMA | 25 |
| 1.1.1 Delimitação do Tema | 25 |
| 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS | 25 |
| 1.3 OBJETIVOS | 28 |
| 1.3.1 Objetivo Geral | 28 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos | 28 |
| 1.4 JUSTIFICATIVA | 28 |
| 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS | 30 |
| 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO | 31 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 33 |
| 2.1 MATRIZ ELÉTRICA GLOBAL | 33 |
| 2.2 MATRIZ ELÉTRICA NO BRASIL | 35 |
| 2.3 ENERGIA SOLAR | 38 |
| 2.3.1 Radiação Solar | 39 |
| 2.3.2 Conceitos Básicos – Grandezas Físicas | 41 |
| 2.3.3 Posição Solar | 41 |
| 2.3.4 Células e Módulos Fotovoltaicos | 43 |
| 2.3.5 Silício Monocristalino | 44 |
| 2.3.6 Silício Policristalino | 45 |
| 2.3.7 Filmes Finos | 46 |
| 2.3.8 Características elétricas dos módulos fotovoltaicos | 48 |
| 2.3.9 Efeitos adversos sobre os módulos fotovoltaicos | 49 |
| 2.3.10 Temperatura | 49 |
| 2.3.11 Sombreamento | 49 |
| 2.3.12 Configurações dos Sistemas Fotovoltaicos | 50 |
| 2.3.13 Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFVI) | 51 |
| 2.3.14 Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR) | 51 |
| 2.3.15 Sistemas Híbridos | 55 |
| 2.3.16 Potencial Solar no Brasil | 56 |
| 2.4 ENERGIA EÓLICA | 58 |
| 2.4.1 O vento | 58 |
| 2.4.2 A potência do vento | 60 |
| 2.4.3 A medição do vento | 62 |
| 2.4.4 O terreno e os fatores que influenciam a capacidade de produção | 63 |
| 2.4.5 Aerogeradores | 65 |
| 2.4.6 Energia Eólica <i>Onshore</i> | 70 |
| 2.4.7 Energia eólica <i>Offshore</i> | 70 |
| 2.4.8 Conexão com a rede | 71 |

| | |
|---|------------|
| 2.4.9 Sistema isolado..... | 73 |
| 2.4.10 Potencial Eólico Brasileiro | 74 |
| 3 LEVANTAMENTO DE DADOS – ESTADO DO PARANÁ..... | 79 |
| 3.1 MATRIZ ELÉTRICA NO PARANÁ..... | 79 |
| 3.1.1 Curva de Carga..... | 83 |
| 3.2 POTENCIAL FOTOVOLTAICO DO ESTADO DO PARANÁ | 86 |
| 3.3 POTENCIAL EÓLICO DO ESTADO DO PARANÁ..... | 93 |
| 3.3.1 Potencial eólico de Palmas | 96 |
| 3.3.2 Potencial eólico de Guarapuava | 97 |
| 3.3.3 Potencial eólico de Castro | 98 |
| 3.3.4 Potencial eólico das três cidades..... | 99 |
| 4 ESTUDO DA COMPLEMENTARIEDADE DA MATRIZ ELÉTRICA DO ESTADO DO PARANÁ..... | 101 |
| 4.1 CONCEITO DE COMPLEMENTARIEDADE | 101 |
| 4.2 RESULTADOS | 102 |
| 4.2.1 Estudo da complementariedade – Cenário 1 | 102 |
| 4.2.2 Estudo da complementariedade – Cenário 2..... | 106 |
| 4.2.3 Estudo da complementariedade – Cenário 3..... | 109 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 112 |
| 6 REFERÊNCIAS | 115 |
| APÊNDICE A | 127 |

1 INTRODUÇÃO

Desde o início de sua comercialização na década de 1870, por Thomas Edison, a energia elétrica é um instrumento de avanço socioeconômico e progresso tecnológico. A eletricidade tornou o cotidiano da sociedade muito mais simples e confortável, prova disso são os inúmeros equipamentos eletroeletrônicos e eletrodomésticos desenvolvidos ao longo das décadas. Esses produtos fizeram da energia elétrica um item indispensável e de grande valor para o desenvolvimento do mundo contemporâneo.

No entanto, com o crescimento populacional e o consumismo descontrolado, problemas inerentes de um sistema capitalista, a sociedade se depara com um grande paradoxo: de um lado a necessidade de manter o desenvolvimento para atender a demanda do consumo e da obsolescência, e do outro, os impactos ambientais proporcionais a este modelo, comprometendo a sustentabilidade do planeta. É então, segundo Veiga (2004), neste cenário que surge um novo modelo chamado de desenvolvimento sustentável. Segundo a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, desenvolvimento sustentável é: “o desenvolvimento que atende às necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das futuras gerações atenderem às suas próprias necessidades” (ESTENDER e PITTA, 2007).

Diante disso, segundo Lucon e Goldemberg (2009) as energias renováveis se mostraram peças centrais para o sucesso desse novo sistema, sendo cruciais para o processo de modernização previsto para a matriz elétrica brasileira.

Segundo Estender e Pitta (2007), o perfil de consumo de energia elétrica no Brasil vem se mostrando mais suscetível à popularização dessas energias ditas renováveis ano a ano. Isso se deve, além da onda de preocupação ambiental, às infinitas possibilidades de utilização e captação desses recursos. Dentre as mais populares estão às energias solar, eólica, biomassa e a já bastante utilizada hidráulica. Segundo estudo publicado pela *World Wide Fund for Nature* (WWF, 2012) em 2012, no Brasil já existiam planos de sazonalidade entre as diferentes fontes provedoras de energia

elétrica no país. Nesse perfil, as energias solar e eólica surgem como alternativas que poderão ser bastante viáveis economicamente a médio e longo prazo, devido à queda no valor de implantação dos sistemas, aumento da tarifa atual, e incentivos governamentais como, para solar, o fundo clima, que garante o financiamento do sistema solar com baixa taxa de juros anual e, para o setor eólico, a União dos Produtores de Bioenergia afirma investimentos beirando os 10 bilhões de reais em energia eólica na região nordeste do Brasil (UDOP, 2014).

Segundo Villalva *et al.*(2013), as tradicionais fontes de energia elétrica ainda constituem a base mundial e nacional da geração de eletricidade, através das usinas hidrelétricas, termelétricas a carvão e a petróleo, e as usinas nucleares. Esta distribuição pode ser observada através da Tabela 1, que apresenta a capacidade total instalada de energia elétrica no mundo e no Brasil, por diferentes fontes.

Tabela 1 – Capacidade instalada global e no Brasil por fonte de energia elétrica em (GW).

| Tipo de fonte energética | Total da capacidade instalada de energia elétrica (em GW) | | | | |
|-----------------------------|---|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Mundo | | Brasil | | |
| | 2007 | 2011 | 2007 | 2011 | 2013 |
| Combustíveis fósseis | 3009,206 | 3495,599 | 14,927 | 22,368 | -- |
| Nuclear | 371,621 | 367,797 | 1,795 | 1,884 | 1,990 |
| Hidroelétrica | 934,238 | 1075,465 | 76,869 | 82,459 | 86,018 |
| Geotérmica | 9,054 | 11,43 | 0 | 0 | -- |
| Solar | 7,682 | 66,288 | 0 | 0,032 | 0,05 |
| Maremotriz | 0,261 | 0,517 | 0 | 0 | -- |
| Eólica | 93,227 | 237,242 | 0,247 | 1,431 | 2,202 |
| Biomassa e Biogás | 50,24 | 76,707 | 6,397 | 10,9 | -- |
| Capacidade Instalada | 4475,529 | 5331,045 | 100,235 | 119,074 | 126.743 |

Fonte: Adaptado de EIA (2014) e BEN (2014).

Entretanto, este cenário tende a mudar pelo aumento da participação na matriz elétrica das centrais eólicas e sistemas solares fotovoltaicos. Com base nos dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2014), a previsão de consumo de energia elétrica no mundo até 2030 é de aproximadamente 30.000 TWh, ou seja, um aumento de mais de 328% comparado com o ano de 1980, no qual eram consumidos mundialmente cerca de 7.000 TWh de eletricidade.

O Gráfico 1 ilustra a previsão da participação das diferentes fontes de energia elétrica no mundo até 2100, com previsão da participação de 64% da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica global. Segundo Sapa Solar (2014) o conselho consultivo alemão para alterações climáticas (WBGU) prevê que a participação das energias não renováveis será cada vez menor devido ao esgotamento dos recursos de combustíveis fósseis e ao aumento da demanda de energia elétrica, e em contrapartida, as energias renováveis tendem ao desenvolvimento e expansão, principalmente na área de sistemas solares fotovoltaicos e eólicos de geração.

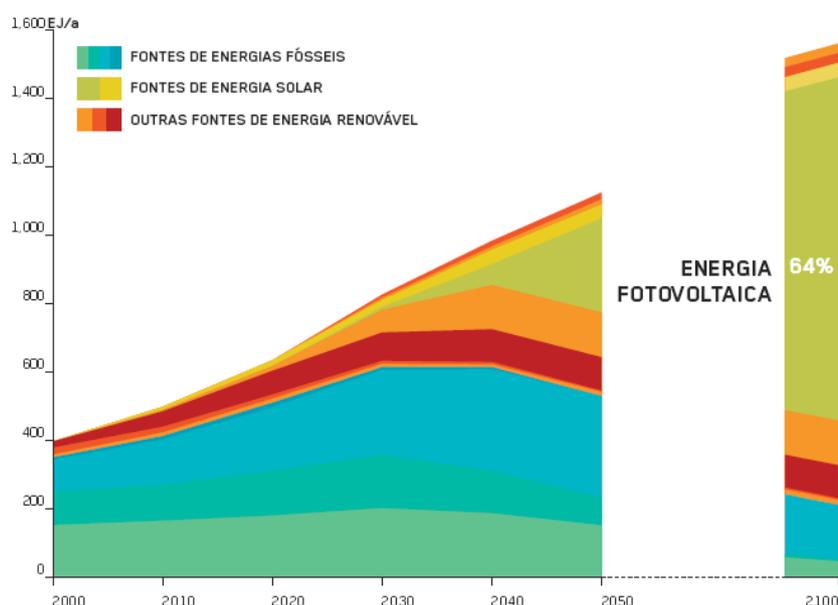


Gráfico 1 - Previsão da participação de fontes renováveis no mundo até o ano de 2100.

Fonte: Sapa Solar – Tecnologia Fotovoltaica (2014)

O uso da energia solar fotovoltaica está em constante crescimento, com pesquisas e redução de custos de implantação em pleno desenvolvimento. Pode-se ver no Gráfico 2 do EPIA (*European Photovoltaic Industry Association*) que o continente europeu atualmente é o recordista em investimentos nessa área, sendo os dados ainda divididos entre as regiões RoW (*Rest of the World – Resto do Mundo*), MEA (*Middle East and Africa – Oriente Médio e África*), China, Américas, APAC (*Asia Pacific – Ásia-Pacífico*).

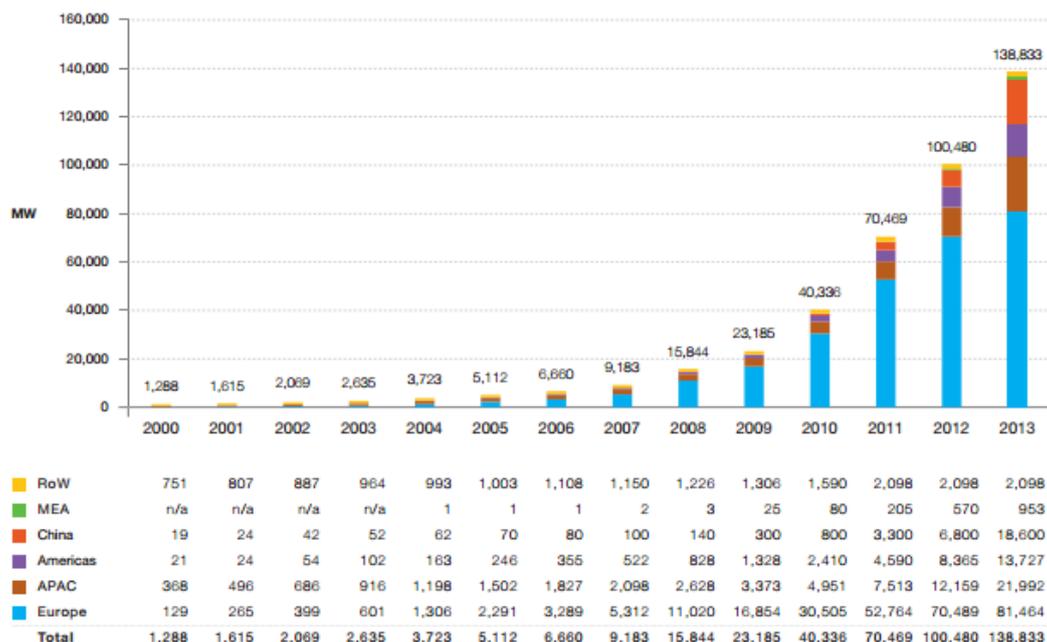


Gráfico 2 - Crescimento do uso de energia solar fotovoltaica no mundo.
Fonte: EPIA (2014)

Essencialmente, a energia solar fotovoltaica é uma forma de geração que utiliza a energia do sol, isto é, uma célula fotovoltaica é capaz de transformar a luz do sol em energia elétrica. Basicamente a placa composta de silício, metal e vidro que compõe esse sistema de captação, cria um campo elétrico entre as camadas do material semicondutor, que produzem, conforme a irradiação solar, a eletricidade em si (ZILLES *et al.* 2012).

Ainda segundo Zilles *et al.* (2012) esse tipo de geração pode ser dividido através de dois sistemas: o Sistema Fotovoltaico Isolado (SFVI) e o Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFVCR). Na tecnologia voltada à geração de energia solar, os sistemas isolados são indicados para regiões em que a rede elétrica não é capaz de atender o consumidor, como, por exemplo, em áreas rurais ou de preservação ambiental, haja vista que estas se encontram muito afastadas dos grandes centros urbanos, assim demandaria muitos recursos para suprir estes clientes. Entretanto, para as demais áreas o SFVI se torna inviável, pois para a sua implantação é necessário um banco de baterias, o qual encarece o projeto final.

Os SFVCR, que dispensam o uso de armazenadores de energia, só começaram a ser utilizados na década de 90 (GRANDIN, 2012). Segundo Zilles

et al (2012) o SFVCR é considerado um acumulador infinito de energia, tanto pela economia de instalação quanto pelo custo da energia elétrica gerada pelo sistema. Nesse sistema a energia elétrica gerada através dos painéis fotovoltaicos tende a suprir a carga da instalação, e caso não atenda a demanda exigida, o restante da energia elétrica é provida através das concessionárias de energia. Todavia, poderá ocorrer excesso de produção, e sendo assim, o seu excedente é injetado para a rede elétrica, retornando no momento em que for necessário. Este modelo de troca de energia elétrica é chamado de *Net Metering*, e já é bastante difundido na Europa e nos Estados Unidos da América. É importante ressaltar que para o desenvolvimento do SFVCR é necessário um equipamento eletrônico chamado de *Smart meter* (medidor inteligente ou medidor bidirecional), cuja função é realizar o balanceamento entre a energia gerada e consumida (ZILLES *et al.* 2012).

Diante deste quadro, a geração distribuída se tornou uma modalidade em franco crescimento no Brasil e em diversos países, pois é caracterizada pelo uso de geradores descentralizados próximos aos locais de consumo, principalmente para geração solar. Este sistema inclui parques de geração em regiões abertas e instalados em áreas urbanas, podendo ser aplicado em residências, empresas, escolas, centros comerciais e outros empreendimentos (ZILLES *et al.* 2012). A ANEEL (2012) criou em 2012 duas resoluções que estabelecem condições gerais para acesso à micro geração e mini geração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e ao sistema de compensação de energia elétrica. Estas resoluções normativas são a Resolução 482/2012 e a Resolução 517/2012 que preveem os procedimentos para acesso aos sistemas de distribuição brasileiros.

Segundo Martins *et al.* (2004) um sistema de energia solar fotovoltaica tem a vantagem de poder ser empregado em qualquer lugar com possibilidade de irradiação solar. A quantidade de energia elétrica produzida depende basicamente da irradiação do local ao qual está instalado. O Brasil é um país privilegiado, com altas taxas de irradiação em todo o território, sendo a região Nordeste a com maior potencial, entretanto a região Sul mesmo possuindo taxas menores nacionalmente, obtém taxas maiores que as encontradas em países europeus, os quais utilizam em grande maioria a energia solar.

Outra fonte de energia elétrica em constante crescimento é a eólica. De acordo com o “*Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*” (REN21, 2013), em 2013 foram adicionados mais de 35 GW de potência eólica na matriz elétrica global com destaque para a China, conforme mostra o Gráfico 3. O Gráfico 4 ainda ilustra que no ano de 2013 a potência global total instalada em energia eólica totalizava mais de 318 GW, um aumento considerável se comparado com os 17 GW instalados no ano 2000.

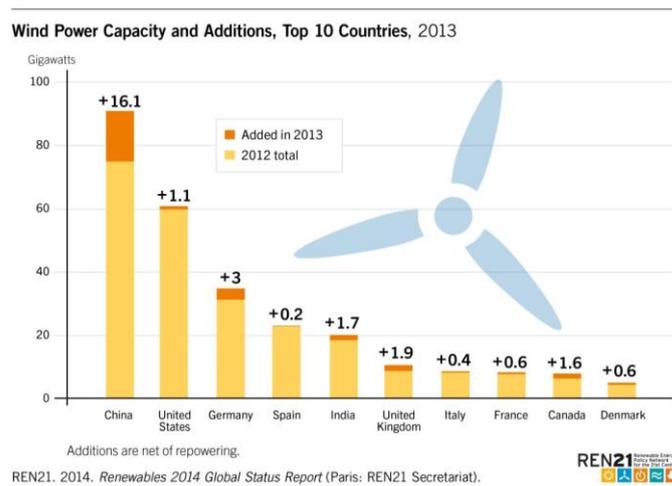


Gráfico 3 - Países com maior capacidade instalada em energia eólica para produção de eletricidade de 2013.
Fonte: Renewables 2014 - Global Status Report – REN21 (2013)

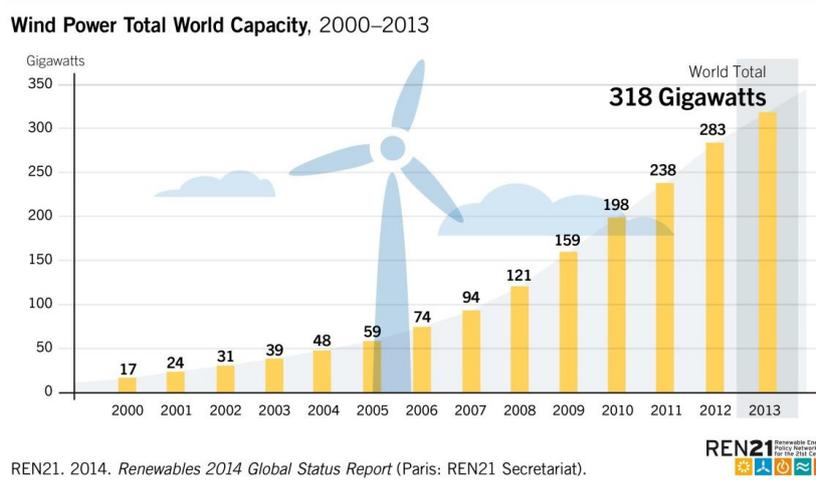


Gráfico 4 - Capacidade mundial total instalada em energia eólica para produção de eletricidade até o ano de 2013.
Fonte: Renewables 2014 - Global Status Report - REN21 (2013)

De acordo com dados do site do REN21 (2013), no final da década de 90, o governo brasileiro finalizou o “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro” com medições a uma altura de 50 metros acima da superfície terrestre e estimou o potencial de geração eólica no país na ordem de 143 mil MW. Atualmente, segundo o Ministério de Minas e Energia, dados apontam que a capacidade de geração eólica do Brasil pode ultrapassar os 300 mil MW, caso sejam feitas medições entre 80 e 120 metros de altura. Tal fato comprova o elevado potencial a ser explorado no país, principalmente na região nordeste que possui mais de 50% do potencial total nacional.

Para o Ministério do Meio Ambiente do Brasil (MMA, 2014), o país possui um grande potencial e pode investir em grandes centrais eólicas que são conectadas à rede elétrica atendendo ao Sistema Interligado Nacional (SIN) e em pequenas centrais, destinadas ao suprimento de eletricidade em comunidades ou sistemas isolados.

Este tipo de geração de energia elétrica utiliza como combustível o vento, movimento do ar na atmosfera terrestre. De acordo com Aldabó (2002), este movimento do ar é gerado pela diferença de temperatura nas regiões terrestres sendo mais aquecido na região do Equador e com resfriamento nas regiões polares. Ainda segundo Aldabó (2002), o aerogerador (ou turbina eólica) é responsável por converter a energia cinética dos ventos em energia elétrica, através de um gerador, sendo todo o sistema de geração controlado por sensores que possibilitam o funcionamento equilibrado e seguro, com melhor aproveitamento do vento.

Para o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB, 2008), algumas características podem influenciar no comportamento da velocidade dos ventos que por sua vez influenciam no desempenho da produção de energia elétrica, dentre estes fatores estão: variações topográficas, rugosidade do solo, a altura, a presença de obstáculos e o relevo. Além disso, a instalação dos aerogeradores e torres podem ser feitas em terra firme (*onshore*) ou no mar (*offshore*).

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), conforme descrito no Decreto nº 5.025, de 2004, regulamenta a fonte eólica no Brasil, de acordo com o próprio decreto “[...] com o objetivo de

aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos [...] concebidos com base em fontes eólica, pequenas centrais hidrelétrica e biomassa, no Sistema Interligado Brasileiro [...]” (PROINFA, 2004).

1.1 TEMA

Estudo da complementariedade entre as fontes eólica e solar fotovoltaica na matriz elétrica do Estado do Paraná.

1.1.1 Delimitação do Tema

Levantamento da matriz elétrica do Estado do Paraná, com identificação das principais fontes que contribuem para o fornecimento de energia elétrica no Estado, realizando a análise de mapas sazonais das diferentes fontes de energia elétrica e obtenção dos potenciais solar fotovoltaico e eólico, para a determinação da possível contribuição da energia solar e eólica na geração de eletricidade.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Segundo o *International Monetary Fund* (2010), realizado pelo Fundo Monetário Internacional, o Brasil tem apresentado um crescimento econômico significativo nos últimos anos, devido principalmente à evolução do seu PIB (Produto Interno Bruto).

No entanto o FMI projeta um crescimento de apenas 3,8% na economia global para 2015, pelo incremento da mesma na primeira metade de 2014 ter sido bastante abaixo do esperado. Esse panorama também atinge o Brasil, que tinha previsão de crescimento de 1,8% no último ano e cumpriu até setembro de 2014 metade do esperado, ou seja, um crescimento econômico de apenas 0,9%. Apesar da fase econômica mundial difícil, há previsão de

recuperação das economias globais de acordo com o Fundo (INTERNATIONAL MONETARY FUND, 2014).

Concomitantemente, de acordo com o IBGE (2014), o crescimento populacional vem aumentando consideravelmente. O Gráfico 5 mostra a evolução deste crescimento ilustrando do ano 2000 até 2030, em que o Brasil terá mais de 223 milhões de habitantes.

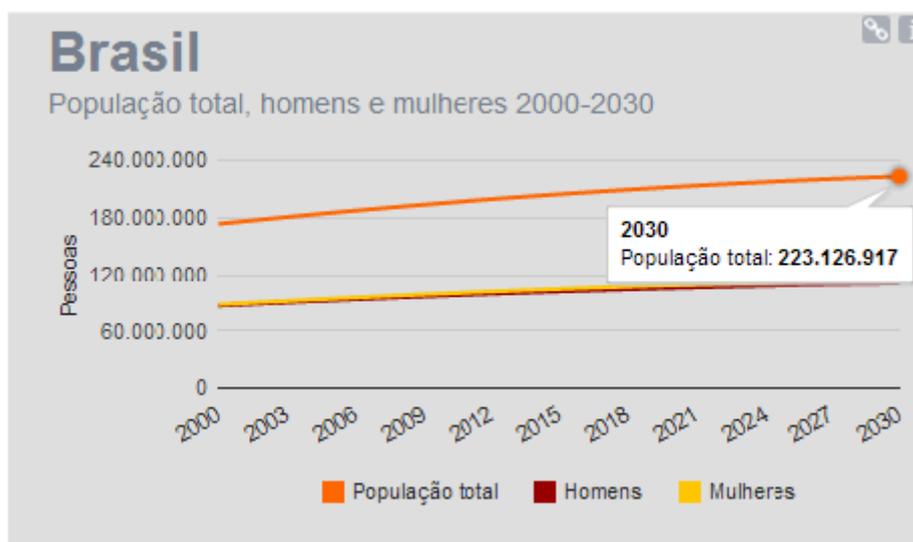


Gráfico 5 - Aumento populacional brasileiro nos últimos anos e projeção até 2030.

Fonte: IBGE (2014)

Fatores como aquecimento econômico e crescimento populacional corroboram para o aumento do consumo de determinados bens, dentre eles, o consumo da energia elétrica. Com base na Figura 1, realizada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2013), que apresenta o consumo de energia elétrica no Brasil entre os anos de 2008 a 2012, verifica-se o aumento da demanda da energia elétrica nos últimos anos para os diferentes consumidores.

| | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | $\Delta\%$ (2012/11) | Part. % (2012) |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------------|-------------------|
| <i>Brasil</i> | 388.472 | 384.306 | 415.683 | 433.034 | 448.117 | 3,5 | 100,0 |
| Residencial | 94.746 | 100.776 | 107.215 | 111.971 | 117.646 | 5,1 | 26,3 |
| Industrial | 175.834 | 161.799 | 179.478 | 183.576 | 183.475 | -0,1 | 40,9 |
| Comercial | 61.813 | 65.255 | 69.170 | 73.482 | 79.238 | 7,8 | 17,7 |
| Rural | 17.941 | 17.304 | 18.906 | 21.027 | 22.952 | 9,2 | 5,1 |
| Poder público | 11.585 | 12.176 | 12.817 | 13.222 | 14.077 | 6,5 | 3,1 |
| Iluminação pública | 11.429 | 11.782 | 12.051 | 12.478 | 12.916 | 3,5 | 2,9 |
| Serviço público | 12.853 | 12.898 | 13.589 | 13.983 | 14.525 | 3,9 | 3,2 |
| Próprio | 2.270 | 2.319 | 2.456 | 3.295 | 3.288 | -0,2 | 0,7 |

Figura 1 - Consumo total de energia elétrica no Brasil entre 2008 e 2012 por classe (GWh).

Fonte: EPE (2013).

Estima-se ainda, segundo a EPE (2013), que o consumo de energia elétrica total no Brasil para o ano de 2020 será de 730,1 TWh, isto é, cerca de 75,64% a mais do que foi para o ano de 2010, evidenciando assim um crescimento exponencial de consumo para este produto. Outro fator significativo que tem contribuído para o aumento do consumo de energia elétrica é a acessibilidade deste bem por novos consumidores, principalmente através do programa federal “Luz Para Todos” que já beneficia cerca de 15,4 milhões de moradores rurais de todo o país pelos dados do Ministério de Minas e Energia (MME) de fevereiro deste ano (MME, 2015).

A matriz elétrica brasileira é baseada na hidroeletricidade, onde cerca de 64,9% da energia elétrica gerada provém deste tipo de fonte (BEN, 2014), mostrando assim grande dependência deste tipo de geração. Desta forma, com os baixos níveis pluviométricos apresentados nos últimos anos e com previsões probabilísticas de baixas precipitações para o ano de 2015 (CPTEC, 2015), além do aumento da demanda por energia elétrica, o Brasil poderá se tornar susceptível a grandes problemas relacionados ao fornecimento de energia, ou seja, problemas como o racionamento de 2001 poderão vir à tona novamente.

Diante deste panorama, a instauração de sistemas energéticos renováveis, como geração de eletricidade através de fontes solar e eólica, são possíveis soluções que poderão ser exploradas tanto para o cenário nacional

quanto em âmbito estadual, haja vista que são fontes de energia renováveis e inesgotáveis, que causam baixo impacto ambiental. Considerando que o cenário energético atual é preocupante e que novas alternativas de geração são necessárias, a principal pergunta a ser respondida é: “As fontes solar fotovoltaica e eólica são capazes de complementar a matriz elétrica do Estado do Paraná?”.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Estudar de que forma as fontes eólica e solar fotovoltaica são capazes de complementar a matriz elétrica no Estado do Paraná.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar levantamento bibliográfico a respeito das fontes alternativas para geração de energia elétrica, com ênfase nas energias solar e eólica;
- Pesquisar os dados referentes ao potencial fotovoltaico no Estado do Paraná;
- Identificar o potencial eólico paranaense e os principais fatores que podem influenciar este potencial;
- Avaliar e obter conclusões a fim de determinar de que forma as fontes solar fotovoltaica e eólica podem complementar a matriz elétrica no Estado do Paraná.

1.4 JUSTIFICATIVA

No Brasil água e energia têm uma forte e histórica interdependência, pois a geração de energia elétrica a partir da energia hidráulica tem contribuído

para o desenvolvimento econômico do país (ANEEL, 2002). No entanto, nos últimos anos o Brasil vem apresentando baixos índices pluviométricos (CPTEC, 2015) o que coloca em cheque esse tipo de tecnologia. Outro aspecto preocupante é que para instalação dessas usinas são exigidas grandes porções de terra. De acordo com a CEPA (1999) para construção da usina de Itaipu foi necessário devastar e inundar uma área 1500 km² de florestas e áreas agricultáveis, ou seja, por mais que a usina de Itaipu e outras usinas hidrelétricas sejam importantes do ponto de vista técnico, capaz de produzir grande quantidade de energia elétrica, os impactos ambientais deixados são incalculáveis.

Com os baixos níveis nos reservatórios verificados através dos dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a solução que vem sendo utilizada é ativação das usinas termelétricas com a finalidade de poupar água, uma vez que elas não dependem de nenhum aspecto sazonal. Entretanto, os custos de operação dessas usinas são onerosos, pois são movidas a combustíveis fósseis, encarecendo assim o preço da tarifa. A partir de 2015, em todos os estados brasileiros, divididos em 5 subsistemas: sudeste, centro-oeste, sul, nordeste e norte, passou a vigorar o Sistema de Bandeiras Tarifárias, em que o custo de geração de energia será repassado ao consumidor, dependendo do tipo de geração utilizado no mês em questão (ANEEL, 2015).

Alheio a questão financeira, de acordo com a ANEEL (2002), a geração de energia elétrica por usinas termelétricas provoca grandes impactos socioambientais, decorrentes da sua mineração, afetando os recursos hídricos, o solo e o relevo das áreas próximas à extração, além do impacto da mineração, a queima do carvão proporciona a emissão de gases poluentes, como por exemplo, o dióxido de enxofre (SO₂) e os óxidos de nitrogênio (NOx).

Logo, as tradicionais fontes da matriz elétrica brasileira não oferecem uma perspectiva animadora para o futuro, além disso, o consumo de energia elétrica no Brasil poderá chegar a 730,1 TWh para o ano de 2020 (EPE, 2013). Desta forma, para suprir essa demanda serão necessários investimentos em outras fontes de geração de eletricidade. As usinas nucleares são capazes de produzir grande capacidade de energia elétrica (CARAJILESCOV e MOREIRA,

2008), porém o risco de operação é muito grande, haja vista os acidentes catastróficos ocorridos em Chernobyl e Fukushima.

Assim, a obtenção de energia elétrica através de fontes solares e eólicas, não é mais um mero objeto de pesquisa, e sim, uma realidade técnica capaz de solucionar um cenário socioambiental preocupante. Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2014) a geração de eletricidade através de módulos fotovoltaicos ou aerogeradores possui diversas vantagens se comparada com outras formas de geração, como, por exemplo, o fato de serem fontes inesgotáveis e com pouco impacto ao meio ambiente.

Outro aspecto relevante para essas fontes, é que a produção de energia elétrica poderá ocorrer próxima ao consumidor no caso da solar fotovoltaica, evitando gastos relativos à otimização dos sistemas de transmissão e distribuição. Além da economia relativa às perdas de energia elétrica durante o processo de interligação até a carga, segundo a EPE (2013) em 2010, 16,8% da energia elétrica gerada foi desperdiçada através de perdas relativas ao sistema de transmissão e distribuição.

Portanto, as fontes solar e eólica constituem importantes soluções técnicas para o uso eficiente de energia elétrica no cenário mundial, nacional e estadual, levando em consideração, também, o aspecto sustentável.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O trabalho será dividido em três etapas. A primeira etapa será a realização de uma pesquisa de referencial teórico através de livros, artigos, revistas científicas e informativos, abordando assuntos relacionados à matriz elétrica global e nacional e a geração de energia a partir de fontes solar fotovoltaica e eólica.

A segunda etapa será realizar o levantamento dos potenciais solar fotovoltaico e eólico no Estado do Paraná, através de mapas e estudos já desenvolvidos por instituições brasileiras. Realizar também o levantamento da curva de carga, ou seja, o consumo médio de energia paranaense mensal e demais dados importantes do Estado.

Na terceira etapa todos os dados obtidos na pesquisa serão avaliados e analisados a fim de obter cenários de complementariedade das fontes solar e eólica na matriz elétrica do Estado do Paraná. Por fim, serão feitas as conclusões finais sobre esta pesquisa.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será estruturado em cinco capítulos:

- 1º Capítulo: Introdução

Definição do tema, apresentação dos problemas e premissas, determinação dos principais objetivos a serem atingidos, exposição da justificativa e dos procedimentos metodológicos, além da demarcação da estrutura do trabalho aliado ao cronograma.

- 2º Capítulo: Referencial Teórico

Apresentação da fundamentação teórica sobre a estrutura da matriz elétrica no mundo e no Brasil, também será abordada maneiras de geração de energia elétrica por fontes renováveis e descritos com maior aprofundamento aspectos de funcionamento, esquemas de montagem e tipos de sistemas para as fontes de energia solar fotovoltaica e eólica. Assim como o potencial brasileiro para a geração de energia elétrica através das fontes solar fotovoltaica e eólica.

- 3º Capítulo: Levantamento e análise da matriz e dos potenciais eólico e solar fotovoltaico no Estado do Paraná

Obtenção da matriz elétrica paranaense, do mapa fotovoltaico e atlas eólico do Estado do Paraná, assim como o levantamento do potencial de geração de energia elétrica através dessas fontes renováveis, e demais informações que possam contribuir para a construção dos cenários do 4º capítulo.

- 4º Capítulo: Estudo da complementariedade entre as fontes eólica e solar fotovoltaica no Estado do Paraná.

Análise de cenários para o estudo da complementariedade das fontes eólica e solar fotovoltaica, para a geração de energia elétrica em comparação com o consumo de energia mensal paranaense.

- 5º Capítulo: Conclusões

Avaliação e análise de todos os dados obtidos na pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MATRIZ ELÉTRICA GLOBAL

As necessidades energéticas não mais se definem basicamente aos aspectos sociais e fatores econômicos predominantes. O conceito de desenvolvimento sustentável se faz tão presente, pois há a necessidade de compreender como a conjuntura energética será dada ao longo do tempo, de maneira que a sustentabilidade dos hábitos corriqueiros seja mantida como se conhece hoje. De acordo com Melo e Czarnobay (2013), o desenvolvimento de novas técnicas e a inserção das mesmas no mercado tecnológico fez-se então uma necessidade inerente ao processo de produção de energia. Para tanto, uma perspectiva deste setor tão complexo e variante deve ser compreendida para que os setores específicos de energia eólica e solar possam ser abordados com o devido aprofundamento.

As disputas comerciais entre grandes corporações detentoras das fontes disponíveis de combustíveis fósseis levam a crer que a energia renovável ainda é um tema pouco pertinente à situação global atual. As petroquímicas, em especial, apresentam um forte apelo econômico e político, mas, como se sabe, são fontes esgotáveis de energia. O relatório *Key World 2014* (IEA, 2014) revela a falta de sustentabilidade na geração de eletricidade global ainda que essa situação seja exaustivamente tratada na mídia e pelas entidades ambientais. Os principais países geradores e consumidores de energia no mundo compõe um grupo denominado OECD ou “Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico”. Segundo o Atlas de Energia Elétrica no Brasil (ANEEL, 2008), é importante, no entanto, compreender que a tendência de consumo de energia (inclusive elétrica) nesses países tende a estabilidade, pois os mesmos têm uma economia estável e um nível de qualidade de vida mais alto se comparado aos demais países analisados nos relatórios estatísticos de energia elétrica globais. Nos países de economia dependente (como os países da América Latina, Ásia e África) a tendência de mudanças bruscas nas matrizes elétricas são maiores, uma vez que ainda buscam melhores condições de consumo para sua população.

Dessa maneira, os dados apresentados no Gráfico 6 demonstram um cenário diferente do ideal, mas a necessidade de mudança do mesmo já é uma preocupação dos países em ascensão. De acordo com Tiepolo *et al.* (2014), até mesmo fontes renováveis como a hidráulica demonstram a perspectiva de sucumbir à pressão popular e ambiental e a tendência é que o uso da mesma estabilize ou diminua no cenário global.

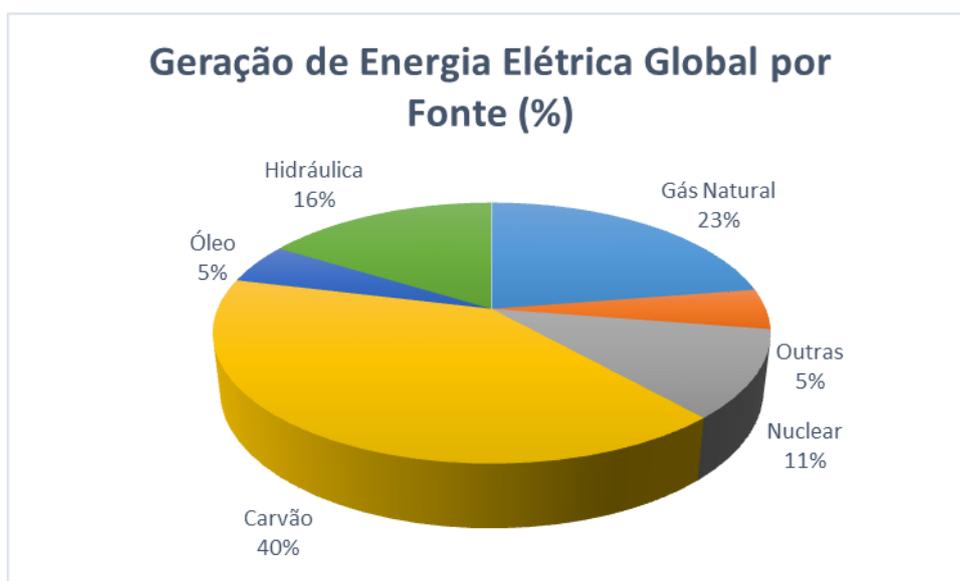


Gráfico 6 – Geração de energia elétrica global por fonte em 2013.
Fonte: Adaptado de IEA (2014)

A China, por exemplo, registra uma tendência ininterrupta de aumento do consumo de eletricidade desde 2008 de acordo com o Atlas de Energia Elétrica no Brasil (ANEEL, 2008), e apesar da principal fonte da mesma ainda ser o carvão, o país já é o líder em investimentos em energia limpa no mundo, prevendo é claro o esgotamento de suas fontes principais. Segundo a Revista Planeta (2010), a perspectiva é que, com o investimento e produção de países como a China, o custo de captação das energias solar e eólica logo serão os mesmos dos referentes aos de combustíveis fósseis, tornando assim, ambientalmente e economicamente viáveis as estruturas de energia elétrica limpa utilizadas no mundo.

2.2 MATRIZ ELÉTRICA NO BRASIL

A matriz energética mundial é, no entanto, bastante diferente da matriz energética brasileira. O país tem um aproveitamento significativo dos seus recursos naturais, de maneira que em comparação aos índices internacionais o Brasil é em predominância um país sustentável energeticamente falando. Como se pode observar no Gráfico 7, de acordo com o Ministério de Minas e Energia o país apresentará cerca de 17% a menos de utilização de petróleo e derivados no montante da sua produção de energia em 2020 - e maximizará sua utilização de energias alternativas ao petróleo até lá.

Matriz energética Brasileira Anos de 2010 e 2020(%)

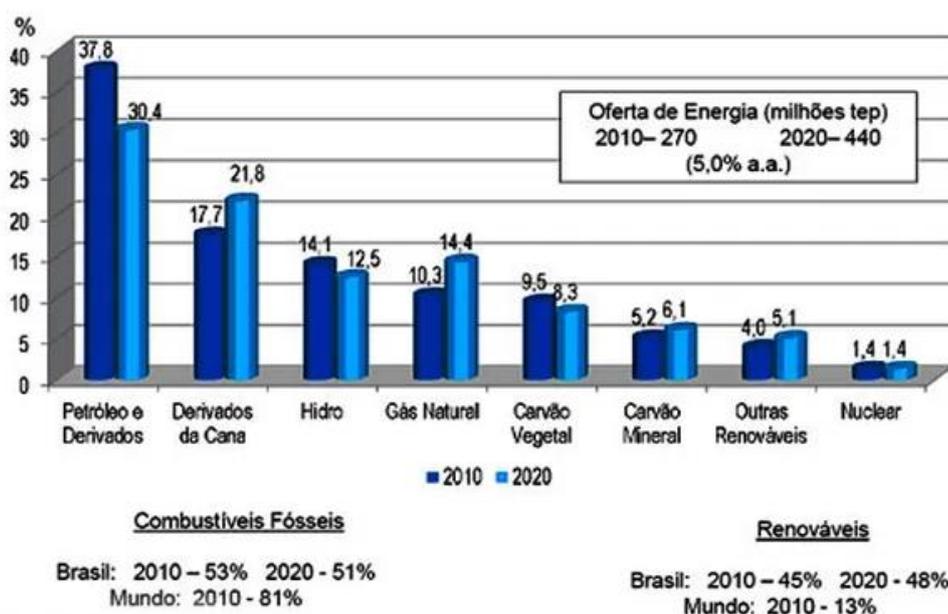


Gráfico 7 - Evolução da matriz energética brasileira de 2010 à 2020.
Fonte: MME (2012)

Com a necessidade de se livrar da dependência energética de combustíveis, a própria indústria vem se articulando de maneira a capacitar e possibilitar a produção de energia elétrica limpa. É claro que com o intuito de continuar com índices crescentes de produção e tendo condições energéticas economicamente viáveis. De acordo com a Confederação Nacional da Indústria

(CNI, 2007), as fontes alternativas mais atrativas para investimento são as de hidroeletricidade, eólica e co-geração em biomassa.

De acordo com Tolmasquim *et al.* (2007), o Brasil tem correspondido à expectativa pelo seu porte ambiental no cenário energético mundial, uma vez que a captação de petróleo em águas profundas, seus parques de geração eólica e hidrelétrica e o sistema de transmissão de energia elétrica em si demonstram sua maturidade energética. Esses sistemas (elétricos) são distribuídos basicamente nas etapas de geração, transmissão e distribuição de energia, sendo esses dados aplicáveis para as redes elétricas global, brasileira e paranaense. De acordo com Garcia *et al.* (2012), a geração elétrica brasileira é dada em sua maioria nas grandes usinas (basicamente hidrelétricas), transmitida por redes de alta tensão e distribuídas em sistemas de baixa e média tensão atingindo assim os consumidores finais.

No Gráfico 8, pode-se ver como está distribuída a matriz elétrica brasileira atualmente. Por seu favorecimento natural e ambiental, o país é dotado de fontes renováveis e utilizadas vastamente na produção de eletricidade. Com esses fatores, o Brasil apresenta uma capacidade de engendrar novas fontes renováveis e fazer delas (assim como da hidráulica) seu principal meio de captação.

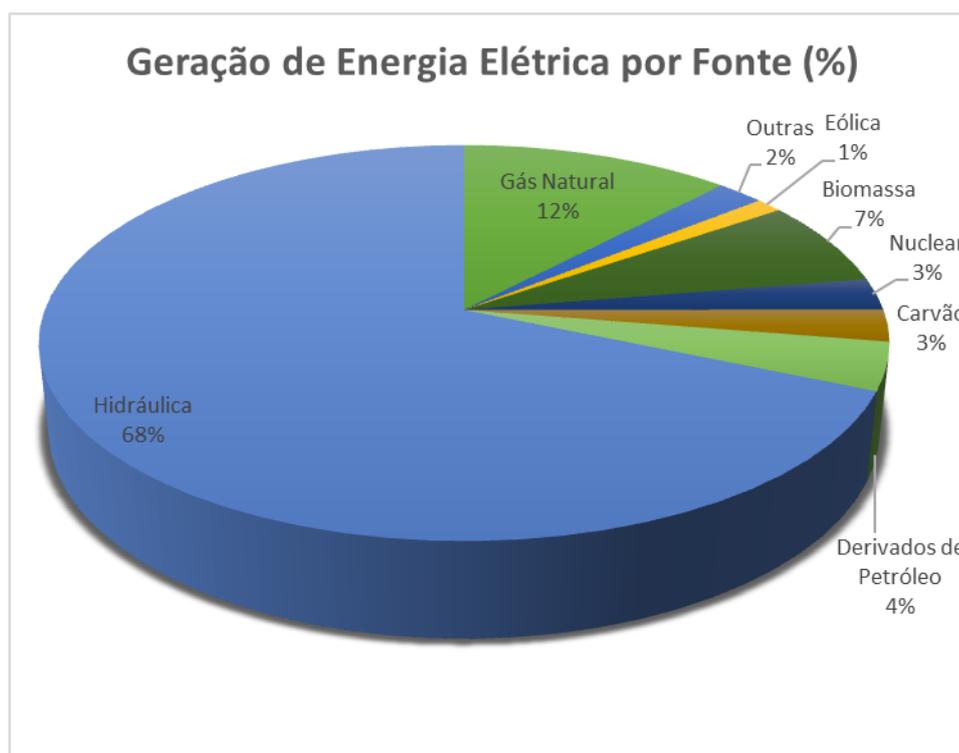


Gráfico 8 - Geração de energia elétrica no Brasil por fonte em 2013.
 Fonte: BEN (2014)

O Balanço Energético Nacional de 2014 (BEN, 2014), cita o crescimento na produção de energias renováveis no país, essas já têm presença significativa do montante da produção nacional. Bem como se pode ver uma linearização ou até decréscimo na utilização das energias não renováveis, como no caso do carvão metalúrgico, que a partir de 2010 teve sua utilização banida do cenário brasileiro. As demais fontes de energia mantêm patamares de estabilidade, mas deve-se correlacionar a utilização dessas fontes à sua disponibilidade e possibilidade de exploração.

Os dados e planejamento referentes à matriz brasileira são responsabilidade do CNPE (Conselho Nacional de Política Energética), também contando com apoio do CEGISE (Comitê de Gestão Integrada dos Empreendimentos de Geração do Setor Elétrico) que fica encarregado da viabilidade de projetos a serem implantados no país. Dentro do CEGISE estão o MME (Ministério de Minas e Energia, mais especificamente dentro deste o EPE), o MMA (Ministério do Meio ambiente) e a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), que regulamenta e licencia ambientalmente os projetos

previstos no planejamento. Com isso, as previsões são feitas de acordo com as perspectivas econômicas, ambientais e empresariais da situação do país.

E tratando-se de economia, a tendência apontada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2013) no âmbito das fontes renováveis para as próximas décadas é que com o crescimento econômico observado nos últimos anos, a demanda de energia cresça em torno de 3,8% do período atual. Já a Eletrobrás (2015) sugere outra visão sobre a matriz energética brasileira: a de racionar e usar sustentavelmente a energia disponível ao invés de monetarizar sua utilização. No plano de 2006 - 2015 a Eletrobrás apresentou um plano de “redução de demanda da ordem de 130 bilhões de kWh em 2015”, gerando uma economia de 34 bilhões de reais. Sustentavelmente falando, a ideia tem uma lógica muito mais interessante do que a de exploração atualmente empregada. Mas o racionamento não pode acompanhar o crescimento tecnológico e industrial planejado por outros setores do mercado brasileiro.

Os setores de pesquisa e desenvolvimento no âmbito elétrico da matriz energética brasileira são bastante avançados, seja para o incremento das fontes renováveis ou não renováveis. O Brasil é, no entanto, um país de proporções continentais e, de acordo com o Balanço Energético Nacional (2014) nem todas as divisões geográficas do mesmo têm perfil energético semelhante. Para tanto, para o objeto de estudo proposto se faz importante focar na matriz paranaense dentro da produção brasileira.

2.3 ENERGIA SOLAR

Nenhuma fonte de geração de energia elétrica é tão abundante como o sol. A energia solar transmitida a Terra é estimada em cerca de 120 mil terawatts, o que representa cerca de 6.000 vezes a demanda mundial por energia elétrica prevista para o ano de 2020, e sobre esta perspectiva, a energia proveniente do sol pode ser considerada virtualmente ilimitada (*National Geographic*, 2012).

A energia solar é transmitida para o planeta Terra através da radiação eletromagnética, cujo meio de propagação é o espaço. As ondas

eletromagnéticas quando incididas sobre determinados materiais, podem produzir alterações nas propriedades elétricas, podendo assim, gerar tensões e correntes elétricas. A produção de eletricidade através da radiação solar é explicada pelo fenômeno físico conhecido como efeito fotovoltaico (VILLALVA *et al.*, 2013). Este fenômeno, relatado por Edmond Becquerel em 1839, explica que com a incidência de radiação eletromagnética proveniente do sol em uma célula formada de camadas de materiais semicondutores surgirá uma diferença de potencial entre as diferentes camadas da célula e se a célula for conectada por dois eletrodos e houver um caminho elétrico entre eles, surgirá a corrente elétrica, conforme demonstra a Figura 2, que ilustra este fenômeno.

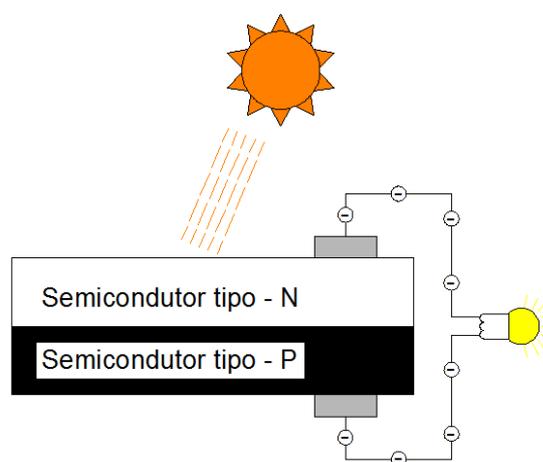


Figura 2 - Exemplificação do efeito fotovoltaico.
Fonte: Adaptado de Villalva *et al.* (2013).

2.3.1 Radiação Solar

Os raios solares são ondas eletromagnéticas paralelas entre si que chegam a Terra em linha reta, todavia, a radiação solar sofre a influência de diversos aspectos ao cruzar a atmosfera terrestre até atingir o solo, desta forma, os raios solares que chegam à superfície horizontal são compostos de várias componentes (VILLALVA *et al.*, 2013).

De acordo com a norma ABNT NBR 10899 – Energia Solar Fotovoltaica – Terminologia, essas componentes da radiação solar são definidas como:

- Albedo: índice relativo à taxa da energia solar, recebida em uma determinada área, devida à refletância dos arredores e do solo onde está instalado um equipamento;
- Radiação direta: radiação solar incidente em uma superfície, sem ter sido espalhada pela atmosfera, podendo ser horizontal ou normal;
- Radiação difusa: potência radiante do céu, recebida em uma determinada área em uma superfície horizontal, excluída a radiação direta;
- Radiação global: potência radiante solar, recebida em uma determinada área em uma superfície horizontal, que é igual à soma da radiação direta mais a radiação difusa (VIANA, 2010).

A Figura 3 exemplifica as componentes da radiação solar.

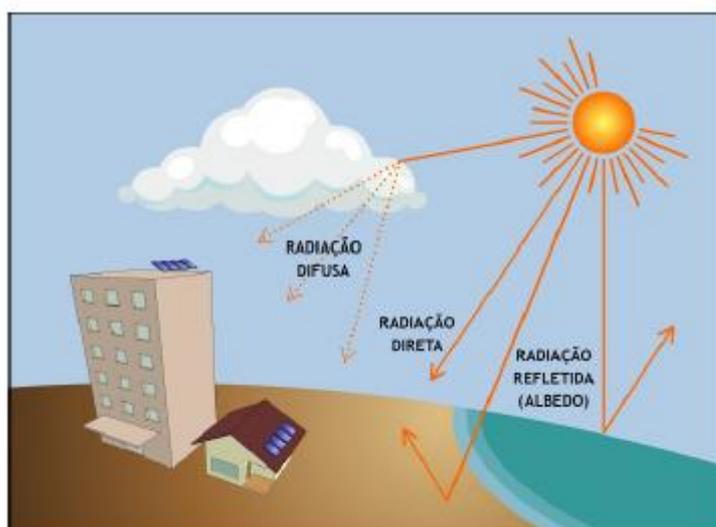


Figura 3 – Componentes da radiação solar.
Fonte: Viana (2010).

Para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, a radiação global não é a mais relevante, e sim, a radiação para o plano inclinado, que consiste na radiação total considerada em uma superfície inclinada. Ao contrário de uma superfície horizontal, uma superfície inclinada também recebe pequena quantidade de radiação refletida do solo. A radiação para o plano inclinado é a mais importante para os projetistas de sistemas fotovoltaicos, pois ela leva em consideração a inclinação dos módulos que devem estar orientados de tal

forma que produza o máximo de energia elétrica. O ângulo na qual o máximo de energia elétrica é obtido é denominado ângulo ótimo, que é determinado principalmente pela latitude do local (SolarGis, 2014).

2.3.2 Conceitos Básicos – Grandezas Físicas

A grandeza empregada para quantificar a radiação solar é a irradiância, e esta é entendida como a densidade instantânea da radiação solar incidente sobre uma dada superfície, normalmente expressa em W/m^2 , ou seja, potência em uma determinada área (SolarGis, 2014).

A indústria fotovoltaica adota $1000 W/m^2$ e temperatura igual a $25^{\circ}C$ como condição padrão de referência de ensaio (do inglês, *Standard Test Conditions* – STC) a fim de especificar e avaliar as células e módulos fotovoltaicos. Desta forma, mesmo que produzidos por fabricantes distintos, estes equipamentos elétricos podem ser comparados numa condição padrão de radiação solar (VIANA, 2010).

Uma grandeza comumente confundida no setor fotovoltaico com a irradiância é a irradiação, muito embora essas grandezas soem como sinônimos, na realidade o seu significado físico é totalmente diferente. A irradiação é a soma da energia solar que incide sobre uma superfície em determinado período de tempo, como, por exemplo, hora, dia, mês ou ano. Essa grandeza é normalmente expressa em Wh/m^2 , isto é, energia em uma determinada área (SolarGis, 2014). A irradiação é muito importante para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos, estações meteorológicas com sensores de radiação solar são empregados para fazer o levantamento da irradiação em vários pontos geográficos do planeta (VILLALVA *et al.*, 2013).

2.3.3 Posição Solar

A posição do sol em relação à Terra é fundamental para determinar a orientação do módulo fotovoltaico, bem como, sua inclinação em relação a superfície de instalação, fatores estes que influenciam de forma direta na produção de energia elétrica (ELECTRÓNICA, 2014).

A produção de energia elétrica ocorre de forma mais eficiente quando os raios solares são projetados perpendicularmente ao plano do painel fotovoltaico, justificando que para a máxima captação de energia elétrica o módulo deve ser ajustado instantaneamente, tanto para sua orientação, quanto para sua inclinação. A melhor maneira de instalar um módulo fotovoltaico fixo, ou seja, sem sistema de rastreamento solar, é orientá-lo com sua face voltada para o norte geográfico para regiões abaixo da linha do equador, ou seja, hemisfério sul, já para o hemisfério norte os módulos fotovoltaicos deverão ser orientados para o sul geográfico. Essas configurações são fundamentais para o melhor aproveitamento da luz solar, devido a maior incidência da radiação solar nos módulos durante o dia e principalmente pela maior incidência no chamado meio dia solar, quando o módulo fica de frente para o sol, isto é, com ângulo azimutal igual a zero (VILLALVA *et al.*, 2013).

A latitude do local influencia diretamente para a escolha do ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico, isso ocorre devido à declinação solar, que é o ângulo dos raios solares com relação ao equador. Esse ângulo só é possível porque o eixo de rotação da Terra possui uma leve inclinação, na ordem de $23^{\circ} 23' 21''$, assim nos solstícios de verão e inverno o ângulo de declinação é máximo, e nos equinócios de outono e primavera o ângulo de declinação é zero. A Figura 4 ilustra o movimento de translação da terra em torno do sol, fenômeno responsável pelas estações do ano e na Figura 5 é possível notar a declinação da terra em relação ao sol, nas estações do ano (VILLALVA *et al.*, 2013).

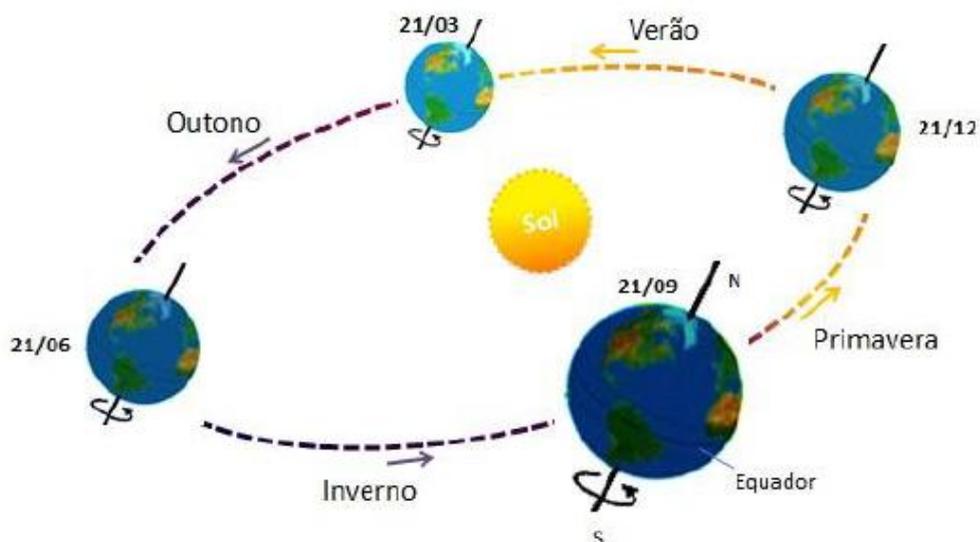


Figura 4 – Movimento anual da Terra em torno do sol.
Fonte: CRESESB (2014).

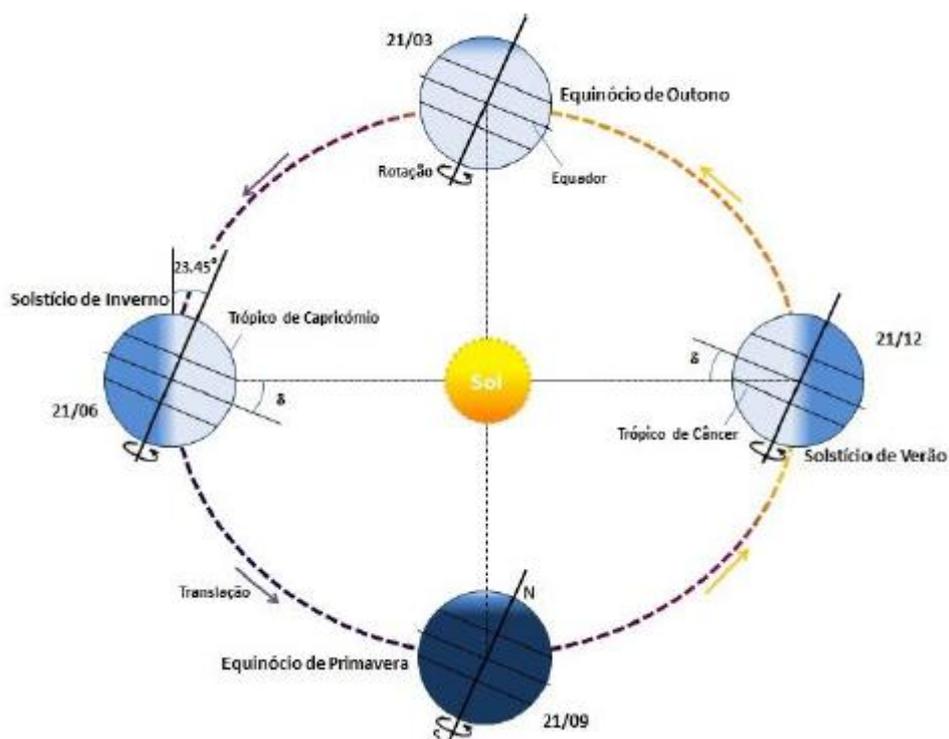


Figura 5 – Exemplo da declinação solar através das estações do ano.
Fonte: CRESESB (2014).

2.3.4 Células e Módulos Fotovoltaicos

O módulo fotovoltaico se caracteriza como a unidade básica do sistema fotovoltaico, sendo composto por células conectadas em arranjos, série ou

paralelo, a fim de gerar corrente e tensão elétrica, essa configuração em arranjo para formação do módulo é fundamental, uma vez que uma célula isolada não é capaz de produzir muita energia elétrica, além disso, a célula apresenta espessura reduzida, necessitando de proteção contra esforços mecânicos e ambientais (MUKERJEE, 2011).

Embora o interesse por fontes alternativas de energia elétrica tenha impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de células fotovoltaicas mais eficientes, a tecnologia com maior inserção no mercado continua sendo a tradicional célula solar dos semicondutores de silício, principalmente por se tratar de um material não tóxico, abundante no planeta Terra e possuir processo de fabricação menos complexo e por menor custo, se comparado a outros materiais (VILLALVA *et al.*, 2013).

Para que um material semicondutor se transforme em uma célula fotovoltaica, existe um processo pelo qual deve passar, inicialmente deve ser purificado seguido por uma etapa de dopagem, através da inserção de impurezas, dosadas na quantidade certa (CRESESB, 2014). Algumas tecnologias de materiais fotovoltaicos são apresentadas a seguir.

2.3.5 Silício Monocristalino

Para a fabricação das células de silício monocristalino, uma série de processos deve ser seguida: após a extração do cristal de dióxido de silício no seu estado mineral, este deve ser submetido a altas temperaturas até a formação de um cristal, este processo é denominado de “processo Czochralski”. O produto resultante desse processo é semelhante a um cilindro, que apresenta estrutura cristalina, brilhante e homogênea, o silício para ser utilizado na indústria eletrônica deve ter alto grau de pureza e baixa densidade de defeitos na rede. Em seguida, este cilindro é serrado e fatiado em finas fatias de aproximadamente 300 μ m, para produção dos chamados *wafers*, e que não possuem inicialmente propriedades de células fotovoltaicas, desta forma, os *wafers* são submetidos a complexos processos químicos de dopagem. Para finalizar o processo de produção da célula, esta recebe uma grade metálica em uma face e uma película metálica na face oposta, por

último, recebe uma camada de material antirreflexivo na face que estará exposta a incidência de luz, uma célula pronta está ilustrada na Figura 6 (JUCÁ *et al.*, 2013).

Para esta tecnologia, a eficiência de conversão de luz solar em energia elétrica está na faixa de 25% (para as melhores células fotovoltaicas fabricadas em laboratório), já na escala industrial sua eficiência está em torno de 16,5%. Esta alta eficiência está ligada ao fato da grande experiência de fabricação para este produto e da pureza do material, no entanto, esta tecnologia apresenta alguns problemas para redução do seu custo final, como, a grande quantidade de material utilizado no processo de fabricação e a demanda de energia elétrica para sua produção (CRESESB, 2014).

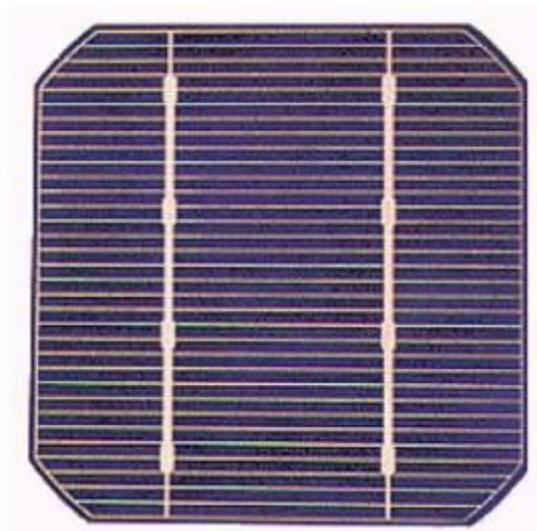


Figura 6 – Célula fotovoltaica de silício monocristalino.
Fonte: Jucá *et al.* (2013).

2.3.6 Silício Policristalino

A célula de silício policristalino é a mais utilizada para fins comerciais como conversor de energia solar em energia elétrica. Para esta tecnologia, o processo de fabricação é mais barato, por se exigir menos rigor para a preparação das células, se comparado com a célula de silício monocristalino. O lingote de silício policristalino diferentemente do monocristalino é formado por uma série de pequenos cristais, de tamanhos e orientações distintas o que ocasionam no produto final uma aparência heterogênea. Após a obtenção do

lingote este é fatiado a fim de se obter lâminas de espessura na ordem de 0,2 mm, que após os processos químicos de purificação, semelhantes às células de silício monocristalino, se transformarão em células fotovoltaicas. As células de silício policristalino alcançam eficiência de conversão inferiores as de silício monocristalino, devido à presença de interfaces entre os vários cristais. Para as células comerciais a sua eficiência varia de 14,5% a 16,2%, todavia, seu custo de fabricação também é inferior, principalmente pela economia da energia elétrica para sua produção (CRESESB, 2014). Na Figura 7 pode-se observar uma ilustração da célula fotovoltaica de silício policristalino.

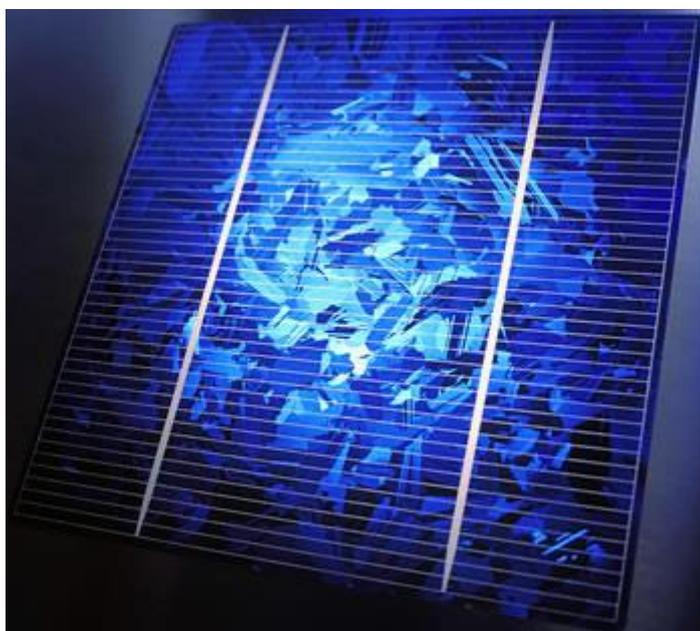


Figura 7 – Célula fotovoltaica de silício policristalino.
Fonte: Eletrobrás (2015).

2.3.7 Filmes Finos

O processo de fabricação das células fotovoltaicas de filmes finos é diferente das células cristalinas, que são produzidas a partir do fatiamento dos lingotes. Nesta tecnologia a produção ocorre pela deposição, que pode ser por vaporização ou outros métodos, de camadas de baixa espessura, podendo chegar à ordem de microns, de materiais semicondutores, sobre uma base que poderá ser rígida ou flexível de dimensões pré-estabelecidas (VILLALVA *et al.*, 2013).

As células de filmes finos apresentam uma série de vantagens em relação às células cristalinas, como: menor quantidade de matéria prima para sua produção, temperatura de fabricação entre 200 e 500°C, em contraste com os 1500°C das células cristalinas, resultando em economia de energia, e simplificação dos processos automatizados devido a menor complexidade da produção, logo, com tais vantagens, o custo desta tecnologia se torna menor. Além disso, os módulos de filmes finos têm um bom aproveitamento em áreas de baixo nível de radiação direta, são menos sensíveis ao efeito da elevação da temperatura sobre os módulos, bem como, não são prejudicados de forma tão intensa pelo efeito do sombreamento, já que a perda da produção de energia elétrica é menor em relação às células cristalinas. Em contrapartida, as células de filmes finos apresentam eficiência em conversão de energia elétrica em torno de 8%, bem menor do que as células cristalinas (VILLALVA *et al.*, 2013). Dentre os materiais mais utilizados para esta tecnologia estão:

- Telureto de Cádmio (CdTe);
- Silício amorfo hidrogenado (a-Si-H);
- Disseleneto de Cobre e Índio (CIS);
- Arseneto de Gálio (GaAs);

Na Figura 8, tem-se a imagem de um módulo de filme fino.



Figura 8 – Módulo de filme fino.
Fonte: Jucá *et al.* (2013).

2.3.8 Características elétricas dos módulos fotovoltaicos

Para seleção do módulo fotovoltaico apropriado a fim de obter a melhor solução para cada sistema particular, é necessário se conhecer uma série de características elétricas, não se restringindo, apenas a potência de pico (Wp), usualmente fornecida pelos fabricantes, dentre as características elétricas mais relevantes estão a tensão de circuito aberto (V_{oc}), a corrente de curto circuito (I_{sc}), a tensão de máxima potência (V_{mp}), a corrente de máxima potência (I_{mp}), o fator de forma (FF) e a eficiência (η). No instante que o módulo está posicionado na direção solar, de tal forma a produzir energia elétrica, e não houver nenhuma carga conectada ao módulo, ou seja, sem fluxo de corrente elétrica, a tensão medida entre os terminais negativo e positivo do módulo fotovoltaico, através de um voltímetro, é denominada tensão de circuito aberto (V_{oc}). Quando os terminais de um módulo fotovoltaico são ligados diretamente, sem qualquer conexão de carga ou equipamento, haverá uma corrente fluindo, que poderá ser medida por um amperímetro, esta corrente é denominada corrente de curto circuito (I_{sc}), sendo a tensão do módulo igual à zero, assim pode-se obter a curva característica da corrente por tensão de uma célula de silício monocristalino, uma curva típica pode ser analisada na Figura 9 (CRESESB, 2014).

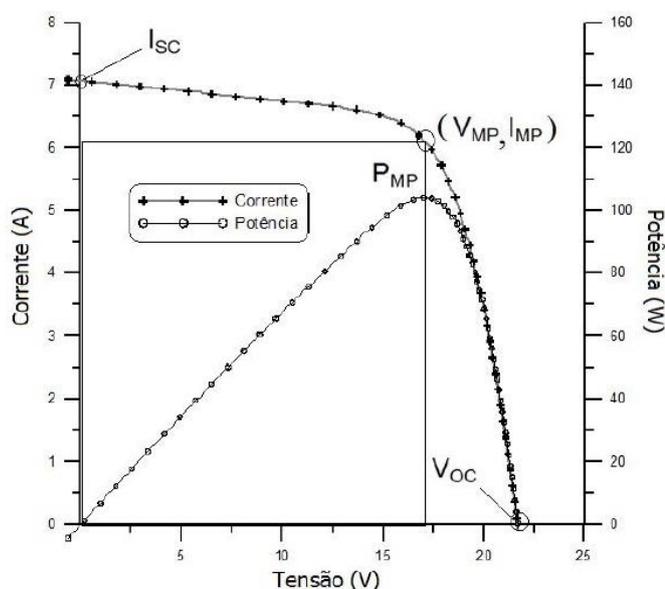


Figura 9 – Curva característica IxV típica de uma célula de silício monocristalino.
Fonte: CRESESB (2014).

2.3.9 Efeitos adversos sobre os módulos fotovoltaicos

Sobre dadas condições, alguns efeitos, como: elevação da temperatura nas células e sombreamento dos módulos pode afetar a produção de energia elétrica, como também, podem prejudicar sua funcionalidade.

2.3.10 Temperatura

A variação da temperatura ambiente interfere na temperatura das células fotovoltaicas, sendo que com o aumento da temperatura a eficiência do módulo se reduz, visto que a tensão diminui consideravelmente e a corrente aumenta de forma moderada (CRESESB, 2014). A Figura 10, mostra curvas IxV para diversas temperaturas, mostrando a influência da temperatura através dos joelhos das curvas.

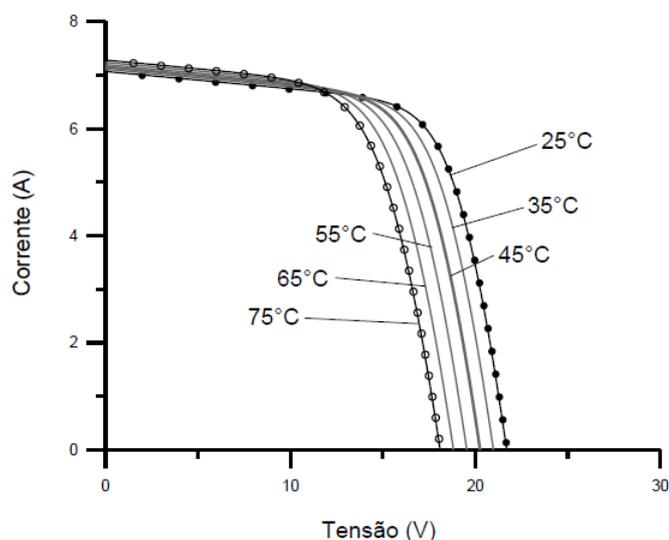


Figura 10 – Exemplificação do efeito causado pela temperatura em um módulo de silício cristalino.
Fonte: CRESESB (2014).

2.3.11 Sombreamento

As células nos módulos fotovoltaicos estão conectadas em série, e deste modo, uma célula depende uma da outra para a produção de energia elétrica. Caso uma célula tenha pouca ou nenhuma incidência de radiação

solar devido o efeito do sombreamento que pode ocorrer através de um obstáculo, como um prédio ou uma árvore, a célula ofuscada poderá comprometer todo o sistema, pois impedirá a passagem de corrente elétrica para as demais células. Uma possível solução para o problema é a instalação de um diodo de bypass em paralelo com a célula ou conjunto de células. Na Figura 11 pode-se obter a comparação entre a curva característica de uma célula de silício monocristalino e os possíveis efeitos sobre a mesma no caso de sombreamento das células, com e sem a utilização de diodos, entretanto nas duas situações a corrente tende a diminuir significativamente, comprovando que o sombreamento pode ser muito prejudicial para as células, especialmente em células sem o diodo (VILLALVA *et al.*, 2013).

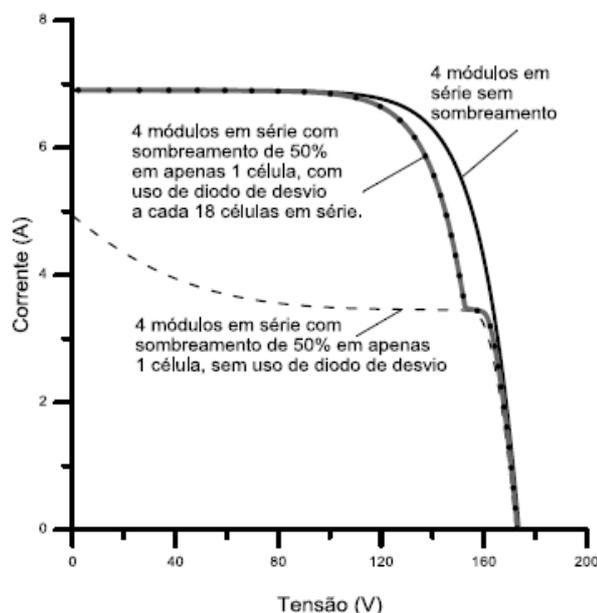


Figura 11 – Efeito do sombreamento sobre as células.
Fonte: CRESESB (2014).

2.3.12 Configurações dos Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos podem ser divididos em três configurações principais: isolados (SFVI), conectados à rede (SFVCR) ou híbridos. A utilização de uma ou outra categoria irá depender de uma série de fatores, como: disponibilidade de recursos energéticos, custo de manutenção, investimento inicial, área demandada entre outros aspectos (CRESESB, 2014).

2.3.13 Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFVI)

Os sistemas fotovoltaicos isolados, também conhecidos como autônomos, são frequentemente utilizados em locais não atendidos pela rede elétrica, logo, este tipo de sistema possui vasta empregabilidade, sendo instalados em diversos locais, como: residências em zonas rurais, áreas de camping, ilhas, sinalização de estradas, na alimentação de sistemas de telecomunicações e no carregamento de baterias de veículos elétricos (VIANA, 2010). Um exemplo de SFVI está ilustrado na Figura 12, em uma ilha deserta de Portugal que utiliza a geração de energia elétrica a partir de sistema fotovoltaico.



Figura 12 – Sistema fotovoltaico isolado na ilha deserta de Faro, Portugal.
Fonte: FFSOLAR (2012).

O SFVI é essencialmente composto de um módulo ou conjunto de módulos fotovoltaicos, uma bateria ou banco de baterias, controlador de carga e inversor.

2.3.14 Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR)

Para o SFVCR o arranjo fotovoltaico comporta-se como uma fonte complementar do sistema elétrico de grande porte ao qual está conectado, para este sistema o armazenamento de energia elétrica através de baterias poderá ser dispensada, porém, há consumidores que optam por incrementar ao

sistema um banco de baterias com a intenção de realizar *back-up* de energia elétrica em caso de alguma falha no sistema elétrico, essa configuração não é racional para consumidores residenciais, uma vez que o uso das baterias encarece o projeto final, porém, torna-se importante para sistemas que necessitam de um sistema UPS (*Uninterruptible Power Supply* – Fornecimento de energia ininterrupta), como o caso de hospitais e centrais de telecomunicações (EWING, 2009).

O SFVCR opera em paralelismo com a rede de eletricidade, e desta forma, as residências e as empresas deixam de serem meros consumidores de energia elétrica e tornam-se, também, produtores. A instalação de SFVCR permite as concessionárias de energia elétrica reduzir os gastos com instalação, manutenção e aprimoramento da rede elétrica. Como forma de incentivo a este sistema, em alguns países, os consumidores que aderirem a esta prática poderão ser remunerados pela eletricidade injetada à rede elétrica. Basicamente um SFVCR é formado por um arranjo de módulos fotovoltaicos, um inversor CC/CA, e um dispositivo eletrônico capaz de realizar o balanço de energia elétrica gerada e produzida, denominado de medidor eletrônico. Uma ilustração básica de montagem de um SFVCR pode ser observada na Figura 13. Outra vantagem desse sistema, fora a produtividade, é o fato de o inversor desligar de forma automática o sistema em caso de alguma falha na rede elétrica, evitando, desta forma, o efeito do ilhamento (URBANETZ Jr, 2010).

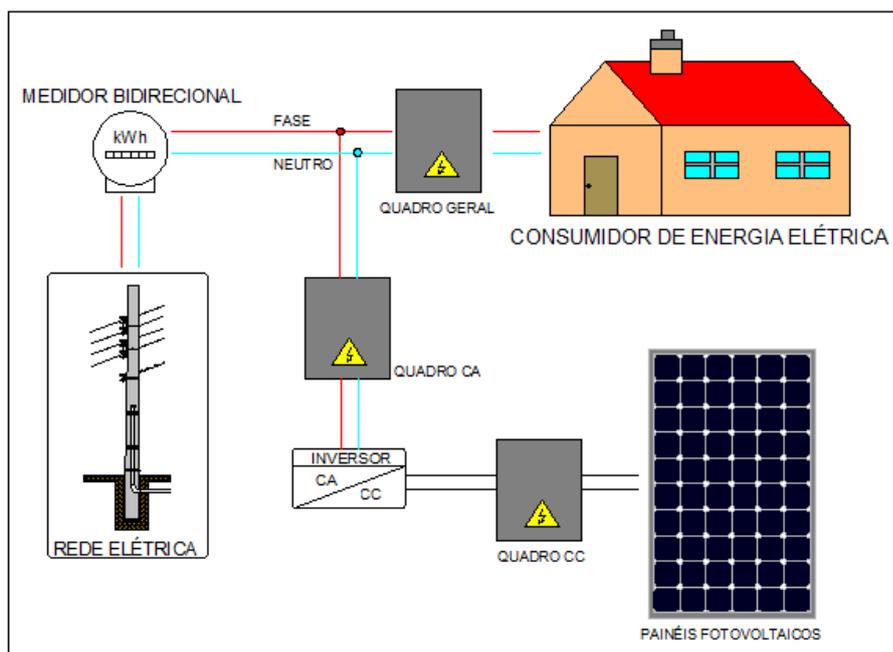


Figura 13 – Diagrama de um sistema fotovoltaico conectado à rede.
Fonte: Adaptado de Villalva et al. (2013).

Existem várias formas de conexão para realizar a medição de energia elétrica, sendo que todas elas deverão atender os requisitos impostos pela concessionária de energia elétrica local quanto à qualidade de energia, levando em conta aspectos como: distorção harmônica, fator de potência e desvio de frequência (CRESESB, 2014).

A variedade das formas de conexão para realizar a medição de energia elétrica, está ligada as formas existentes de tarifação. Em países que adotam o SFVCR essencialmente estão presentes duas formas de sistemas de tarifação: a tarifa *net metering*, modelo adotado no Japão e Estados Unidos, e a tarifa *feed in*, modelo adotado por alguns países europeus. Para a tarifa *net metering*, ou medida da energia líquida, existe pelo menos um medidor eletrônico bidirecional capaz de contabilizar a energia elétrica consumida da concessionária e a energia elétrica exportada para a rede elétrica, sendo que no final do mês o consumidor só irá pagar a diferença entre o que produziu e consumiu. As Figuras 14 e 15 apresentam um exemplo deste modelo de tarifação, sendo a primeira com um medidor bidirecional e a segunda com dois medidores, um de geração e um de consumo (VILLALVA et al., 2013).

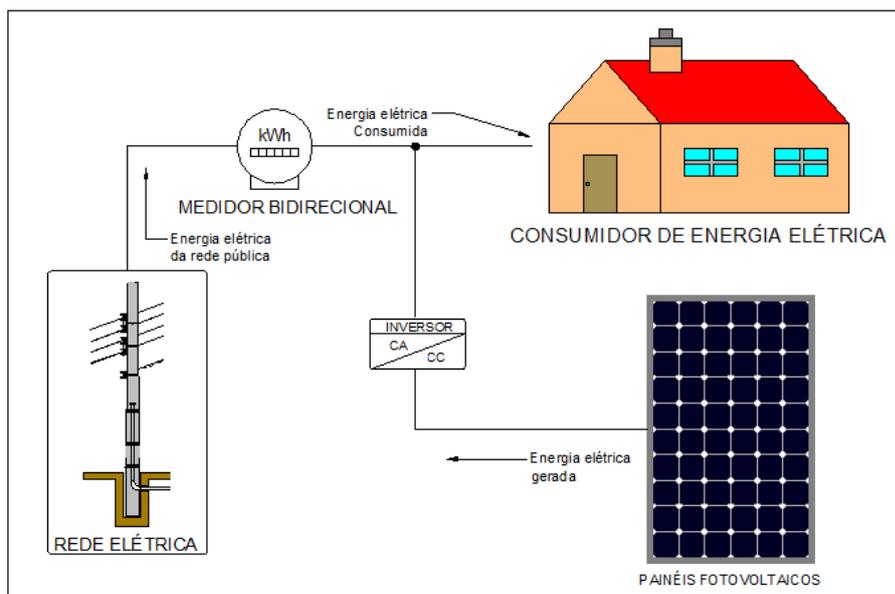


Figura 14 – Sistema de tarifação net metering medidor bidirecional.
Fonte: Adaptado de Villalva et al. (2013).

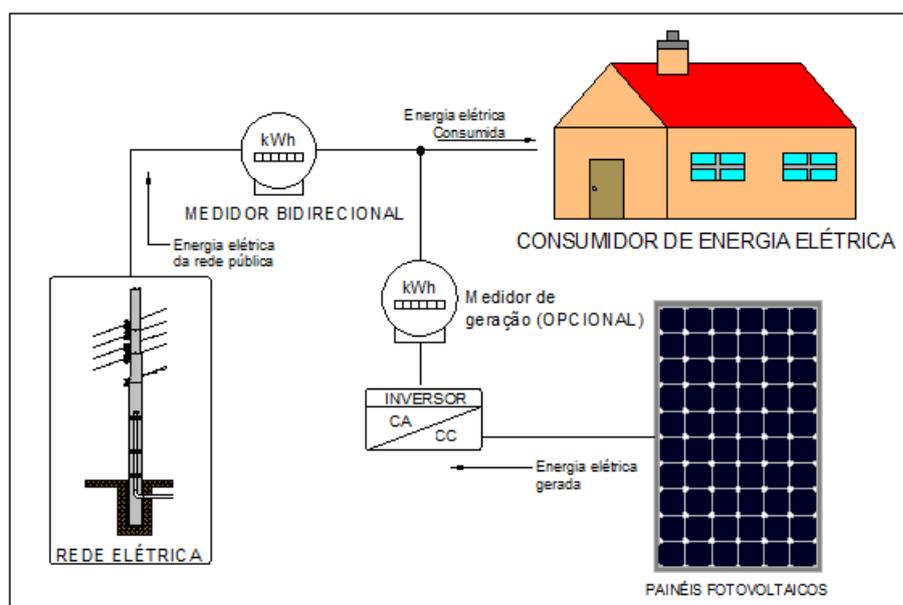


Figura 15 – Sistema de tarifação net metering com dois medidores.
Fonte: Adaptado de Villalva et al. (2013).

A outra forma de tarifação usualmente adotada é o sistema de tarifação *feed in*, que foi desenvolvido na Europa para viabilizar o incentivo a fontes de energias alternativas. Este sistema é equivalente ao modelo *net metering* com dois medidores, porém no sistema *feed in* o consumidor poderá ser compensado financeiramente pela energia elétrica exportada à rede, tornando este modelo de tarifação muito vantajoso e rentável (VILLALVA et al. , 2013). No sistema *feed in* existem três tipos possíveis de tarifas:

- Tarifa de geração: O proprietário do SF recebe pela geração de energia elétrica oriunda de uma fonte renovável, independentemente se a energia elétrica é consumida no local ou injetada à rede.
- Tarifa de exportação: Caso o consumidor produzir mais energia elétrica do que consumir, o proprietário irá receber um valor adicional para cada kWh excedente.
- Tarifa de consumo: O consumidor paga apenas a energia efetivamente consumida, sendo tarifado pelo preço habitual da concessionária do local (VILLALVA *et al.*, 2013).

A Figura 16 representa este modelo de tarifação, mostrando os preços para cada forma de tarifa, gerada, exportada e consumida.

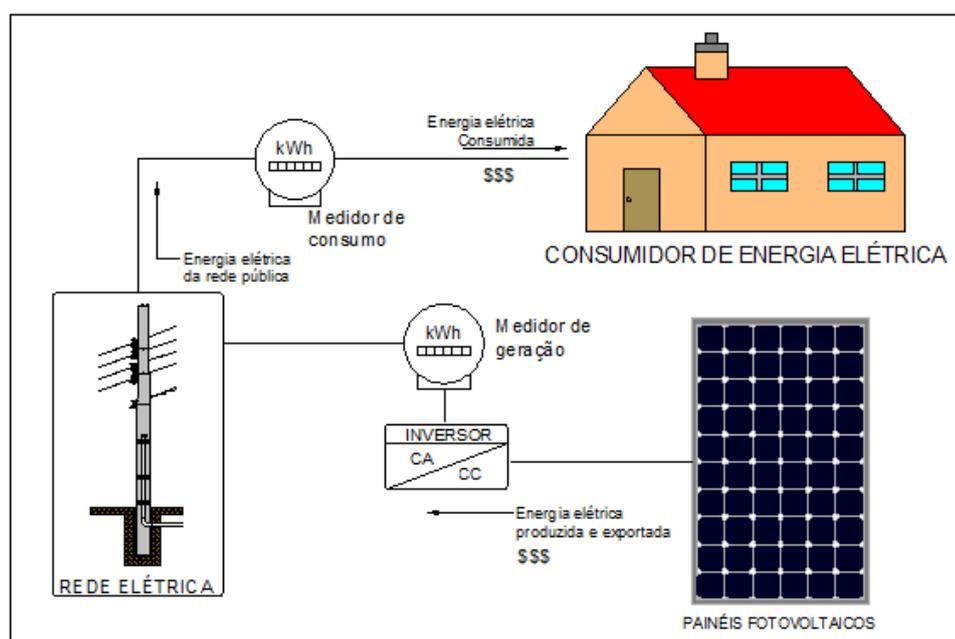


Figura 16 – Sistema de tarifação feed in com compensação financeira.
Fonte: Adaptado de Villalva *et al.* (2013).

2.3.15 Sistemas Híbridos

Os sistemas híbridos são aqueles que quando desconectados da rede elétrica, produzem eletricidade por mais de uma fonte geradora, podendo ser através de um gerador diesel, módulo fotovoltaico, turbina eólica ou outro. Esse

sistema é mais complexo, pois há a necessidade de algum tipo de controle para que as diversas formas de geração atuem de forma compatível, a fim de otimizar a produção de energia elétrica (CRESESB, 2014).

A energia elétrica gerada a partir de um sistema híbrido assume uma forma intermitente, haja vista que são influenciados por fenômenos meteorológicos, porém, o fornecimento de energia elétrica, de maneira geral, deverá ser de forma ininterrupta, justificando o uso de acumuladores de energia (baterias) para este sistema.

2.3.16 Potencial Solar no Brasil

O Brasil possui dimensões continentais, conseqüentemente as suas características climáticas variam consideravelmente de região para região, no entanto, apesar deste fator, a média anual da irradiação global brasileira apresenta valores homogêneos, com médias relativamente altas em todo país se comparado com países do continente europeu. O máximo valor da irradiação global ocorre ao norte do Estado da Bahia, com valores de média diária anual de 6,5 kWh/m². Esses altos níveis de irradiação são devidos principalmente ao clima semiárido e do baixo índice pluviométrico anual. Já os menores níveis de irradiação - 4,25 kWh/m² - ocorrem no litoral da região norte do Estado de Santa Catarina, por conta da precipitação bem distribuída ao longo do ano (Pereira *et al.*, 2006).

As regiões centrais e norte brasileiro recebem maiores níveis de radiação solar durante os períodos de seca, isto é, no outono e inverno, durante o verão a região norte apresenta níveis de irradiação menores que a região sul do país, que é a região com menor nível de incidência solar e com maior variação da irradiação no aspecto sazonal (Pereira *et al.*, 2006).

A irradiação solar sobre o plano inclinado é entendida como aquela que durante o ano possibilita o maior nível de captação de energia solar. Esta demonstra forte influência do albedo da superfície, sendo os maiores níveis encontrados no território brasileiro ocorrem na primavera numa região compreendida entre o nordeste ao sudeste. A Figura 17 demonstra a média anual dos níveis de irradiação para o plano inclinado dentro do território

brasileiro, e a Figura 18 apresenta essa mesma irradiação com base na sazonalidade (Pereira *et al.*, 2006).

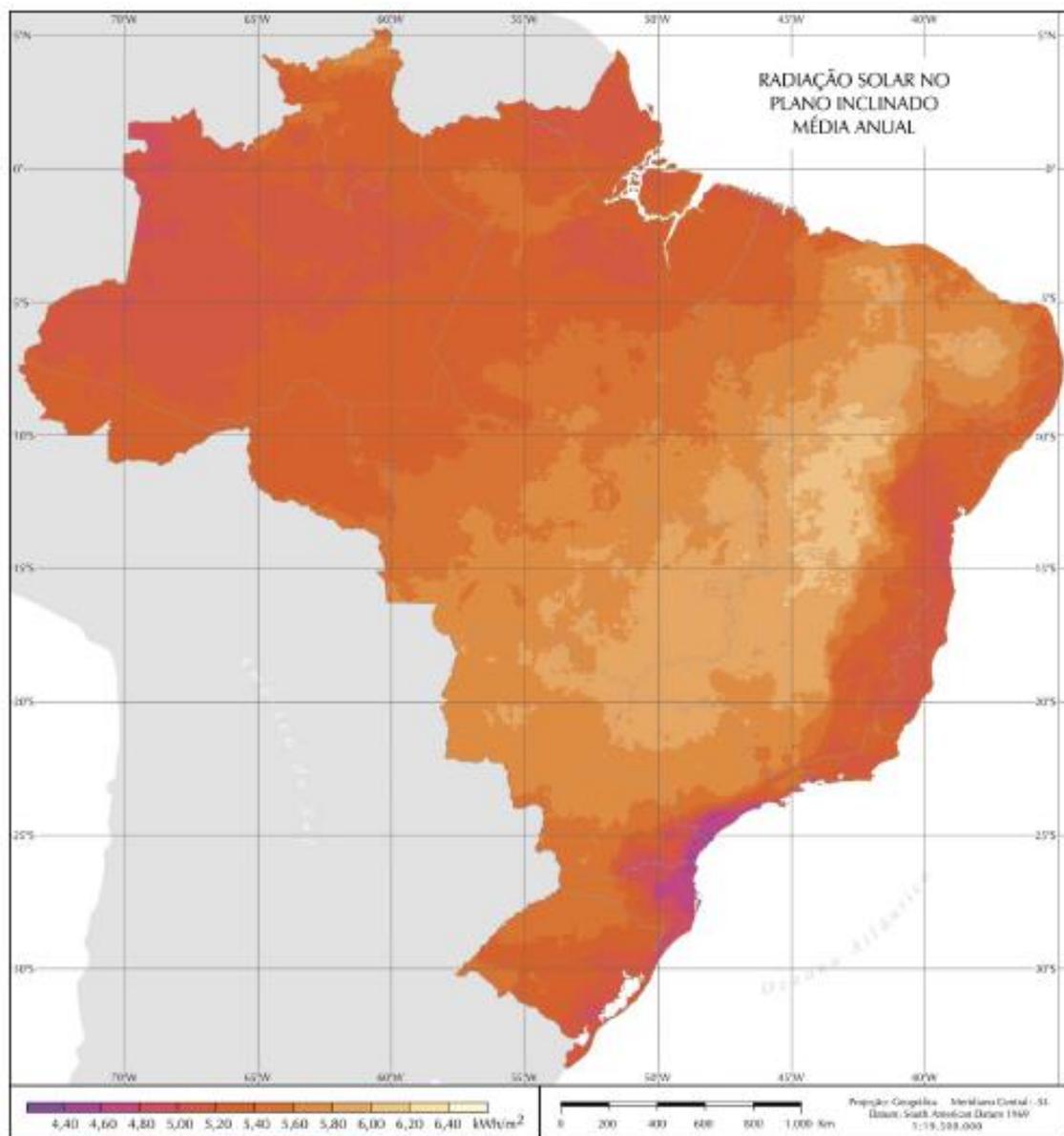


Figura 17 – Mapa de irradiação para o plano inclinado - média anual diária.
Fonte: (Pereira *et al.*, 2006).

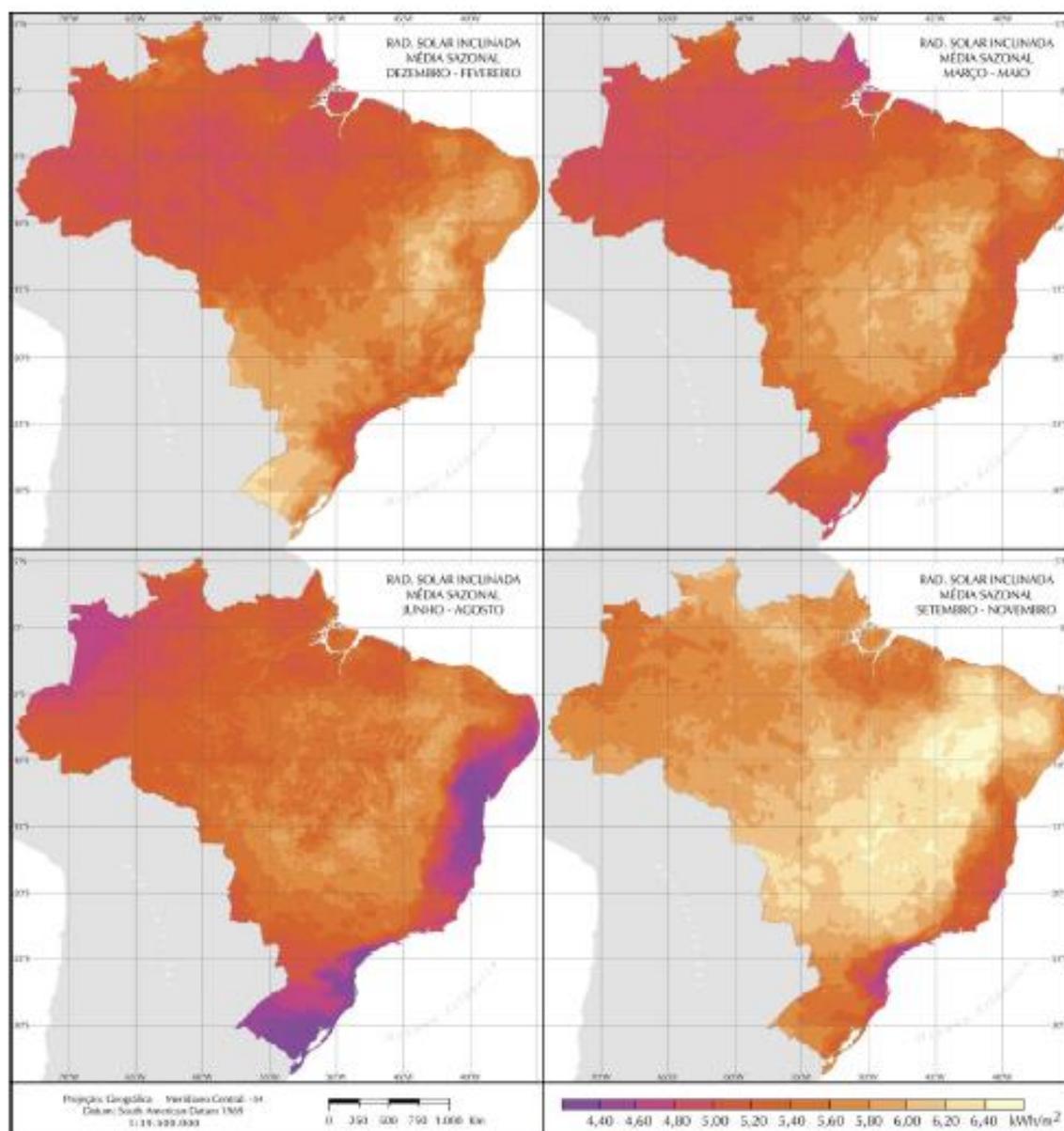


Figura 18 – Mapa de irradiação para o plano inclinado – média diária sazonal.

Fonte: (Pereira *et al.*, 2006).

2.4 ENERGIA EÓLICA

2.4.1 O vento

Segundo o Atlas do Potencial Eólico do Estado do Paraná (COPEL, 2007), o vento é o ar em movimento, gerado pela circulação das camadas de ar da atmosfera provocadas pelo aquecimento desigual do planeta. O vento é

uma grandeza vetorial e na atmosfera o aquecimento está diretamente relacionado pela ação do sol e da rotação da terra. O sol pode contribuir com a radiação, a condução e a convecção e essas transferências de calor são responsáveis pelas condições meteorológicas adversas. Os aquecimentos desiguais na superfície do planeta ocorrem em escala global (diferentes latitudes, estações do ano e ciclo dia e noite) e escala local (mar-terra, montanha-vale), e disto resulta que o vento possui diferentes velocidades e direções apresentando tendências sazonais definidas. O vento ainda é afetado pela altura, relevo e rugosidade do solo, fatores que estão diretamente relacionados com o aproveitamento energético.

No Brasil a circulação geral é como ilustrado na Figura 19, prevalecendo os sistemas de alta pressão Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul e do Atlântico Norte e a faixa de baixas pressões da Depressão Equatorial (CEPEL, 2001).

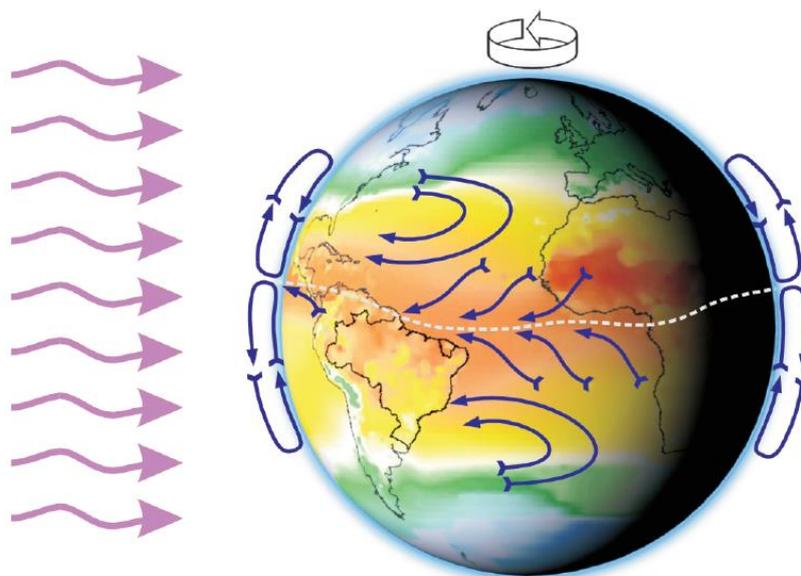


Figura 19 - Circulação geral dos ventos – Brasil.
Fonte: CEPEL (2001).

Ainda podemos ter circulações secundárias do vento, como os furacões, as monções, os ciclones extratropicais, as massas de ar, as frentes, as brisas marítima e terrestre e as brisas do vale e da montanha (Pinto, 2013).

2.4.2 A potência do vento

Segundo COPEL (2007), o vento possui natureza estocástica, pois pode variar tanto na direção quanto na velocidade. Após muitos estudos conseguiu-se encontrar um modelo matemático que relaciona a potência que o vento pode fornecer em função da área, da massa específica do ar e da velocidade, de acordo com a Equação 1.

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot Ar \cdot v^3 \cdot Cp \cdot \eta \quad (1)$$

Onde:

P é a potencia disponível do vento (W)

ρ é a massa específica do ar (Kg/m³)

Ar é a área de secção transversal que é ultrapassada pelo vento (m²) ou área varrida pelo rotor ($\pi D^2/4$, sendo D o diâmetro do rotor)

v é a velocidade do vento (m/s)

Cp é o coeficiente aerodinâmico de potência do rotor

η é a eficiência do conjunto gerador/transmissões mecânicas e elétricas

Por possuir características estocásticas, uma função muito utilizada para caracterizar as estatísticas da velocidade do vento é a chamada função densidade de probabilidade de Weibull, que pode variar com a velocidade “v” do vento em m/s, com “k” e com “c”, onde “k” é o parâmetro ou fator de forma da distribuição dos ventos (adimensional) e “c” é o parâmetro ou fator de escala (velocidade média em m/s). Esta função, conforme Equação 2, tenta representar como é o vento, em média, na localização analisada, ou seja, qual a frequência de ocorrência de uma velocidade. Sendo que valores maiores de k indicam maior constância dos ventos, com menor ocorrência de valores extremos. Valores de k anuais variam tipicamente entre 2 e 3, quando k é igual a 2 a distribuição é conhecida como Rayleigh, os fabricantes de aerogeradores produzem gráficos de rendimento para suas máquinas usando a distribuição de Rayleigh, pois com k igual a 2 a região analisada é uma área com ventos fortes

e constantes e períodos de ventos fracos bem baixos, conforme o Gráfico 9 (Pinto, 2013).

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2)$$

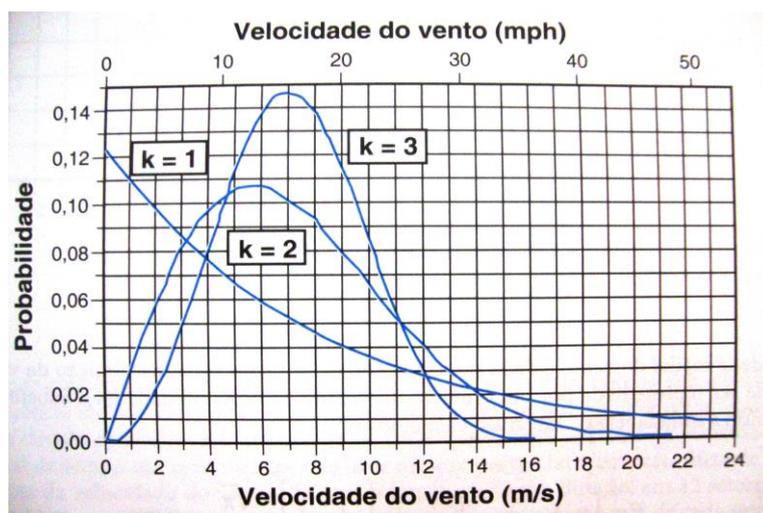


Gráfico 9 - Função Densidade de Probabilidade de Weibull com fator de forma (k) igual a 1, 2 e 3 e fator de escala (c) igual a 8.

Fonte: Pinto (2013).

Outra característica importante no estudo do vento é a sua direção. Segundo Pinto (2013), uma ferramenta conveniente para mostrar a sua direção é a rosa dos ventos. Um exemplo é ilustrado na Figura 20, esta rosa possui 16 direções cardeais, mas pode possuir até 32, em que cada círculo concêntrico representa uma frequência diferente, partindo do zero até frequências mais altas nos círculos mais externos, onde as cores mostram as diferentes velocidades. Esta ferramenta é muito utilizada para a determinação das posições das turbinas eólicas.

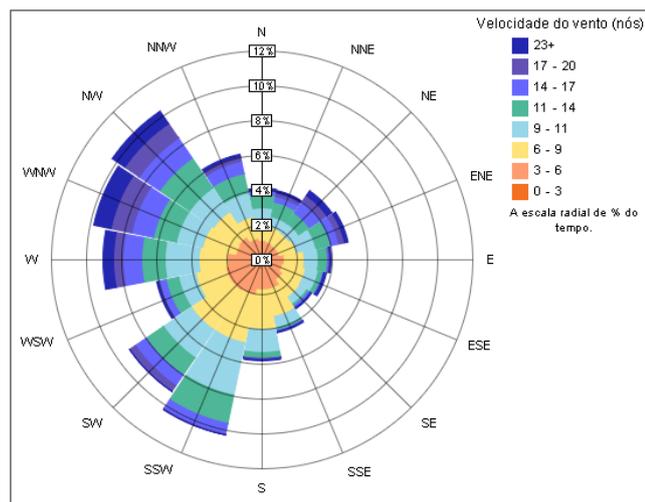


Figura 20 – Exemplo de Rosa dos ventos.
Fonte: Autodesk (2014).

2.4.3 A medição do vento

A velocidade do vento é medida por anemômetros, instrumentos colocados em aeroportos, edifícios, estações meteorológicas e em turbinas eólicas. Existem vários tipos e modelos de medidores, dentre eles os rotacionais (de copo e de hélices), o de pressão, os termelétricos (de fio quente), os a laser e os sônicos (de fase). Os rotacionais são os mais comuns e utilizados nas medidas de energia eólica. Criado em 1846 por John Thomas Robinson, foi aperfeiçoado e hoje possui um sistema digital. A direção do vento é medida pela biruta também chamada de *windvane*, e as informações coletadas são armazenadas pelo *datalogger*. As informações podem ser acessadas remotamente ou localmente, nestas estações de medição ainda podem ser associadas medições de temperatura e umidade do ar (Pinto, 2013).

Outra alternativa para a anemometria é a utilização de sistemas baseados em sensoriamento remoto, que utilizam a técnicas baseadas na emissão do som e da luz em combinação com o efeito doppler. A qualidade das medições eólicas, principalmente da velocidade do vento é fundamental para a construção de um parque eólico, portanto a legislação brasileira exige que antes da construção dos parques seja realizado um estudo de três anos, o levantamento dos dados deve ser feito com anemômetros aprovados por certificados de qualidade em alturas de 50m, 80m e 100m em torres

anemométricas, incluindo assim características sazonais que podem influenciar na geração da energia elétrica (Pinto, 2013).

Conforme Pinto (2013), ainda é possível fazer o projeto de um parque eólico através do método MCP (Medir – Correlacionar – Predizer), que consiste em fazer um relacionamento estatístico entre os dados meteorológicos medidos em estações vizinhas para fazer uma predição da velocidade do vento no local pretendido para a instalação. Para a boa qualidade do resultado é necessário que o tempo mínimo de medição seja de 5 a 10 anos e que o local da medição seja próximo ao de instalação. Além de softwares, como o MesoMap, que foram desenvolvidos para auxiliar os cálculos no planejamento da instalação, pois realizam simulações atmosféricas com base em dados meteorológicos e geológicos de armazenamento.

2.4.4 O terreno e os fatores que influenciam a capacidade de produção

Analisar a topografia e a orografia de um terreno é fundamental para a construção de turbinas eólicas, características que também podem influenciar na velocidade do vento, pois as correntes de ar que atingem a superfície sofrem forças horizontais contrárias ao fluxo incidente e decrescente com a altura. A camada limite corresponde à faixa de ar próxima ao solo que sofre esta influência, possui cerca de 3km de altura e é a camada da atmosfera mais importante, visto que é onde os seres vivos estão e onde os fenômenos meteorológicos ocorrem, gerando assim um perfil do vento que varia com a altura a partir do solo. A camada Prandtl, é a parte da camada limite mais próxima do solo, local onde a torre com a turbina eólica esta inserida, conforme a ilustração na Figura 21 (Pinto, 2013).

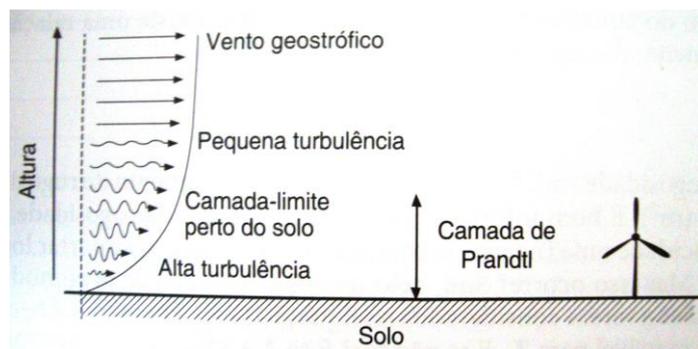


Figura 21 – Área atmosférica na qual uma turbina eólica está inserida.

Fonte: Pinto (2013).

Segundo Pinto (2013), a velocidade do vento cresce com a altura a partir do solo, entretanto para a energia eólica o interesse está em ventos próximos à superfície, em alturas de até 150m, que seria o ideal.

Outras características que influenciam na velocidade do vento e consequentemente no potencial eólico para geração de energia elétrica estão relacionadas com o terreno, a rugosidade e a orografia do solo. A orografia é o estudo das nuances do relevo de uma região, das suas características, a rugosidade se refere à medida das variações deste relevo, ou seja, a irregularidade deste solo. Portanto, pode-se medir a velocidade do vento em diferentes alturas e em diferentes rugosidades do solo através da Equação 3 (Pinto, 2013).

$$V = \left(\frac{Va}{k}\right) \ln\left(\frac{h}{Z_0}\right) \quad (3)$$

Onde,

V é a velocidade do vento (m/s)

Va é a velocidade de atrito (m/s)

k é a constante de Von Kármán (k=0,4)

h é a altura (m)

Z0 é a rugosidade do solo(m)

A Tabela 2 mostra uma classificação da superfície quanto à rugosidade, dados que podem ser utilizados para uma avaliação preliminar de pesquisa e estudo do terreno. Pode-se perceber que superfícies mais planas, como a água possuem menos rugosidade, enquanto áreas mais densas, como

áreas urbanas são mais rugosas. Portanto, superfícies com menor rugosidade são as que possuem um melhor local para a implantação de turbinas eólicas, oferecendo uma velocidade do vento maior e maior eficiência na geração de eletricidade (Pinto, 2013).

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

| Classe | Descrição | Zo (m) |
|---------------|--|----------------|
| 0 | Água (lagos e mares), areia suave ou neve | 0,0001 – 0,001 |
| 1 | Gramma, fazenda com algumas construções ou árvores | 0,01 – 0,03 |
| 2 | Fazendas em terrenos mais abertos | 0,05 – 0,10 |
| 3 | Arbustos, árvores, subúrbios e pequenas cidades | 0,20 – 0,40 |

Fonte: Adaptado de Pinto (2013).

Segundo Pinto (2013), a turbulência e os obstáculos também afetam a potência disponível. As turbulências são variações rápidas e fortes na velocidade do vento, que podem ser influenciadas pela temperatura, pressão, densidade, umidade e o movimento do ar. Os obstáculos como prédios e árvores, podem afetar a velocidade e a direção do vento gerando turbulência.

2.4.5 Aerogeradores

Os aerogeradores ou turbinas eólicas são equipamentos que absorvem parte da energia cinética do vento e a transformam em energia mecânica, que posteriormente é convertida em energia elétrica através de um gerador, e esta energia é então transmitida para a rede elétrica, conforme Figura 22. Desde 1980, com as primeiras turbinas eólicas comerciais, seu design, desempenho e eficiência tem se desenvolvido muito. As turbinas atuais contam com modernos sistemas de controle, que posicionam as pás no sentido de maior eficiência e direção do vento, esses sistemas são conhecidos como controle de passo (*pitch control*), que mudam o ângulo das pás e podem até girar ou dar uma guinada na pá (*yawing*), (Pinto, 2013).

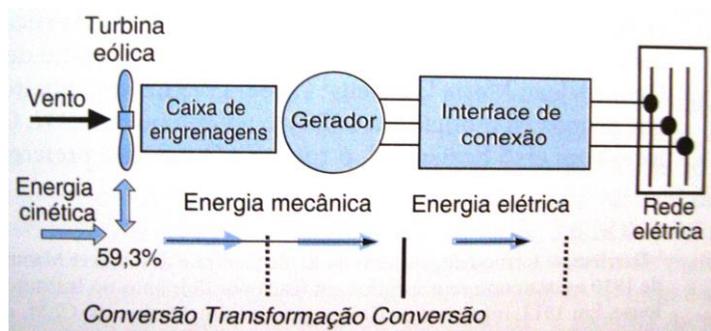


Figura 22 – Princípio da conversão da energia cinética do vento em energia elétrica.

Fonte: Pinto (2013).

Segundo o Centro de Energia Eólica (2015), os principais componentes dos aerogeradores são: a torre, a nacelle, a caixa de câmbio, o cubo, as pás, os mecanismos de controle, o anemômetro e o gerador representado na Figura 23 (Pinto, 2013).

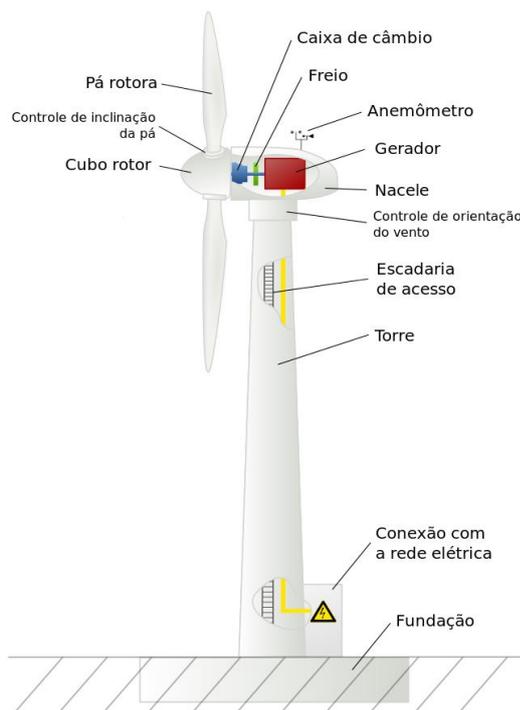


Figura 23 – Principais partes de um aerogerador.

Fonte: Adaptado de Wikimedia (2015).

A torre é a estrutura de sustentação, que pode ser construída de aço e concreto (tubulares cônicas) ou de aço (treliçadas), sendo mais comuns as tubulares de aço. A nacelle é a estrutura em cima da torre onde estão contidos o gerador, a caixa de câmbio e os freios, além dos medidores de velocidade do

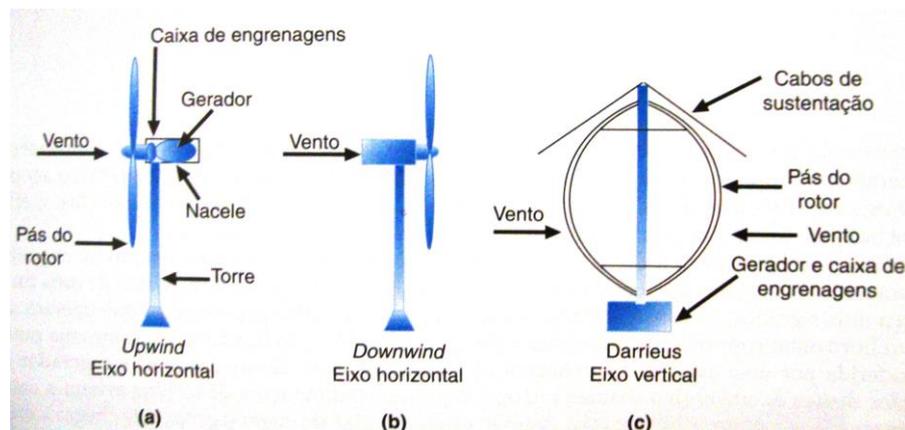
vento e da sua direção. A caixa de câmbio ou engrenagens é utilizada em turbinas para o controle de velocidade, através de engrenagens, mancais e eixos de acoplamento. O cubo é a estrutura na qual são fixadas as pás. As pás são as estruturas movimentadas pelo vento, podendo chegar a até 75m de comprimento cada uma. Os mecanismos de controle são responsáveis pela orientação da turbina. O gerador é a máquina responsável pela produção de energia elétrica e no Brasil geram com uma frequência de 60Hz, alguns aerogeradores ainda possuem mais de um gerador em suas turbinas (Centro de Energia Eólica, 2015).

Quando ocorre a conversão de energia mecânica em elétrica tem-se um gerador, caso contrário a máquina é um motor. A lei de indução de Faraday explica o funcionamento físico de qualquer máquina, é a força eletromotriz produzida pela variação de um campo magnético, nas partes fixas e móveis da máquina, o estator e o rotor, respectivamente. Dentre as máquinas rotativas existem as máquinas CA (Corrente Alternada) e as máquinas CC (Corrente Contínua), nos geradores dos parques eólicos as máquinas mais utilizadas são as de CA, visto que as máquinas CC são inconvenientes, pois necessitam de mais manutenção, possuem uma potência desfavorável e não são adequadas para enrolamentos de alta tensão, as de corrente contínua geralmente são utilizadas em sistemas isolados e em sistemas de pequeno porte acoplados às construções (Pinto, 2013).

Segundo Pinto (2013), os geradores CA podem ser divididos em assíncronos (ou de indução) e síncronos. Os assíncronos podem ser divididos de acordo com sua montagem, em máquinas do tipo gaiola de esquilo ou com rotor bobinado, e os síncronos subdivididos em geradores de rotor bobinado ou de imã permanente. Logo, existem várias possibilidades de implementar um gerador junto a uma turbina eólica e assim realizar a produção de energia elétrica. Portanto, as configurações devem ser estudadas para a melhor aplicabilidade ao projeto, segundo o Portal Energia (2014) a quantidade de eletricidade que pode ser gerada pelo vento em um aerogerador depende de quatro fatores: a quantidade de vento que passa pelas pás, o diâmetro da hélice, a dimensão e o tipo do gerador e o rendimento de todo o sistema.

As turbinas ainda podem ser classificadas em termos do eixo ao redor do qual as pás das turbinas giram, podendo ser verticais e horizontais. Na

Figura 24, pode-se notar a diferença, em (a) está representado uma turbina de eixo horizontal com a direção do vento *Upwind*, ou seja, com a incidência do vento diretamente sobre as pás, na figura (b) temos a mesma turbina de eixo horizontal, porém com o vento *Downwind*, ou seja, com o vento em direção posterior das pás e em (c) uma turbina de eixo vertical (Pinto, 2013).



**Figura 24 – Turbinas de eixos horizontal (a e b) e vertical (c).
Fonte: Pinto (2013).**

As turbinas de eixo horizontal são as mais utilizadas, pois a velocidade do rotor na saída de potência pode ser controlada pelo ângulo das pás, e sua eficiência é maior, além de atingir ventos mais altos e com maior velocidade. Associadas à incidência de vento *Upwind*, são as melhores e mais modernas turbinas, apesar de possuir algumas desvantagens como a dificuldade de instalação e transporte pelo tamanho do equipamento e a complexidade de instalação e de sistemas de controle desta turbina (Pinto, 2013).

Segundo Pinto (2013), as turbinas de eixo vertical são mais antigas e possuem as vantagens de não necessitar de nenhum controle de ajuste para manter as pás na direção do vento e possuir as engrenagens e geradores no chão, facilitando a manutenção, entretanto as desvantagens estão em que as pás ficam muito próximas do solo, atingindo ventos muito fracos e ainda com muitas turbulências, o que diminui em muito a eficiência. São muitos os modelos criados de turbinas verticais, entre eles estão o rotor de Darrieus, o rotor de Savonius, o rotor Solarwind, o rotor Helicoidal, o rotor Noguchi, o rotor Maglev e o rotor Cochrane, ilustrados na Figura 25 respectivamente, pode-se perceber que cada um possui uma disposição e formato das pás diferentes,

entretanto nenhuma dessas combinações conseguiu atingir a eficiência das turbinas horizontais nem mesmo o rotor de Darrieus, que foi o que teve algum sucesso comercial, por apresentar diferenciais, como variações nas disposições das pás, como pás em forma de H, de delta, de diamante, de Y e de Phi.

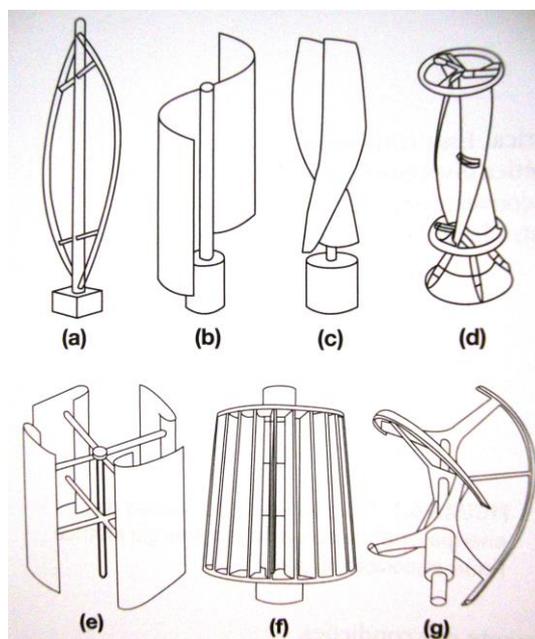


Figura 25 – Vários modelos de turbinas de eixo vertical. (a) Darrieus; (b) Savonius; (c) Solarwind; (d) Helicoidal; (e) Noguchi; (f) Maglev e (g) Cochrane. Fonte: Pinto (2013).

O sucesso das turbinas eólicas horizontais, também se deve ao desenvolvimento constante dos materiais utilizados nas pás, ao número de pás e a aerodinâmica dessas pás. O material utilizado nas pás antigamente era a madeira, atualmente o material utilizado é o mesmo de aeronaves, as fibras de vidro e carbono com alta elasticidade e rigidez, capazes de suportar fadiga e corrosão. Outro fator é o número de pás, turbinas que possuem muitas pás operam com menor velocidade, as turbinas com três pás são ideais, pois apresentam operação suave e são mais silenciosas, além da aerodinâmica das pás, ou seja, as estruturas geométricas são especificadas para aumentar a eficiência mecânica (Pinto, 2013).

2.4.6 Energia Eólica *Onshore*

Segundo CER (2014), a energia eólica *Onshore* é a mais utilizada em todo o mundo e corresponde aos sistemas localizados fisicamente em terra, geralmente em áreas costeiras ou de alta incidência de ventos de superfície. Os principais requisitos para esta tecnologia estão relacionados com a disponibilidade de grandes áreas e com grandes potenciais de vento, sendo que as grandes dificuldades encontradas por esta tecnologia são sobre os custos de investimento, a volatilidade do vento e o acesso à rede.

Segundo Pinto (2013), a instalação de uma turbina *Onshore* deve levar em consideração um sistema de para-raios, devido à altura das torres e possuir um bom aterramento. A fundação da torre é determinada pelo tamanho da turbina e pelas condições locais do terreno.

A energia eólica apesar de não emitir gases e resíduos, também pode gerar impactos ambientais, como o impacto visual nas paisagens rurais, o impacto sonoro com emissão de ruídos, os impactos com pássaros e impactos devido à interferência com ondas eletromagnéticas, como ondas de TV e rádio (Pinto, 2013).

2.4.7 Energia eólica *Offshore*

Segundo Pinto (2013), o termo eólico *Offshore* se refere à produção de energia elétrica a partir de turbinas instaladas sob uma superfície aquática (mar, oceanos ou lagos). Somente em 1990 a primeira turbina eólica *Offshore* foi instalada na Suécia e em 1991 o primeiro parque eólico na Dinamarca, a partir desta data outros empreendimentos foram desenvolvidos, portanto trata-se de uma tecnologia recente e concentrada praticamente nos países da Europa e em dois países asiáticos, a China e o Japão, enquanto no Brasil ainda não há parques eólicos *Offshore*.

A construção e a manutenção de um parque eólico *Offshore* tem um custo superior ao de um parque *Onshore*, este acréscimo se deve principalmente ao maior custo da infraestrutura da turbina, fundação e cabos

de transmissão, entretanto por suas dimensões e maiores velocidades do vento, são turbinas mais eficientes que as turbinas *Onshore*. O tipo de fundação das turbinas *Offshore* depende da profundidade do local da torre, geralmente varia entre 30 e 80 m, sendo composta por tubos de aço de 2,5 a 4,5 m de diâmetro (Pinto, 2013).

Outra característica que diferencia um parque *Offshore* do *Onshore* é a conexão com a rede. Segundo Pinto (2013), nos parques *Onshore* a conexão tipicamente é em corrente alternada, já no caso *Offshore* a conexão pode ser em corrente alternada ou em corrente contínua. No caso da transmissão em corrente contínua, é utilizada em projetos que estão muito distantes dos centros consumidores, pois assim as perdas serão reduzidas e o número de cabos também é menor. Entretanto, a desvantagem está na construção de grandes estações de conversão CC para CA. Além disso, em turbinas *Offshore*, em alguns casos é necessária a construção de subestações em plataformas *Offshore*, o que encarece muito o projeto devido à complexidade de instalação e manutenção.

A tendência é que ocorra um aumento significativo na construção de turbinas *Offshore*, pois possuem um menor impacto ambiental e o seu potencial é maior que de turbinas *Onshore*, além da menor dificuldade de transporte de equipamentos. O impacto visual é reduzido, com turbinas instaladas longe da costa e os ruídos também diminuem além das linhas de transmissão estarem submersas (Pinto, 2013).

2.4.8 Conexão com a rede

Um parque eólico pode ser conectado à rede elétrica e atuar como uma usina geradora de eletricidade. Entretanto muitas características devem ser avaliadas e analisadas para a conexão com a rede, considerando o fator de potência, o fornecimento de energia ativa, a frequência de operação, a capacidade de curto circuito em caso de faltas na rede, os sistemas de proteção, como também limites em relação aos harmônicos e *flickers* (variação da velocidade da turbina, devido a flutuações nas condições do vento) na

qualidade da energia injetada. Necessitando desta forma de toda uma documentação técnica e da permissão dos operadores do sistema de transmissão para a sua interligação ao Sistema Interligado Nacional (SIN). É preferível que as linhas de transmissão estejam próximas dos parques eólicos, para diminuir perdas e custos, a conexão depende da potência instalada na rede e a tensão desta linha, logo de acordo com o nível de tensão os parques podem ser conectados em redes de baixa tensão, média tensão, alta tensão e raramente em extra alta tensão e ultra alta tensão (Pinto, 2013).

Segundo Pinto (2013), normalmente os parques eólicos estão instalados em áreas remotas com baixa densidade populacional, necessitando um dimensionamento correto e preciso dos seus condutores. A energia eólica pode contribuir para o despacho de energia, principalmente em horários de pico, entretanto a imprevisibilidade do vento pode interferir nesta geração sendo, portanto, uma fonte de complementação integrada ao sistema de energia.

Segundo a ABEEólica (2014), além da geração centralizada com grandes usinas e distantes do consumidor final, existe a geração distribuída que adota pequenas fontes localizadas próximas ao consumidor (residencial, comercial e industrial), a geração distribuída incentiva a utilização de energias renováveis em pequena escala, com potencial redução de perdas, investimentos na rede elétrica e aumento da segurança energética por meio da diversificação das fontes geradoras. A geração distribuída é normalmente desenvolvida com políticas de incentivo, como por exemplo, as tarifas *Feed-In*, muito utilizadas na Europa, em que o consumidor pode vender a energia excedente produzida para a concessionária de energia. No Brasil esta política ainda não existe, mas a resolução normativa nº 482 na Aneel, estabeleceu o *Net Metering*, regulamentando a conexão da microgeração (até 100 kW) e a minigeração (de 100 kW até 1000 kW) de pequenos consumidores, utilizando o sistema de compensação de energia elétrica com medidores eletrônicos bidirecionais, onde o consumidor instala pequenos geradores na sua unidade consumidora e injeta energia na rede de distribuição em troca de créditos de energia que serão utilizados quando não houver consumo.

Os geradores da geração distribuída devem ser de fontes incentivadas (hídrica, solar, biomassa, eólica e cogeração), onde os geradores eólicos

podem ser chamados de sistemas eólicos de pequeno porte (“*small wind*”), integrados principalmente à edificação, são compostos por turbinas eólicas pequenas em tamanho e em capacidade de geração e por inversores que adequam a energia gerada às características da rede elétrica convencional. Para ter acesso à geração distribuída é preciso apresentar um projeto à distribuidora, se aprovado o cliente poderá realizar a instalação, inclusive do medidor, sendo este custo de sua responsabilidade. Este sistema também chamado de *Grid-Tie* é composto pelo aerogerador, pelo inversor e o medidor bidirecional, funcionando conforme a Figura 26 (Viridian, 2014).

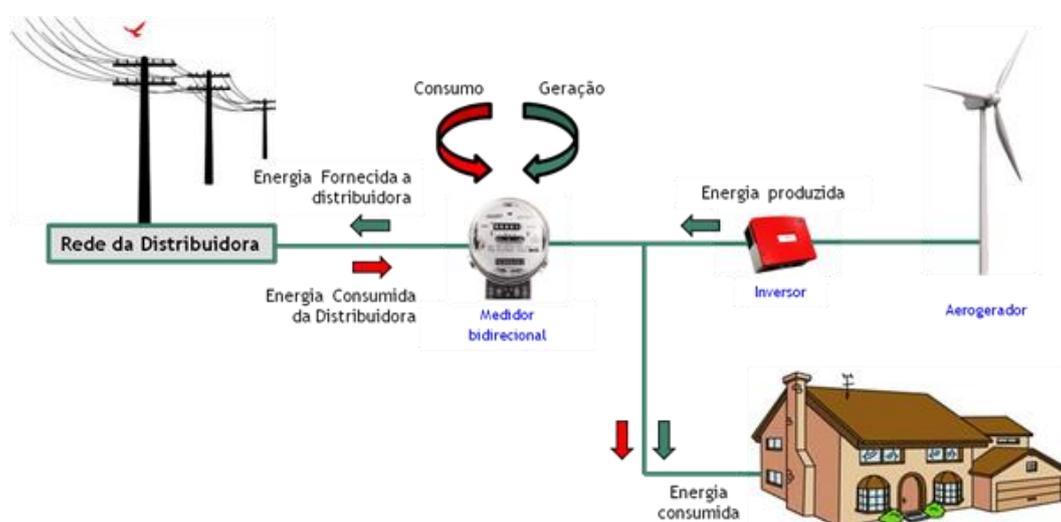


Figura 26 – Sistema de geração eólica conectada à rede.
Fonte: Viridian (2014).

2.4.9 Sistema isolado

Os sistemas isolados ou autônomos (*Off-Grid*), são caracterizados por não estarem conectados à rede elétrica, atendendo comunidades isoladas que não tem acesso à rede. O sistema abastece diretamente os aparelhos que utilizarão a energia elétrica, e é composto de maneira simplificada por quatro componentes: o aerogerador, os controladores de carga que garantem o correto abastecimento das baterias, evitando a sobrecarga, os inversores que convertem a energia CC em CA e elevam a tensão e as baterias que estão agrupadas em conjunto, capaz de armazenar a energia gerada que não foi

utilizada e em momentos em que o vento não esteja presente para geração e o consumidor necessite de energia elétrica. Este sistema pode ser observado na Figura 27 (Viridian, 2014).

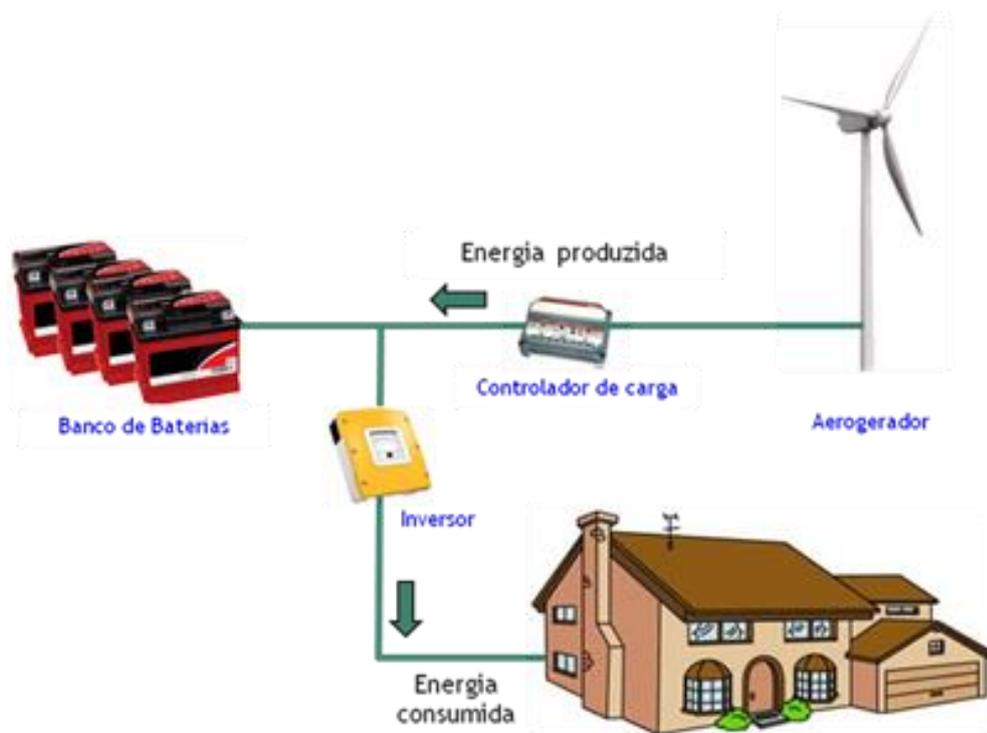


Figura 27 – Sistema de geração eólica isolada.
Fonte: Viridian (2014).

2.4.10 Potencial Eólico Brasileiro

De acordo com o estudo apresentado no “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro”, fica evidente a tendência à velocidades maiores de vento no litoral brasileiro e também em regiões do interior favorecidas por relevo e baixa rugosidade, ou seja, regiões estas mais propícias à instalação de sistemas eólicos para geração de energia elétrica (CEPEL, 2001).

De acordo com o CEPEL (2001), o Brasil apresenta diferentes climas que variam do equatorial na região Norte, ao subtropical na região Sul, esta diferença se deve à extensão em latitude do país. A Figura 28 apresenta as médias climatológicas sazonais de precipitação, temperatura e de vento a 50m, ilustrando a complementariedade sazonal entre o potencial eólico e o hídrico

(associado aos índices pluviométricos), pois a precipitação é elevada nos meses de dezembro a março, enquanto a velocidade dos ventos é alta em períodos de seca.

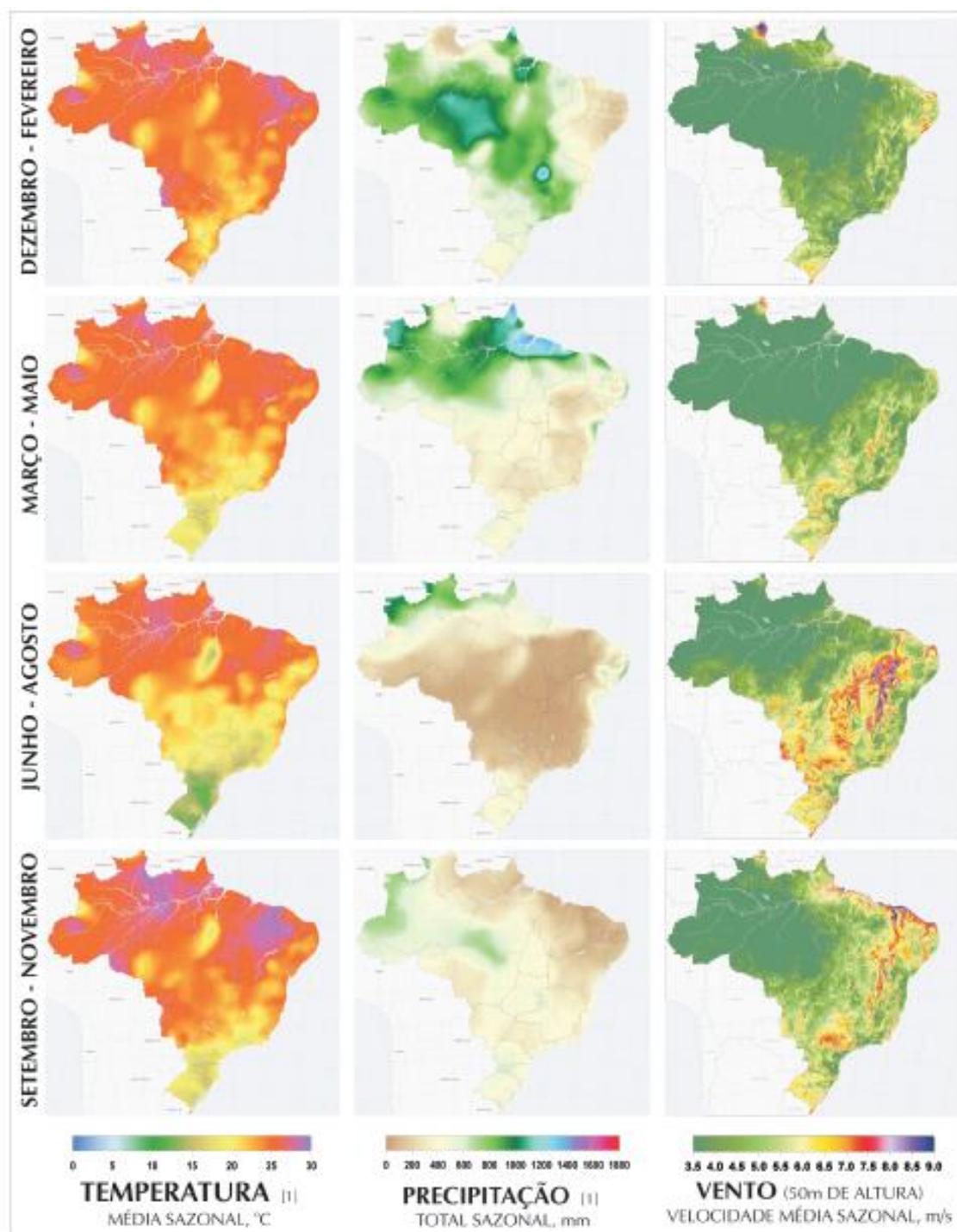


Figura 28 - Médias climatológicas sazonais de temperatura, precipitação e velocidade de vento sobre o Brasil.
 Fonte: CEPEL (2001).

A velocidade do vento é um fator determinante para o estudo eólico. A Figura 29 ilustra que o Brasil possui extensas áreas com potencial promissor para o aproveitamento eólico em todas as regiões do país, com destaque para o litoral do Nordeste, onde o potencial, ou seja, a velocidade média do vento a 50m de altura é a maior do Brasil (CEPEL, 2001).

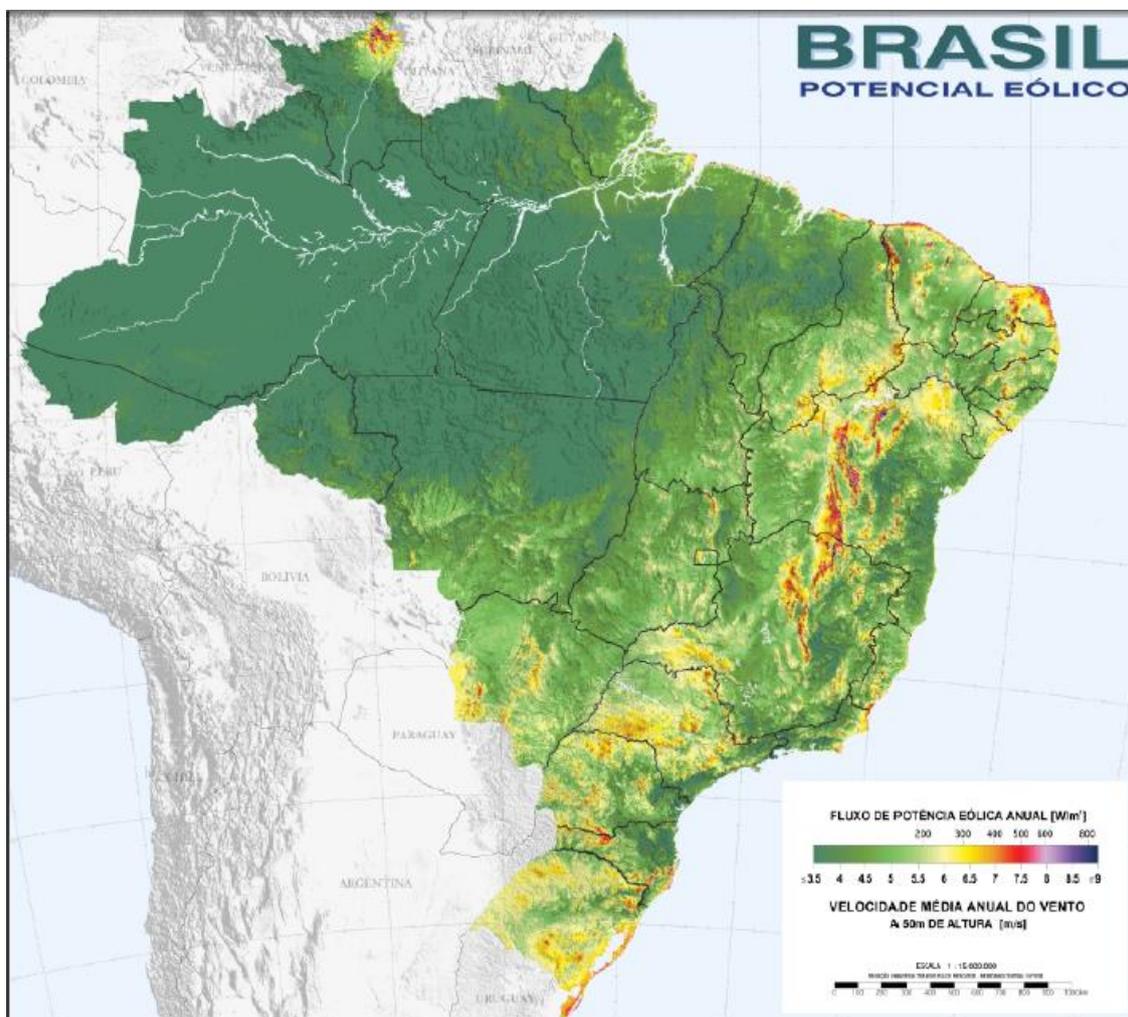


Figura 29 - Fluxo de potência eólica anual (W/m^2) e velocidade média anual do vento à 50m de altura (m/s).
 Fonte: CEPEL (2001).

Esta velocidade pode variar de acordo com a época do ano, com o efeito da sazonalidade os ventos podem ser mais presentes em alguns estados e com maior velocidade, reforçando a existência da complementariedade sazonal entre os regimes de vento e as vazões hídricas. Neste sistema, a inserção da energia eólica promove uma maior estabilidade na oferta de energia. O efeito da sazonalidade na velocidade dos ventos à 50m de altura, no Brasil, está ilustrado na Figura 30 (CEPEL, 2001).

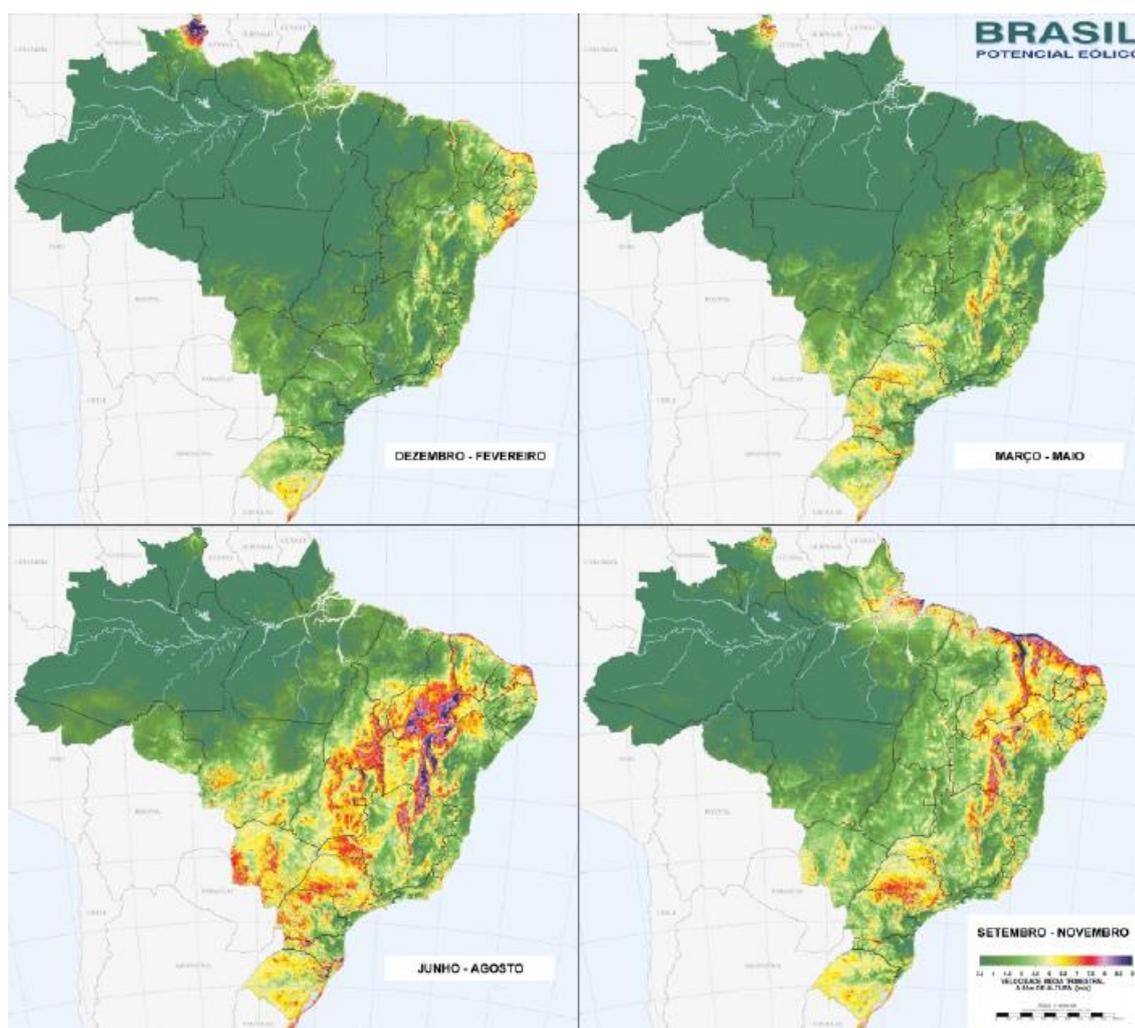


Figura 30 - Velocidade média anual do vento à 50m de altura (m/s) em diferentes épocas do ano.
Fonte: CEPEL (2001).

De acordo com CEPEL (2001), com os estudos para a elaboração do “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro”, está estimado que o Brasil possui um potencial eólico de 143,5 GW, sendo 22,8 GW para a região Sul, conforme Figura 31.

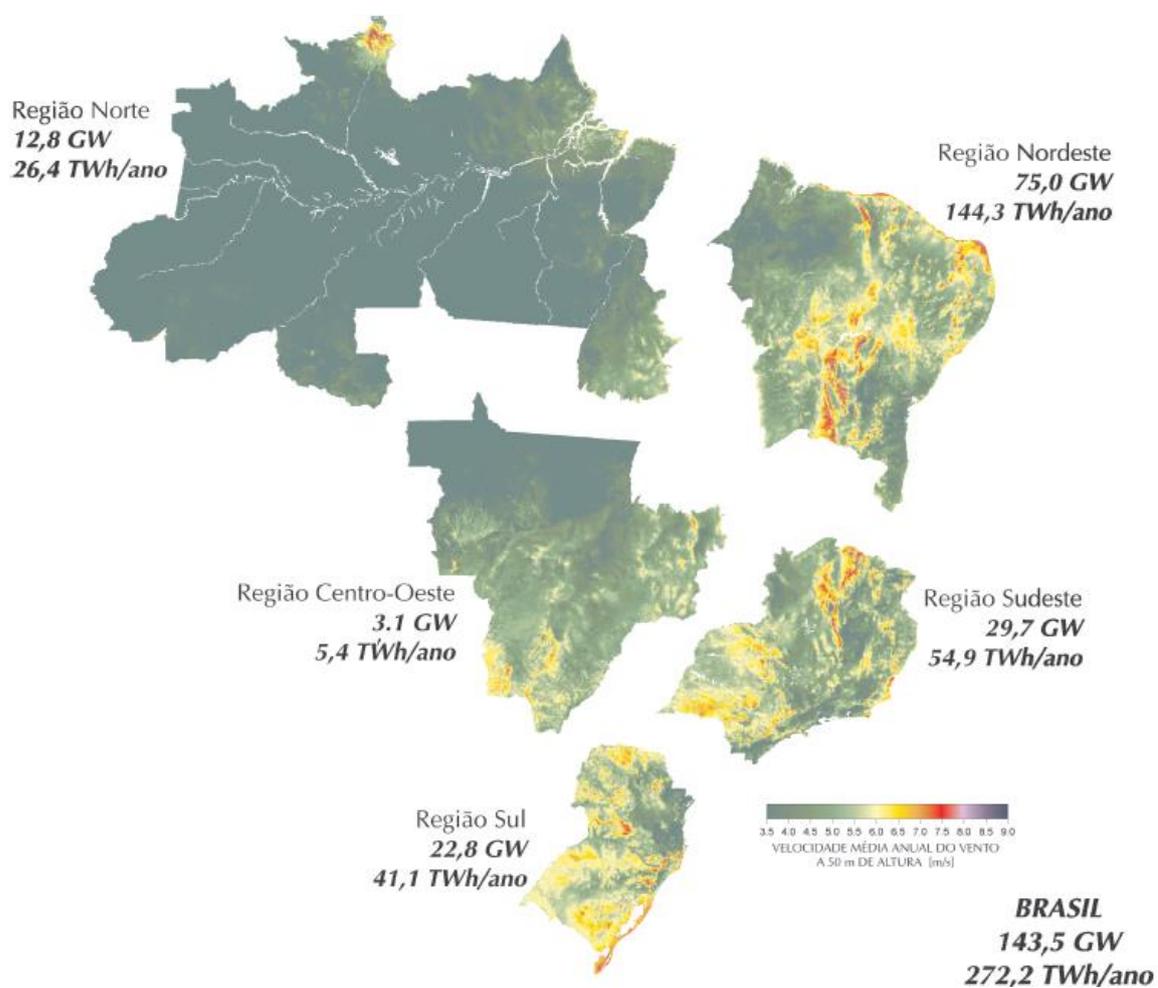


Figura 31 - Potencial eólico brasileiro estimado para o vento médio anual igual ou superior a 7,0 m/s.
 Fonte: CEPEL (2001).

3 LEVANTAMENTO DE DADOS – ESTADO DO PARANÁ

3.1 MATRIZ ELÉTRICA NO PARANÁ

Reconhecido pelo potencial hídrico, o Paraná tem possibilidades de especulação de outras fontes renováveis de energia por suas condições naturais favoráveis. A ITAIPU Binacional, que fornece cerca de 17% da energia consumida no Brasil e 79% da energia consumida no Paraguai (ITAIPU, 2014) admite que os potenciais mais fortes do setor hídrico energético do Brasil têm fortes restrições ambientais e estão distantes dos grandes polos de consumo. Ainda assim a geração da usina de ITAIPU é significativa na produção nacional, como visto na Figura 32. Sendo ainda responsável por quase 4 vezes mais geração de energia elétrica do que os outros estados do Sul do Brasil como mostrado na Tabela 3, o Paraná tem investido em estudos para captação de energia elétrica limpa.

| | |
|--------------------------|----------------------|
| Geração Instantânea | 11.098 MW |
| Geração Acumulada no Ano | 4.819.517 MWh |
| Geração Acumulada Total | 2228296870,67657 MWh |

Figura 32 – Geração ITAIPU Binacional – 2014.
Fonte: ITAIPU (2015).

Tabela 3 – Geração elétrica - Região Sul do Brasil – 2013.

| Sul | 156.413 (GWh) |
|-------------------|------------------|
| Paraná | 103.447 |
| Santa Catarina | 25.660 |
| Rio Grande do Sul | 27.306 |

Fonte: BEN (2014).

A COPEL confeccionou o ATLAS do Potencial Eólico do Estado do Paraná, produzido numa parceria entre a estatal e um fabricante de aerogeradores. O ATLAS é resultado de um projeto da Companhia chamado “Ventar”, que existe desde 1994 e pesquisa a possibilidade de instalação de usinas eólicas em regiões do Estado. Há também estudos relacionados à

captação de energia solar, uma vez que o Estado, comparado a países que já utilizam tecnologia de captação fotovoltaica, tem um potencial bastante favorável de utilização da mesma. De acordo ainda com dados da COPEL, a geração de energia elétrica no Estado se divide de acordo com os dados da Tabela 4, que comprova a proeminência paranaense na produção de energia elétrica hídrica.

Tabela 4 - Geração elétrica e capacidade instalada - COPEL- Estado do Paraná – 2013.

| Usinas | Capacidade Instalada (MW) | Geração Verificada | | Contribuição por geração (%) |
|---------------|---------------------------|--------------------|------------------|------------------------------|
| | | (MWmed) | GWh | |
| Hidrelétricas | 4.733,61 | 2.779,15 | 24.345,34 | 99,69 |
| Termelétricas | 20 | 8,11 | 71,09 | 0,02 |
| Eólica | 2,5 | 0,46 | 0,5 | 0 |
| Total | 4,756,11 | 2.787,72 | 24.420,41 | -- |

Fonte: Adaptado de COPEL (2013).

As considerações acerca do perfil do consumidor paranaense se tornam também importantes no estudo da complementariedade do Estado. De acordo com o Anuário Estatístico de 2013 do IPARDES, o perfil de consumo por setor no Estado do Paraná é dado pelo Gráfico 10. Pode-se ver que a indústria, que como será explicado é o setor que menos varia seu consumo em decorrência da sazonalidade ou mudança de tarifa, sendo a maior parte consumidora presente. Quanto aos consumidores residenciais, estes são os mais afetados economicamente pelas alterações de tarifas decorrentes dos níveis de reservatórios e alternância de geração hidráulica para termelétrica.

Consumo de Energia Elétrica no Paraná - 2013

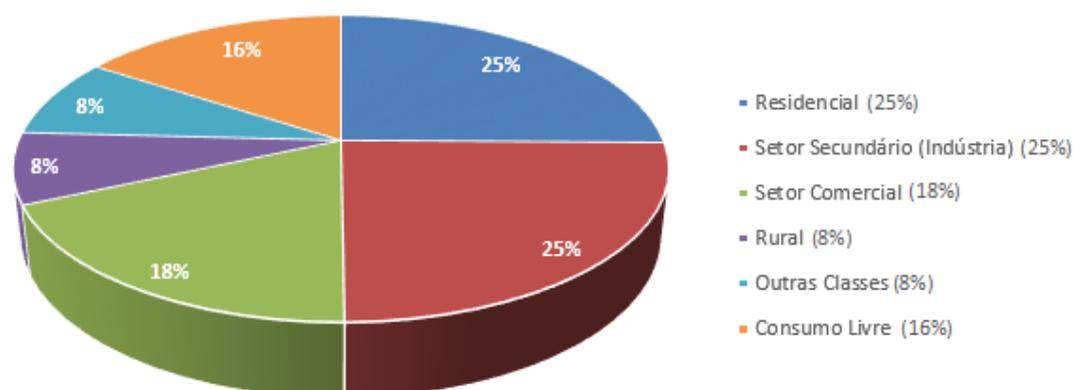


Gráfico 10 - Consumo de energia elétrica por setor no Paraná em 2013.
Fonte: Adaptado de IPARDES (2013)

E de acordo com o Atlas de Energia Elétrica do Brasil da ANEEL de 2008, a bacia hidrográfica do rio Paraná, que é uma das fontes de captação hidráulica para geração de energia elétrica no Estado, está sendo utilizada quase que em sua totalidade. Pode-se ver pela Figura 33 que 72% do seu potencial já está aproveitado na geração do Estado, sabe-se, no entanto, que essa captação não é aproveitada apenas no potencial do Estado do Paraná. O que ocorre, de acordo com Tiepolo (2015) é que aproximadamente 70% do potencial hidráulico do Paraná já esteja sendo explorado, ameaçando a expansão dessa fonte de energia elétrica. A importância dá-se então, na complementariedade dessas fontes já captadas para funcionamento contínuo do sistema de geração, barateamento e eficiência da eletricidade que chega e é cobrada dos consumidores residenciais, comerciais e industriais.

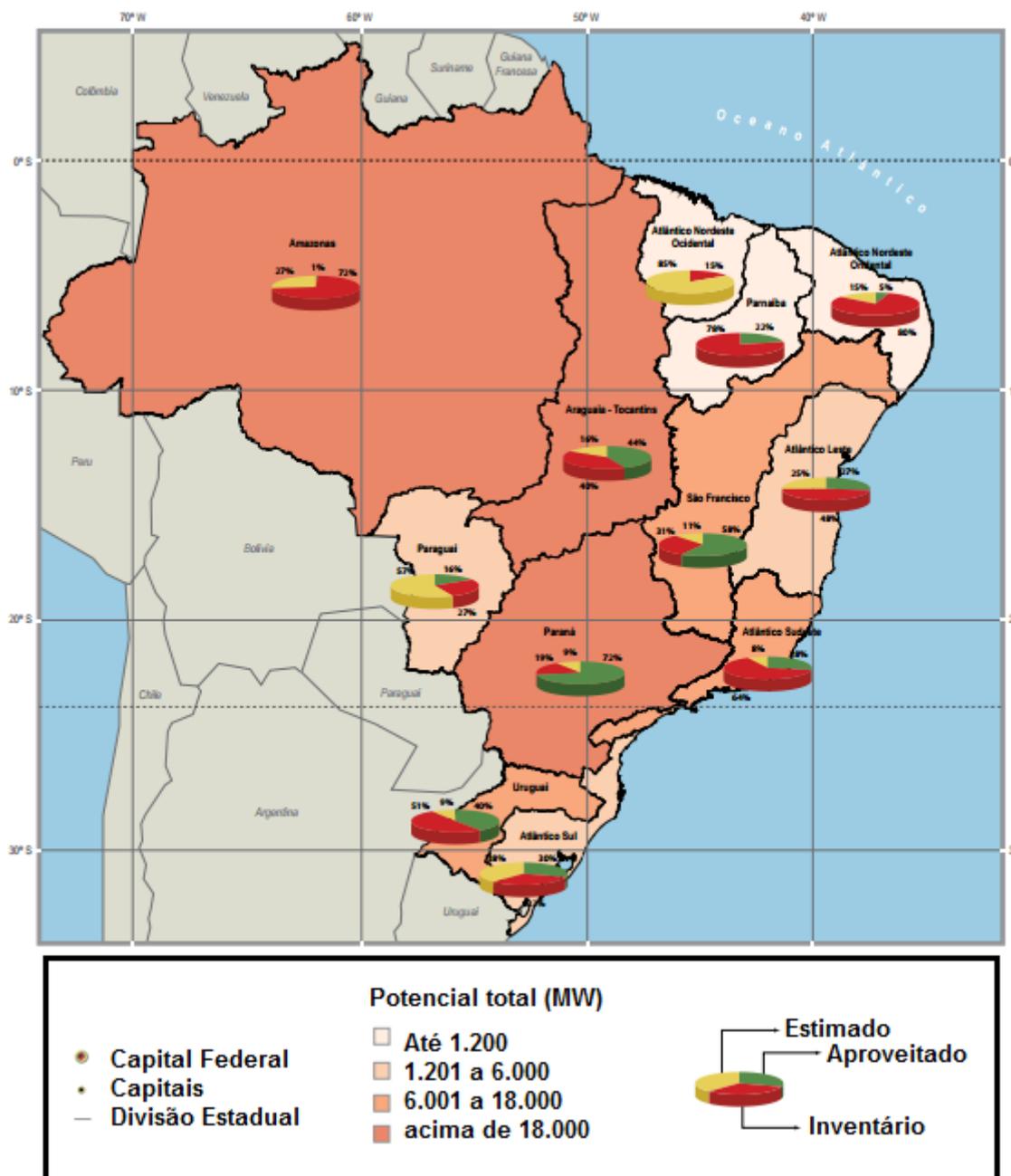


Figura 33 - Potenciais estimado, aproveitado e inventariado das bacias hidrográficas brasileiras.

Fonte: Adaptado de ANEEL (2008).

Em resumo, os potenciais energéticos sejam em escala mundial, brasileira ou paranaense necessitam de alternativas viáveis e sustentáveis seja do ponto de vista ambiental, social ou econômico. A insustentabilidade do modo de consumo capitalista deve ser fator preponderante para que a pesquisa desses meios seja incentivada pelas próprias indústrias e corporações que dependerão disso para seguimento do desenvolvimento como

unidade produtiva. Então, de acordo com Bermann (2008) o uso de recursos renováveis se torna o carro-chefe da sobrevivência futura do desenvolvimento tecnológico sustentável.

3.1.1 Curva de Carga

A curva de carga é uma das ferramentas utilizadas pelas concessionárias de energia elétrica para previsão da demanda e consumo dos seus clientes. Essa previsão permite, entre outras coisas, que o atendimento seja dado da melhor maneira ainda em épocas de geração diferenciada, seja por variáveis meteorológicas, econômicas ou ambientais. Os consumidores então, para melhor análise podem ser divididos em três classes: residencial, comercial e industrial.

De acordo com Ferreira (2013), os consumidores residenciais têm por característica o crescimento constante de carga, e o mesmo varia de acordo com o clima da época analisada, as mudanças econômicas e as tarifas vigentes na cobrança de energia. Os comerciais apresentam maior consumo de carga em datas comemorativas e também são sensíveis às mudanças econômicas e de tarifa, além de serem mais exigentes quanto à qualidade da energia entregue pelas distribuidoras. E, por fim, os consumidores industriais se mostram bastante definidos pelos turnos de operação em que operam e tem uma linearidade mais acentuada nas suas curvas de carga, não variando tanto sazonalmente e nem horários específicos (os de maior porte).

Há ainda uma preocupação na atenuação da curva de carga em certas épocas do ano. O horário de verão tem esse objetivo, ou seja, reduzir a demanda máxima do Sistema Interligado Nacional nos horários de pico. De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2015) a intenção é não haver coincidência na entrada da iluminação ao fim do dia com o consumo de indústria e comércio. Atualmente sua vigência se dá nos estados de Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Tocantins e no Distrito Federal.

A maior companhia de distribuição paranaense, a COPEL, acompanha e mede as informações de como a energia vem sendo consumida no Estado. Para tanto, utiliza de diversos softwares de acompanhamento disponíveis no mercado, de acordo com o Manual de Eficiência Energética de 2005 publicado pela mesma, que podem ser utilizados para elaborar relatórios gerenciais (COPEL, 2005).

Com a base de dados da curva de carga de consumidores adquiridos pela Copel é possível traçar curvas da instalação de unidade consumidora, bem como o sistema ACC, de “Análise de Comportamento de Carga”, que se encontra disponível no site da empresa. E ainda, de acordo com a própria Copel, a distribuição de energia no ano de 2014 se deu pelos seguintes valores de potência nos meses de janeiro a dezembro, de acordo com Tabela 5 e também o Gráfico 11, elaborado a partir dos mesmos. Dados esses que formam a curva de demanda de energia anual do Estado do ano de 2014 e com a qual será possível a comparação da necessidade de complementariedade das fontes solar e eólica na matriz do Paraná.

Tabela 5 – Valores da demanda média e máxima de energia elétrica paranaense no ano de 2014.

| 2014 | | | |
|------|---------------|-----|---------------------|
| Mês | MW médio (MW) | Mês | Demanda Máxima (MW) |
| Jan | 3915,0 | Jan | 5521,6 |
| Fev | 4118,9 | Fev | 4894,1 |
| Mar | 3854,3 | Mar | 5158,8 |
| Abr | 3746,7 | Abr | 5158,3 |
| Mai | 3660,9 | Mai | 4724,2 |
| Jun | 3586,7 | Jun | 4664,7 |
| Jul | 3669,3 | Jul | 4617,6 |
| Ago | 3682,3 | Ago | 4712,2 |
| Set | 3717,6 | Set | 4899,1 |
| Out | 3946,5 | Out | 5590,7 |
| Nov | 3848,2 | Nov | 5057,8 |
| Dez | 3802,0 | Dez | 5211,5 |

Fonte: Adaptado de COPEL (2015).

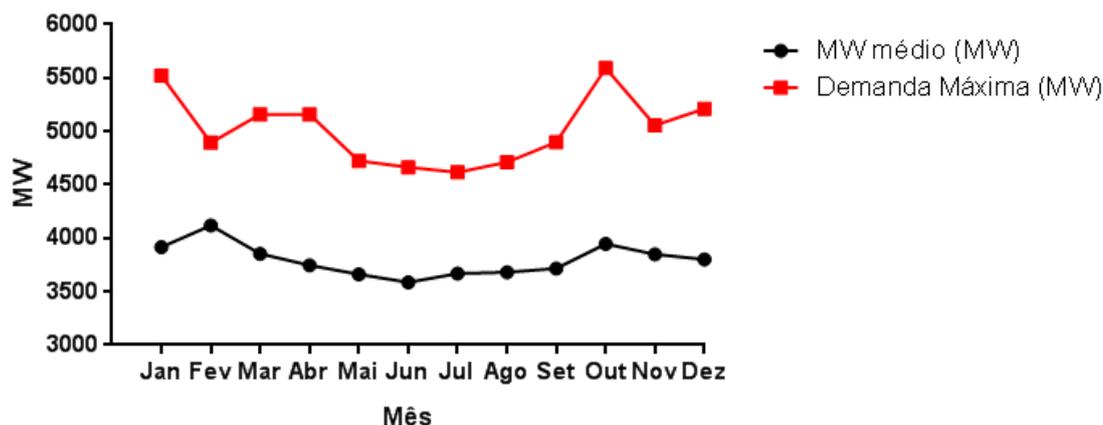


Gráfico 11 - Curva de demanda paranaense no ano de 2014 - Demanda média mensal e demanda máxima mensal.

Fonte: Adaptado de COPEL (2015).

Sendo, como tratado anteriormente, o Paraná um Estado majoritariamente de geração hidráulica, a sazonalidade é o fator mais crucial na previsão da demanda do Estado. A disponibilidade de águas nos reservatórios constitui o potencial de geração do Estado, mas o mercado atendido varia com os fatores aqui já citados: econômicos, sociais, climatológicos, etc. Sendo assim a curva “A” da Figura 34 é a disponibilidade média de água em reservatórios e a curva “B” o comportamento do mercado de consumo de energia elétrica, a curva demonstra a dificuldade de suprir a demanda de energia exatamente nos períodos de maior consumo de eletricidade.

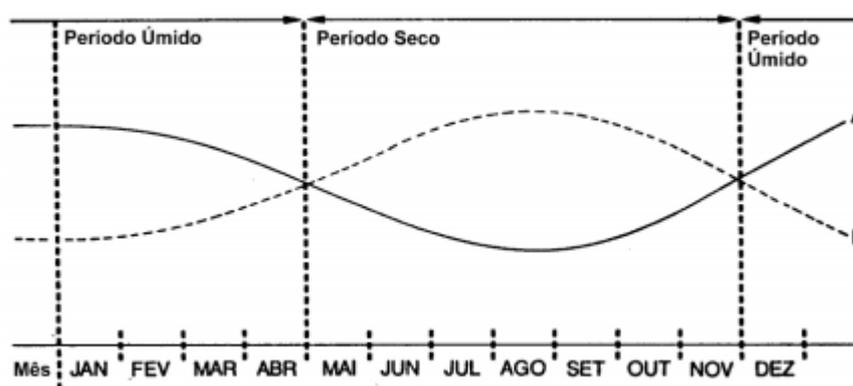


Figura 34 – Comportamento da disponibilidade hídrica/consumo de energia elétrica durante o ano.

Fonte: Ramos (2003).

Para regulamentar e compreender o comportamento do consumidor no Estado, alguns conceitos são necessários. Dentre eles os principais são os de horários de ponta, fora de ponta e o de bandeiras tarifárias:

- Horário de ponta: é o intervalo de três horas consecutivas, definido pela concessionária, considerando a curva de carga do seu sistema elétrico, se segunda a sexta-feira.
- Horário fora de ponta: são as horas complementares às três horas relativas ao horário de ponta, mas estes ainda incluem o total das horas dos sábados, domingos e feriados nacionais.
- Bandeiras tarifárias, que de acordo com a ANEEL (2015), são divididas em três categorias:
 - Bandeira verde: Com boas condições de geração de eletricidade não há nenhum acréscimo na tarifa para o consumidor;
 - Bandeira amarela: Com condições de geração menos favoráveis, há o acréscimo de R\$ 0,025 para cada quilowatt-hora (kWh) na tarifa para o consumidor;
 - Bandeira vermelha: São as condições mais caras para geração, com acréscimo de R\$ 0,055 para cada quilowatt-hora kWh consumidos.

É então dessa maneira que, com o crescente aumento do consumo elétrico e a necessidade de mudanças na medição e previsão da demanda que soluções como a incorporação de fontes de geração de energia elétrica alternativa se fazem necessárias no Estado do Paraná. Além dos já utilizados sistemas de complementariedade hidro-térmico e da importação de energia elétrica dos países vizinhos, a eficiência energética e o pensamento estratégico a médio e longo prazo devem ser incorporados na dinâmica de geração do Paraná.

3.2 POTENCIAL FOTOVOLTAICO DO ESTADO DO PARANÁ

O Estado do Paraná nos últimos anos tem se tornado referência nacional na produção de energia elétrica, para o ano de 2005, por exemplo, o

Estado produziu 79.487 GWh, sendo responsável pela maior geração de energia elétrica do país. Cerca de 70% dessa produção é exportada para outros estados, uma vez que, o Paraná está interligado aos subsistemas Sul e Sudeste-Centro-Oeste (COPEL, 2007).

Grande parte da produção de energia elétrica no Estado do Paraná é oriunda da hidroeletricidade, no entanto, um fator preocupante é que esta fonte de geração está cada vez mais escassa, e estima-se que quase 70% do potencial hidráulico já tenham sido explorados no território paranaense (TIEPOLO, 2015).

Diante deste cenário, a geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos é uma excelente alternativa para continuidade da produção de energia elétrica de forma expressiva no âmbito nacional, haja vista, que o Estado do Paraná possui grande potencial fotovoltaico. Além disso, os sistemas fotovoltaicos permitem que a geração de energia elétrica seja feita próxima aos consumidores, evitando as perdas inerentes aos sistemas de transmissão, que para o subsistema sul chegam até 13,3% (TIEPOLO, 2015).

Os países europeus têm investido na tecnologia fotovoltaica nas últimas décadas, e atualmente a Alemanha é o país que mais investe no mundo em sistemas fotovoltaicos, possuindo uma capacidade instalada de 35,5 GW. No entanto, o Estado do Paraná possui um potencial fotovoltaico maior do que vários países do continente europeu. A Tabela 6 apresenta a percentagem de quanto o Estado do Paraná é superior quando a comparação é em termos de produtividade estimada total anual média.

Tabela 6 - Comparação da produtividade estimada total anual média entre regiões.

| País Europeu | Estado do Paraná |
|--------------|------------------|
| Alemanha | >58,75% |
| Itália | >13,48% |
| Espanha | >1,97% |
| França | >31,28% |
| Bélgica | >60,46% |
| Reino Unido | >71,19% |

Fonte: Adaptado de TIEPOLO (2015).

Em todo território paranaense observa-se elevadas médias de irradiação. A Figura 35 mostra o mapa fotovoltaico do Estado do Paraná – total anual para o plano inclinado - e a Tabela 7 indica esse potencial em termos numéricos.

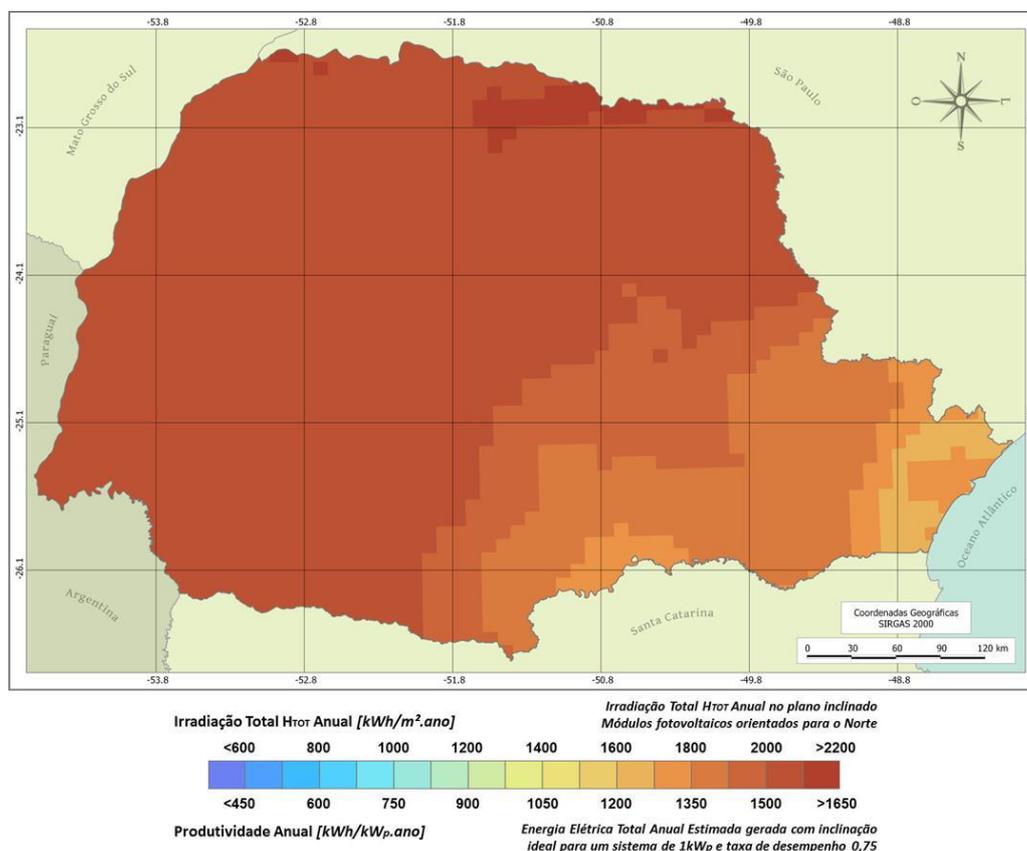


Figura 35 – Mapa fotovoltaico do Estado do Paraná – anual para o plano inclinado.
Fonte: TIEPOLO (2015).

Tabela 7 - Valores de Irradiação no plano inclinado e de produtividade gerada estimada total anual do Estado do Paraná.

| Estado do Paraná | Irradiação Total (H_{TOT}) Anual em $kWh/m^2.ano$ | | | Produtividade Total Anual Estimada em $kWh/kWp.ano$, para TD 75% | | |
|------------------|---|--------|--------------|---|--------|--------------|
| | Mínima | Máxima | Média | Mínima | Máxima | Média |
| | 1.651 | 2.119 | 1.986 | 1.238 | 1.589 | 1.490 |

Fonte: TIEPOLO (2015).

A produção de energia elétrica no Estado do Paraná através de sistemas fotovoltaicos é mais favorável nos meses de verão e menos favorável nos meses de inverno, logo, o Estado possui potencial não homogêneo ao longo do ano, sofrendo variações bruscas de irradiação mês a mês, como mostrado na Tabela 8 e ilustrado na Figuras 36 e 37, que representam a

irradiação média diária mensal, dos meses de janeiro à junho e de julho à dezembro, respectivamente.

Tabela 8 - Valores de Irradiação no plano inclinado e de produtividade gerada estimada diária média mensal e sazonal no Estado do Paraná.

| Meses | Irradiação (H _{TOT}) Diária média Mensal e Sazonal em kWh/m ² .dia | | | Produtividade Gerada Estimada Diária média Mensal e Sazonal em kWh/kWp.dia para SFV com inclinação igual a latitude, orientação norte e TD 75% | | |
|-----------|---|--------|-------------|--|--------|-------------|
| | Mínima | Máxima | Média | Mínima | Máxima | Média |
| JANEIRO | 4,66 | 6,46 | 5,73 | 3,50 | 4,85 | 4,30 |
| FEVEREIRO | 4,88 | 6,13 | 5,74 | 3,66 | 4,60 | 4,30 |
| MARÇO | 5,01 | 6,34 | 5,95 | 3,76 | 4,76 | 4,46 |
| ABRIL | 4,53 | 5,96 | 5,45 | 3,40 | 4,47 | 4,09 |
| MAIO | 4,15 | 5,16 | 4,79 | 3,11 | 3,87 | 3,59 |
| JUNHO | 3,86 | 5,22 | 4,79 | 2,90 | 3,92 | 3,59 |
| JULHO | 3,61 | 5,32 | 4,66 | 2,71 | 3,99 | 3,50 |
| AGOSTO | 4,31 | 6,04 | 5,59 | 3,23 | 4,53 | 4,19 |
| SETEMBRO | 4,05 | 6,08 | 5,57 | 3,04 | 4,56 | 4,18 |
| OUTUBRO | 4,42 | 6,34 | 5,59 | 3,32 | 4,76 | 4,20 |
| NOVEMBRO | 4,61 | 6,10 | 5,73 | 3,46 | 4,58 | 4,30 |
| DEZEMBRO | 4,65 | 6,15 | 5,74 | 3,49 | 4,61 | 4,30 |
| PRIMAVERA | 4,48 | 6,08 | 5,63 | 3,36 | 4,56 | 4,22 |
| VERÃO | 4,76 | 6,21 | 5,73 | 3,57 | 4,66 | 4,30 |
| OUTONO | 4,63 | 5,77 | 5,40 | 3,47 | 4,33 | 4,05 |
| INVERNO | 4,03 | 5,47 | 5,01 | 3,02 | 4,10 | 3,76 |

Fonte: TIEPOLO (2015).

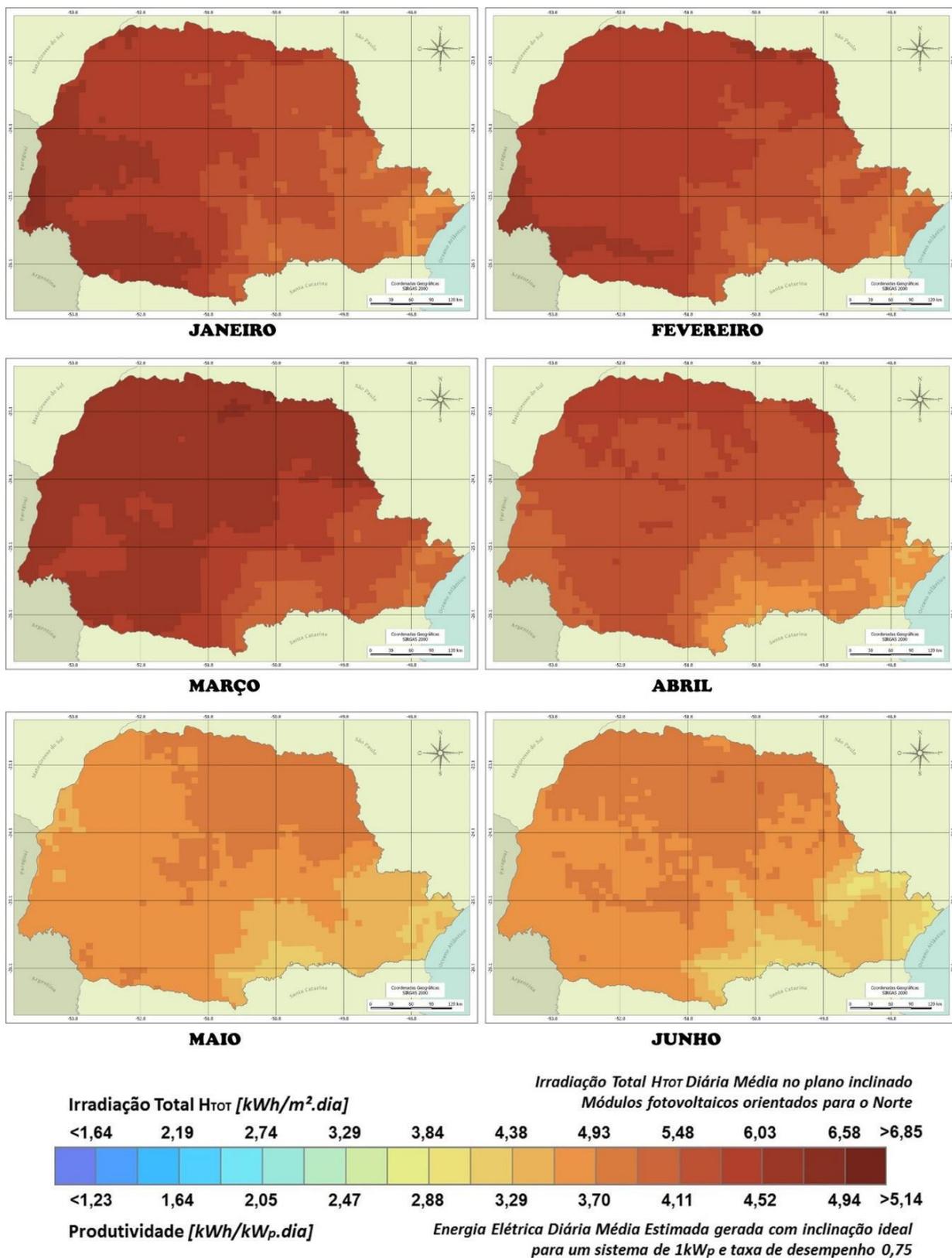


Figura 36 - Mapas Fotovoltaicos do Estado do Paraná - Média Diária Mensal (Plano Inclinado) – Janeiro à Junho.
Fonte: TIEPOLO (2015).

Ainda com base na Tabela 8, pode-se afirmar que o mês de março é capaz de produzir maior quantidade de energia elétrica, pois detém a melhor média mensal, possuindo irradiação média de 5,95 kWh/m².dia e produtividade diária média mensal de 4,46 kWh/kWp.dia. Durante o ano os níveis de irradiação variam de forma significativa, visto que para o mês de julho, mês com menor potencial fotovoltaico, a irradiação média é de 4,66 kWh/m².dia e produtividade diária média mensal 3,50 kWh/kWp.dia, valores bem inferiores quando comparados com o mês de março.

A variação do potencial fotovoltaico paranaense não ocorre apenas no aspecto sazonal, mas variam consideravelmente, também, de região para região. A região litorânea do Estado por apresentar alto índice de nebulosidade detém os piores potenciais fotovoltaicos no Paraná, onde a cidade de Matinhos apresentou a menor média anual, com irradiação de 1.687 kWh/m².ano e produtividade total anual de 1.265 kWh/kWp.ano, valores bem inferiores a cidade de Prado Ferreira localizada no norte central do Estado que apresentou os melhores valores, com irradiação de 2.107 kWh/m².ano e produtividade total anual de 1.580 kWh/kWp.ano (TIEPOLO, 2015).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser instalados próximos aos consumidores, com objetivo de diminuir as perdas nos sistemas de transmissão e distribuição, logo, é interessante que as principais cidades do Estado em termos populacionais e econômicos apresentem bons índices de irradiação ao longo do ano, que de maneira geral ocorre. Com base na Figura 35 foram estimados os seguintes valores de irradiação e produtividade total anual nas principais cidades do Paraná, conforme expresso na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores de irradiação total e de produtividade gerada estimada total anual no plano inclinado nas principais cidades do Paraná, para TD 75%.

| Município | Irradiação total anual média em kWh/m ² .ano | Produtividade total anual média em kWh/kWp.ano para SFVCR com inclinação igual a latitude, orientação norte e TD 75% |
|----------------------|---|--|
| Curitiba | 1.829 | 1.372 |
| Londrina | 2.066 | 1.550 |
| Maringá | 2.064 | 1.548 |
| Ponta Grossa | 1.906 | 1.429 |
| Cascavel | 2.031 | 1.523 |
| Foz do Iguaçu | 1.956 | 1.467 |
| São José dos Pinhais | 1.771 | 1.328 |
| Paranaguá | 1.710 | 1.283 |
| Guarapuava | 1.963 | 1.473 |

Fonte: Adaptado de TIEPOLO (2015).

Apesar das diferenças nos níveis de irradiação de região para região e no aspecto sazonal, pode-se afirmar que o Estado do Paraná no âmbito geral possui potencial fotovoltaico representativo ao longo do ano, justificando a instalação deste tipo de sistema para a geração de energia elétrica.

3.3 POTENCIAL EÓLICO DO ESTADO DO PARANÁ

Segundo COPEL (2007) a produção de energia elétrica é bastante dependente da velocidade do vento, por isso equipamentos de medição anemométricos qualificados são de extrema importância, assim como a altura de medição. Para a elaboração do “Atlas do Potencial Eólico do Estado do Paraná” foram instaladas 9 torres de medição no Estado com alturas de 50 metros e 100 metros. Com base nos resultados obtidos, o potencial de geração eólica do Paraná é promissor (1360 MW a 75 metros de altura, para áreas com vento igual ou superior a 7,0 m/s, podendo ultrapassar de 3375 MW a 100 metros de altura) potencial que pode ser muito aproveitado no futuro.

Ainda segundo COPEL (2007), o potencial eólico do Estado do Paraná pode ser classificado de acordo com a altura e a velocidade do vento, conforme ilustrado na Figura 38, representado que para diferentes alturas as potências de vento são diferentes.

POTENCIAL DE GERAÇÃO EÓLICA

| INTEGRAÇÃO POR FAIXAS DE VELOCIDADE | | | | | | INTEGRAÇÃO CUMULATIVA | | | |
|-------------------------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|
| ALTURA [m] | VENTO [m/s] | ÁREA [km ²] | POTÊNCIA INSTALÁVEL [MW] | FATOR DE CAPACIDADE | ENERGIA ANUAL [GWh] | VENTO [m/s] | ÁREA [km ²] | POTÊNCIA INSTALÁVEL [MW] | ENERGIA ANUAL [GWh] |
| 50 | 6.0 - 6.5 | 3181 | 6362 | 0,228 | 12683 | > 6.0 | 4033 | 8066 | 16792 |
| | 6.5 - 7.0 | 696 | 1392 | 0,268 | 3262 | > 6.5 | 852 | 1704 | 4110 |
| | 7.0 - 7.5 | 139 | 278 | 0,305 | 743 | > 7.0 | 156 | 312 | 847 |
| | 7.5 - 8.0 | 12 | 25 | 0,338 | 73 | > 7.5 | 17 | 34 | 105 |
| | 8.0 - 8.5 | 3 | 7 | 0,368 | 22 | > 8.0 | 5 | 9 | 32 |
| | > 8.5 | 1 | 3 | 0,425 | 10 | > 8.5 | 1 | 3 | 10 |
| 75 | 6.0 - 6.5 | 12152 | 24304 | 0,231 | 49254 | > 6.0 | 15310 | 30619 | 64726 |
| | 6.5 - 7.0 | 2476 | 4952 | 0,270 | 11716 | > 6.5 | 3158 | 6315 | 15471 |
| | 7.0 - 7.5 | 574 | 1148 | 0,308 | 3102 | > 7.0 | 681 | 1363 | 3756 |
| | 7.5 - 8.0 | 96 | 193 | 0,344 | 580 | > 7.5 | 107 | 215 | 654 |
| | 8.0 - 8.5 | 8 | 16 | 0,372 | 52 | > 8.0 | 11 | 22 | 74 |
| | > 8.5 | 3 | 6 | 0,414 | 22 | > 8.5 | 3 | 6 | 22 |
| 100 | 6.0 - 6.5 | 25220 | 50440 | 0,234 | 103580 | > 6.0 | 32638 | 65275 | 140255 |
| | 6.5 - 7.0 | 5730 | 11460 | 0,272 | 27289 | > 6.5 | 7417 | 14835 | 36675 |
| | 7.0 - 7.5 | 1370 | 2739 | 0,310 | 7430 | > 7.0 | 1687 | 3375 | 9386 |
| | 7.5 - 8.0 | 275 | 550 | 0,347 | 1672 | > 7.5 | 318 | 636 | 1956 |
| | 8.0 - 8.5 | 37 | 75 | 0,377 | 246 | > 8.0 | 43 | 85 | 284 |
| | > 8.5 | 5 | 11 | 0,408 | 38 | > 8.5 | 5 | 11 | 38 |

Figura 38 – Potencial de geração eólica no Estado do Paraná, por altura e faixas de velocidade de vento.

Fonte: COPEL (2007).

De acordo com SUZLON (2015), um grande fabricante de turbinas eólicas, as turbinas mais modernas possuem uma altura acima de 80 metros, para melhor desempenho e eficiência. A Figura 39 ilustra a velocidade média anual do vento do Estado do Paraná à 100 metros de altura, ou seja, em altura com maior potencial, visto que quanto maior a altura das torres mais constante e com maior velocidade é o vento (COPEL, 2007).

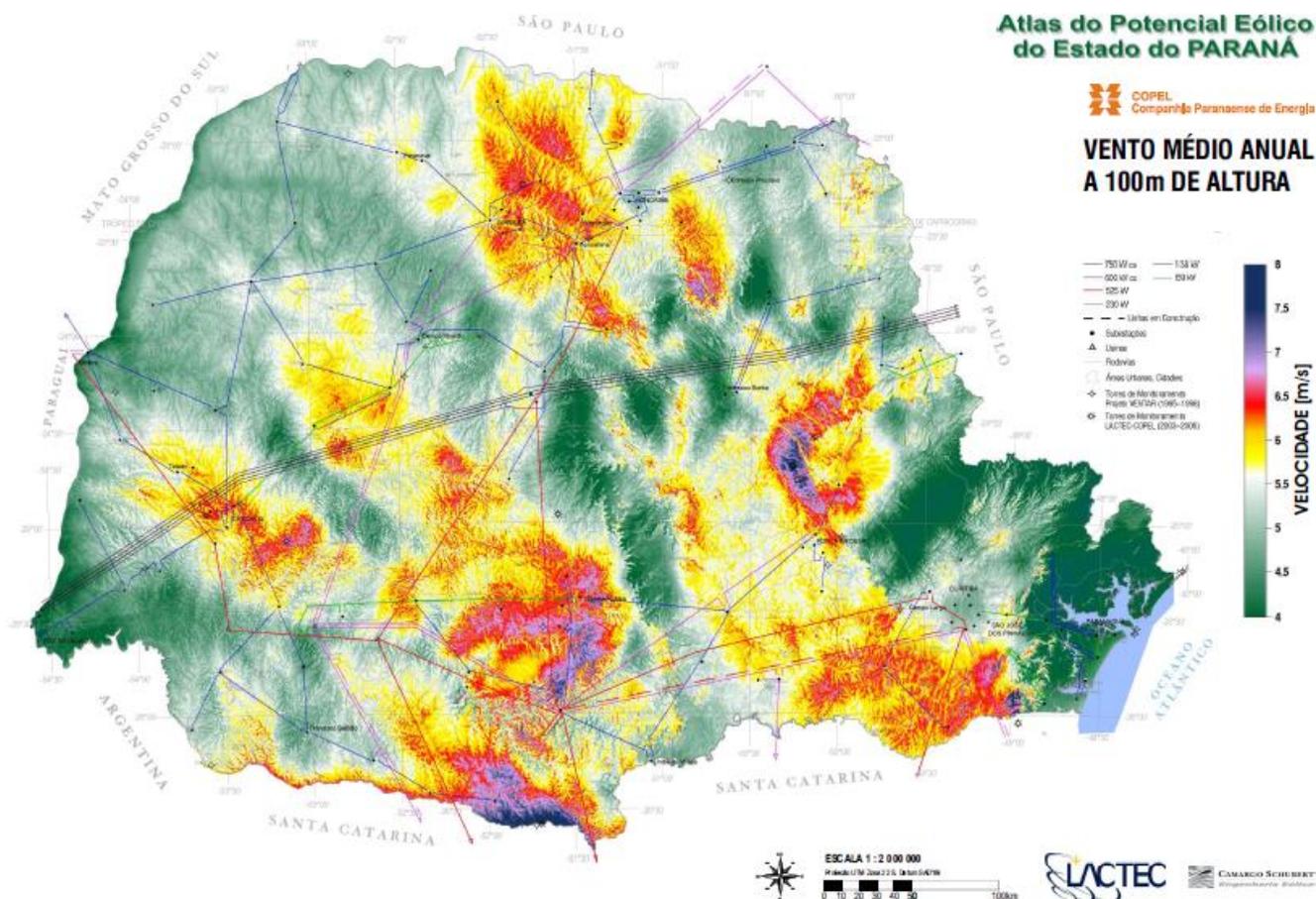


Figura 39 – Velocidade média anual do vento no Paraná – 100 metros de altura.
 Fonte: COPEL (2007).

Analisando as velocidades médias do vento à 100 metros de altura em períodos sazonais, é possível notar que o potencial é muito elevado, em muitas regiões do Estado, principalmente nos períodos de julho a dezembro, ou seja, no inverno e na primavera, conforme ilustrado na Figura 40 (COPEL, 2007).

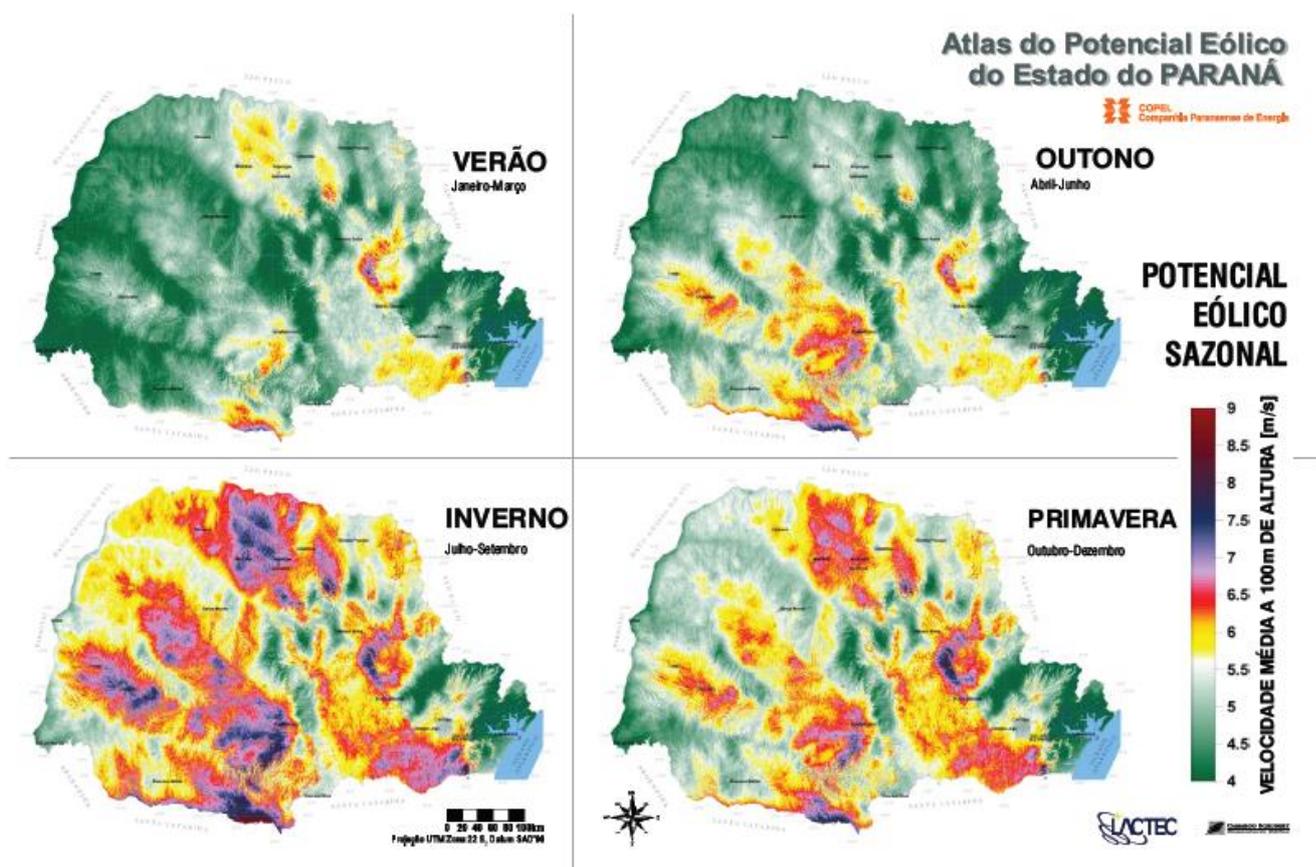


Figura 40 – Velocidade média sazonal do vento no Paraná – 100 metros de altura.
 Fonte: COPEL (2007).

Segundo COPEL (2007) algumas regiões do Estado possuem um bom potencial eólico em todas as épocas do ano, logo as regiões com maior aproveitamento eólico para geração de energia são: Planalto de Palmas, Campos de Guarapuava, Campos de Castro / Tibagi, Serra do Quiriri, São Jerônimo da Serra, Cascavel e Maringá, sendo as três primeiras as com melhor aproveitamento energético, onde serão analisadas separadamente.

3.3.1 Potencial eólico de Palmas

A cidade de Palmas localiza-se a uma latitude 26°29'03" Sul e uma longitude 51°59'26" Oeste. Com auxílio de um programa desenvolvido pelo CRESESB, que utiliza os dados oriundos do "Atlas do Potencial Eólico Brasileiro" e busca por coordenadas, é possível encontrar o potencial eólico para esta região, conforme Figura 41, de acordo com a sazonalidade, pode-se

obter as médias de velocidade do vento e da densidade de potência para uma altura de 50 metros (CRESESB, 2001).

Coordenada Geográfica

Latitude **Longitude**

26 ° 29 ' 2 " Sul 51 ° 59 ' 26 " Oeste

Norte:

graus decimais (00.00°)

graus, minutos e segundos (00°00'00")

Em caso de dúvida entre em contato conosco.

Dados de Vento

Latitude: 26,484167° S
Longitude: 51,990556° O

| Atlas do Potencial Eólico Brasileiro | | Dados de vento a 50 m de Altura | | | | |
|--------------------------------------|------------------|---------------------------------|---------|---------|---------|-------|
| Grandeza | Unidade | Dez-Fev | Mar-Mai | Jun-Ago | Set-Nov | Anual |
| velocidade média do vento | m/s | 6,05 | 7,49 | 8,04 | 6,94 | 7,13 |
| fator c | | 6,83 | 8,46 | 9,05 | 7,83 | 8,05 |
| fator k | | 2,13 | 2,14 | 2,59 | 2,03 | 2,18 |
| densidade de potência | W/m ² | 244 | 461 | 490 | 385 | 395 |

Figura 41 - Velocidade média sazonal do vento e da densidade de potência em Palmas - PR - 50 metros de altura.
Fonte: CRESESB (2001).

3.3.2 Potencial eólico de Guarapuava

A cidade de Guarapuava localiza-se a uma latitude 25°23'43" Sul e uma longitude 51°27'29" Oeste, de maneira semelhante à cidade anterior e com auxílio do programa do CRESESB, os dados de velocidade média do vento e da densidade de potência, em períodos sazonais, obtidos para a região de Guarapuava, estão ilustrados na Figura 42.

Coordenada Geográfica

Latitude: 25 ° 23 ' 43 " Sul Longitude: 51 ° 27 ' 29 " Oeste

Norte:

- graus decimais (00.00°)
 graus, minutos e segundos (00°00'00")

Em caso de dúvida entre em contato conosco.

Dados de Vento

Latitude: 25,395278° S
Longitude: 51,458056° O

| Atlas do Potencial Eólico Brasileiro | | Dados de vento a 50 m de Altura | | | | |
|--------------------------------------|---------|---------------------------------|---------|---------|---------|-------|
| Grandeza | Unidade | Dez-Fev | Mar-Mai | Jun-Ago | Set-Nov | Anual |
| velocidade média do vento | m/s | 4,1 | 5,13 | 5,6 | 4,85 | 4,92 |
| fator c | | 4,63 | 5,79 | 6,31 | 5,47 | 5,55 |
| fator k | | 2,05 | 1,98 | 2,53 | 2 | 2,09 |
| densidade de potência | W/m2 | 79 | 160 | 168 | 133 | 135 |

Figura 42 - Velocidade média sazonal do vento e da densidade de potência em Guarapuava - PR - 50 metros de altura.
Fonte: CRESESB (2001).

3.3.3 Potencial eólico de Castro

A cidade de Castro com localização de latitude 24°47'28" Sul e uma longitude 50°00'43" Oeste, obteve os dados representados na Figura 43, obtida no programa do CRESESB.

Coordenada Geográfica

Latitude: 24 ° 47 ' 28 " Sul Longitude: 50 ° 0 ' 43 " Oeste

Norte:

- graus decimais (00.00°)
 graus, minutos e segundos (00°00'00")

Em caso de dúvida entre em contato conosco.

Dados de Vento

Latitude: 24,791111° S
Longitude: 50,011944° O

| Atlas do Potencial Eólico Brasileiro | | Dados de vento a 50 m de Altura | | | | |
|--------------------------------------|---------|---------------------------------|---------|---------|---------|-------|
| Grandeza | Unidade | Dez-Fev | Mar-Mai | Jun-Ago | Set-Nov | Anual |
| velocidade média do vento | m/s | 4,5 | 5,47 | 5,96 | 5,66 | 5,4 |
| fator c | | 5,08 | 6,17 | 6,71 | 6,39 | 6,09 |
| fator k | | 2,42 | 2,29 | 2,66 | 2,3 | 2,36 |
| densidade de potência | W/m2 | 90 | 169 | 196 | 187 | 161 |

Figura 43 - Velocidade média sazonal do vento e da densidade de potência em Castro - PR - 50 metros de altura.
Fonte: CRESESB (2001).

3.3.4 Potencial eólico das três cidades

Para a obtenção do potencial de cada cidade de forma sazonal, foram necessários alguns procedimentos. Primeiramente, através da EMBRAPA (2003), foram coletados os dados de temperatura média sazonal em graus Celsius e a altitude do local em metros, para o cálculo da densidade do ar para a região em questão, através da Equação 4 (COPEL, 2007).

$$\rho = \frac{352,98 \times \left[1 - \frac{z}{45271}\right]^{5,2624}}{(273,15 + T)} \quad (4)$$

Sendo ρ expresso em (Kg/m³), a altitude z expressa em metros e a temperatura T em °C.

Após determinar a densidade do ar, é calculada a potência, em Watts, para 26 intervalos de velocidade, variando de 0 a 25 m/s. A potência é determinada pela Equação 1, já apresentada. Os valores de A_r , C_p e η foram adotados de acordo com o Atlas do Potencial Eólico do Estado do Paraná, com valores de $A_r = 1256,637$ m² (diâmetro de 40m, para torres de 50 metros de altura), $C_p = 0,5$ e $\eta = 0,93$ (COPEL, 2007).

Com a potência para os 26 intervalos, é determinada a frequência de ocorrência de cada velocidade, através da distribuição de Weibull, representada na Equação 2, já exibida. Os valores de k e c foram retirados das simulações obtidas para cada cidade no simulador do CRESESB, conforme capítulos 3.3.1, 3.3.2 e 3.3.3.

Finalmente, a energia elétrica que um aerogerador é capaz de produzir em MWh é calculada pela Equação 5, que representa a integração das curvas de potência ($P(u_i)$ em kW) e da frequência da ocorrência das velocidades de vento ($f(u_i)$) (COPEL, 2007).

$$\text{Produção de Energia Elétrica} = 8,76 \times \sum_{i=1}^N P(u_i) f(u_i) \Delta u_i \quad (5)$$

A constante 8,76 varia conforme o tempo de estudo (anual, mensal, sazonal, diário entre outros), representando o número total de horas do período divididas por mil.

Para o estudo do potencial eólico, as informações são sazonais, logo estas constantes foram calculadas de acordo com o número de dias totais em cada período multiplicado por 24 horas diárias, desta forma a Tabela 10 ilustra a constante utilizada para cada ocasião.

Tabela 10 - Valores das constantes calculadas e utilizadas nos períodos sazonais.

| Períodos | Constante |
|---------------------------------|------------------|
| Verão (Dezembro à Fevereiro) | 2,166 |
| Outono (Março à Maio) | 2,208 |
| Inverno (Junho a Agosto) | 2,208 |
| Primavera (Setembro à Novembro) | 2,184 |

Fonte: Elaboração dos autores.

Assim, para as três cidades foram realizados os cálculos para cada período sazonal, ou seja, no total foram realizadas 12 simulações, contidas no Apêndice A. A Tabela 11, apresenta os resultados do potencial de geração para um aerogerador com de 500 kW de potência nominal, diâmetro do rotor de 40 metros e altura da torre de 50 metros, para cada cidade em épocas sazonais.

Tabela 11 - Produção de energia elétrica de um aerogerador nas três cidades e em períodos sazonais.

| Cidade | Potencial (MWh) – Verão | Potencial (MWh) – Outono | Potencial (MWh) – Inverno | Potencial (MWh) - Primavera |
|-------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|
| Palmas | 243,8141741 | 397,7802774 | 455,1384893 | 340,7365765 |
| Guarapuava | 86,46834124 | 172,8942287 | 188,8230666 | 143,8387583 |
| Castro | 100,0849822 | 187,1729927 | 222,4042249 | 204,0272297 |

Fonte: Elaboração dos autores.

4 ESTUDO DA COMPLEMENTARIEDADE DA MATRIZ ELÉTRICA DO ESTADO DO PARANÁ

4.1 CONCEITO DE COMPLEMENTARIEDADE

O conceito de complementar diz respeito à interdependência de dois fatos, fenômenos ou qualidades, de acordo com o dicionário HOUAISS (2009). Como complementariedade energética podemos entender a capacidade de duas ou mais fontes serem complementares uma a outra num período determinado de tempo ou espaço.

No caso das fontes eólica e solar fotovoltaica, há a possibilidade de uma melhoria tanto na dependência energética na fonte hidráulica, quanto a possibilidade de energia não danosa ao meio ambiente. A contribuição dessas duas fontes não apenas complementa como assegura a distribuição de energia integralmente em períodos de secas e estiagem.

De acordo com Beluco *et al.* (2003) a complementariedade ainda é um tema pouco aprofundado na literatura mundial, sabe-se, no entanto, que o gerenciamento de duas fontes de energia com alto potencial de geração exige pesquisa e atenção quanto as necessidades dos mercados de geração e distribuição de acordo com os índices de consumo apresentados.

Há ainda, de acordo com a FIESP (2011), a perspectiva de complementariedade de fontes de energia elétrica dentro da matriz elétrica da América Latina. Visando o aproveitamento dos recursos naturais aqui existentes, a mesma afirma que as fontes eólicas e solares não apresentam grandes superposições, favorecendo a integração de regiões por conta de suas possibilidades de complementação das matrizes de energia. O que apenas comprova que em uma região como o Paraná, com potencial de geração em ambas as fontes discutidas, a complementariedade pode ser incorporada de maneira mais eficiente e rápida, em vista que não serão consideradas diferenças políticas, econômicas e de caráter ambiental para implementação das mesmas.

4.2 RESULTADOS

Com os resultados extraídos através dos dados levantados da matriz elétrica do Estado do Paraná, e das suas respectivas curvas de carga, potencial de geração fotovoltaica e potencial de geração eólica, foi montada a Tabela 12, que se trata de uma tabela resumo, onde constam as principais informações a respeito das características de cada fonte de geração estudada, além dos aspectos ligados ao consumo de energia elétrica no Estado do Paraná. Com os dados da Tabela 12, foi possível montar 3 cenários de consumo e geração distintos, onde para cada cenário uma quantidade de potência instalada foi considerada, conforme o critério adotado. Com a quantidade de potência instalada, foi possível calcular o quanto cada fonte seria capaz de gerar de energia elétrica em cada mês do ano, bem como, seu valor acumulativo anual. Além desses resultados, outros resultados pertinentes foram alcançados, como: a estimativa da contribuição das fontes renováveis solar fotovoltaica e eólica na matriz elétrica do Estado do Paraná.

Tabela 12 - Resumo com os principais dados levantados.

| Mês | Potência demandada (MW) | Geração Solar (kWh/kWp) | Geração Eólica (MWh/aerogerador de 500 kW) - Palmas | Geração Eólica (MWh/aerogerador de 500 kW) - Guarapuava | Geração Eólica (MWh/aerogerador de 500 kW) - Castro |
|-----------|-------------------------|-------------------------|---|---|---|
| Janeiro | 3.915,00 | 133,30 | 81,271391 | 28,822780 | 33,361661 |
| Fevereiro | 4.118,90 | 120,40 | 81,271391 | 28,822780 | 33,361661 |
| Março | 3.854,30 | 138,26 | 132,593426 | 57,631410 | 62,390998 |
| Abril | 3.746,70 | 122,70 | 132,593426 | 57,631410 | 62,390998 |
| Maiο | 3.660,90 | 111,29 | 132,593426 | 57,631410 | 62,390998 |
| Junho | 3.586,70 | 107,70 | 151,712830 | 62,941022 | 74,134742 |
| Julho | 3.669,30 | 108,50 | 151,712830 | 62,941022 | 74,134742 |
| Agosto | 3.682,30 | 129,89 | 151,712830 | 62,941022 | 74,134742 |
| Setembro | 3.717,60 | 125,40 | 113,578859 | 47,946253 | 68,009077 |
| Outubro | 3.946,50 | 130,20 | 113,578859 | 47,946253 | 68,009077 |
| Novembro | 3.848,20 | 129,00 | 113,578859 | 47,946253 | 68,009077 |
| Dezembro | 3.802,00 | 133,30 | 81,271391 | 28,822780 | 33,361661 |

Fonte: Adaptado de TIEPOLO (2015), CRESESB (2001) e COPEL (2015).

4.2.1 Estudo da complementariedade – Cenário 1

Segundo IPARDES (2013) o Estado do Paraná possui uma área de 199.880 km², esta área representa um pouco mais da metade do território da Alemanha. De acordo com o *Nations encyclopedia* (2015), a Alemanha detém um território de 357.021 km², ou seja, aproximadamente 1,8 vezes maior que o território paranaense. Pelo fato da Alemanha ser o país com a maior

capacidade instalada de energia solar fotovoltaica no mundo, cerca de 36 GW, foi adotado como país de referência, assim foi arbitrada uma potência instalada de 18 GW para o Estado do Paraná, sabe-se que é uma potência instalada exequível, pois obedece uma relação de potência instalada por área, quando comparado com a Alemanha.

O limite estipulado de potência instalada para a energia eólica seguiu um critério diferente. De acordo com COPEL (2007), locais com velocidade média anual acima de 6,0 m/s são viáveis tecnicamente para a implantação de sistemas eólicos, com base na Figura 38, nota-se que o Estado do Paraná teria uma capacidade de potência instalável pela integração cumulativa de 10,128 GW, considerando torres de 50 metros, que é o tamanho usualmente instalado no Brasil. Diferente do que ocorrem para a geração fotovoltaica, em que os módulos poderão ser instalados de forma distribuída pelo Estado, para a energia eólica os aerogeradores deverão se concentrar apenas em locais que possuem potencial eólico atrativo, desta forma, foram escolhidas 3 cidades do Estado com potencial viável: Palmas, Castro e Guarapuava. Além deste aspecto, as cidades escolhidas apresentam outras vantagens importantes, como, relevo favorável para a instalação dos aerogeradores, pois de modo geral, estão situadas em áreas de campo, facilitando, também, a questão logística de transporte, e ainda são cidades com infraestrutura elétrica favorecida, uma vez que estão situadas próximas as linhas de transmissão, podendo então, ser conectada a geração eólica com o sistema de transmissão. Apesar de todos estes aspectos positivos, a potência instalável de 10,128 GW, está distribuída em todo o Estado do Paraná, não apenas nas 3 cidades estudadas, pela dificuldade de se levantar dados mais específicos, se torna praticamente impossível determinar o quanto cada cidade teria de potência instalável. Desta forma, foi adotado de forma conservativa que as 3 cidades juntas representam cerca de 10% de todo o potencial do Estado, totalizando, então, aproximadamente 1,013 GW.

Para o cenário 1 foi estipulado os valores máximos de potência instalada, na qual o Estado do Paraná teria capacidade. Para geração por meio de energia solar fotovoltaica o valor de potência instalada considerado foi de 18 GW, enquanto que para a geração via energia eólica a potência instalada considerada foi de aproximadamente 1,013 GW. Os valores destas potências

instaladas estão indicados na Tabela 13, assim como o número de aerogeradores de 500kW de potência nominal necessários por cidade estudada, para atingir a potência determinada.

Tabela 13 - Cenário 1 com a potência instalada por fonte.

| Cenário 1 | |
|---|------------|
| Potência Instalada para energia solar (kWp) | 18.000.000 |
| Número de aerogeradores por cidade | 675 |
| Potência instalada para energia eólica (kW) | 1.012.500 |

Fonte: Elaboração dos autores.

Por aspectos físicos, técnicos e econômicos, ambas as fontes de geração de energia elétrica teriam capacidade limite de potência instalável, seria praticamente impossível determinar o quanto seria este valor exato, logo, os valores arbitrados seguiram um determinado critério dentro da realidade para cada fonte.

Após a determinação da potência a ser instalada para cada fonte, foi calculado o quanto cada fonte seria capaz de produzir mensalmente, como exposto na Tabela 14, além dos valores de geração também foram calculados os valores de consumo para cada mês, com base na curva de demanda do Estado do Paraná.

Tabela 14 - Consumo, geração de energia elétrica por fonte e balanço de energia elétrica mês a mês - Cenário 1.

| Mês | Consumo de energia (MWh) | Geração Solar (MWh) | Geração Eólica (MWh) | Geração total das fontes complementares (MWh) | Balanço de Energia Elétrica consumida e gerada (MWh) |
|------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------|--|---|
| Janeiro | 2.912.760,00 | 2.399.400,00 | 96.832,69 | 2.496.232,69 | -416.527,31 |
| Fevereiro | 2.767.900,80 | 2.167.200,00 | 96.832,69 | 2.264.032,69 | -503.868,11 |
| Março | 2.867.599,20 | 2.488.680,00 | 170.515,69 | 2.659.195,69 | -208.403,51 |
| Abril | 2.697.624,00 | 2.208.600,00 | 170.515,69 | 2.379.115,69 | -318.508,31 |
| Mai | 2.723.709,60 | 2.003.220,00 | 170.515,69 | 2.173.735,69 | -549.973,91 |
| Junho | 2.582.424,00 | 1.938.600,00 | 194.932,30 | 2.133.532,30 | -448.891,70 |
| Julho | 2.729.959,20 | 1.953.000,00 | 194.932,30 | 2.147.932,30 | -582.026,90 |
| Agosto | 2.739.631,20 | 2.338.020,00 | 194.932,30 | 2.532.952,30 | -206.678,90 |
| Setembro | 2.676.672,00 | 2.257.200,00 | 154.935,58 | 2.412.135,58 | -264.536,42 |
| Outubro | 2.936.196,00 | 2.343.600,00 | 154.935,58 | 2.498.535,58 | -437.660,42 |
| Novembro | 2.770.704,00 | 2.322.000,00 | 154.935,58 | 2.476.935,58 | -293.768,42 |
| Dezembro | 2.828.688,00 | 2.399.400,00 | 96.832,69 | 2.496.232,69 | -332.455,31 |

Fonte: Elaboração dos autores.

Tais valores podem ser visualizados e comparados, através do Gráfico 12, onde a geração e o consumo estão indicados de forma simultânea.

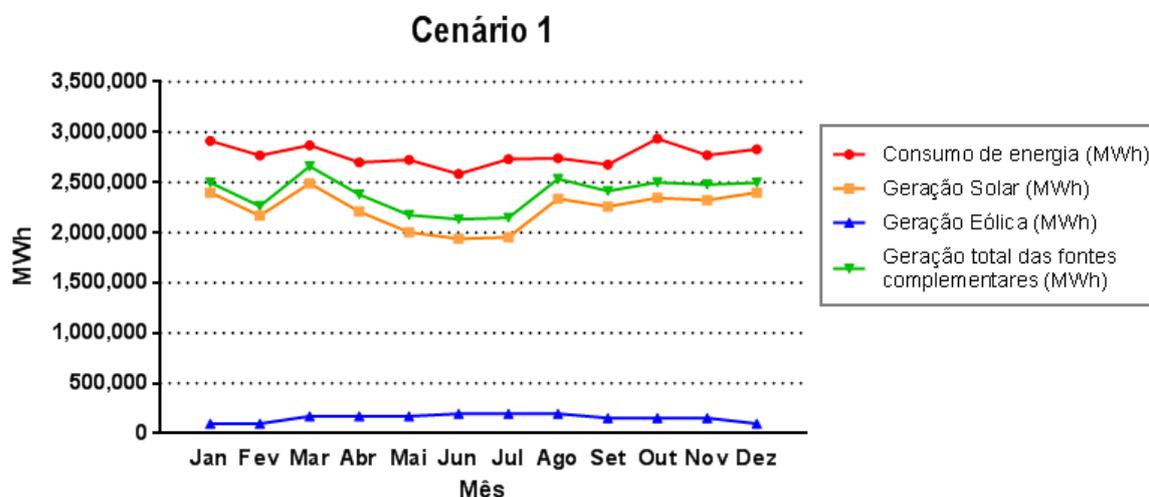


Gráfico 12 - Consumo e geração de energia elétrica para o cenário 1.
Fonte: Elaboração dos autores.

Além dos valores mensais, também foi calculado o total acumulado de consumo e geração durante um ano, os resultados encontrados constam na Tabela 15.

Tabela 15 - Consumo e geração de energia elétrica por fonte pelo período de um ano - Cenário 1.

| Ano | |
|---|---------------|
| Consumo de energia (MWh) | 33.233.868,00 |
| Geração Solar (MWh) | 26.818.920,00 |
| Geração Eólica (MWh) | 1.851.648,76 |
| Geração total das fontes complementares (MWh) | 28.670.568,76 |

Fonte: Elaboração dos autores.

Finalmente, foi realizado um balanço anual de energia elétrica gerada pelas fontes solar fotovoltaica e eólica e pelo consumo de energia elétrica no território paranaense, a Tabela 16, demonstra os resultados alcançados.

Tabela 16 - Balanço de energia elétrica pelo período de um ano - Cenário 1.

| Balanço de energia elétrica anual | |
|---|----------------------|
| Saldo de energia elétrica (MWh) | -4.563.299,24 |
| Percentual de complementariedade na matriz elétrica (%) | 86,27 |

Fonte: Elaboração dos autores.

A Tabela 16 ainda indica que com as potências instaladas para o cenário 1, durante o período de um ano, as fontes solar fotovoltaica e eólica seriam capazes de suprir mais de 86% do consumo de energia elétrica do Estado do Paraná, representando que seriam necessários pouco mais de 4,5 TWh de energia por outras fontes de geração. É válido ressaltar que para a composição do cenário 1, nenhuma fonte hidrelétrica ou termelétrica foi considerada, representando que boa parte das usinas por fontes térmicas poderiam ser desativadas, por se tratarem de fontes não renováveis e de alto custo de geração.

4.2.2 Estudo da complementariedade – Cenário 2

Para o cenário 2 foi escolhida a potencialização da energia solar, de maneira conivente com a capacidade paranaense de obtenção e geração de energia através dessa fonte. Nesse segundo caso, o cenário de geração por meio de energia solar fotovoltaica teve também como valor de potência instalada 18 GW, e para a geração eólica a potência instalada foi arbitrada em aproximadamente 75 MW, como mostra a Tabela 17, novamente com o número de aerogeradores por cidade que necessitariam ser instalados para obtenção da potência escolhida.

Tabela 17 - Cenário 2 com a potência instalada por fonte.

| Cenário 2 | |
|---|------------|
| Potência Instalada para energia solar (kWp) | 18.000.000 |
| Número de aerogeradores por cidade | 50 |
| Potência instalada para energia eólica (kW) | 75.000 |

Fonte: Elaboração dos autores.

Como critério nessa segunda etapa, além dos fatores de referência com o território alemão e sua capacidade de geração de energia por meio solar como feito no cenário 1, foi considerada uma potência instalada bastante inferior de energia eólica. A viabilidade da escolha se deu no cenário 2 basicamente pela quantidade de geradores efetivamente instalados na usina de Palmas, maior geradora de energia eólica do Estado. De acordo com a COPEL (2012), o número de aerogeradores na usina é apenas 5, sendo

considerados no cenário 50 fontes de geração de energia eólica. O motivo da escolha foi uma comparação mais homogênea, uma vez que com o verdadeiro potencial seriam atingidos valores irrisórios em vista da geração solar e o consumo total de energia. De acordo com Tiepolo (2015), a comparação e obtenção de dados da energia solar fotovoltaica em comparação com a Alemanha é tão pertinente pois a média de irradiação do Estado do Paraná é similar à de países europeus como Portugal e Espanha, e se comparado com a Alemanha (interessante também pela comparação territorial), a média de irradiação paranaense é 59% maior do que a produtividade média no país europeu.

Após determinar a potência compatível com os dados apresentados, foi feito o cálculo de produção de cada fonte ao mês, como visto na Tabela 18 bem como, novamente os valores de geração total das fontes complementares e curva de demanda baseada no consumo do Estado do Paraná.

Tabela 18 - Consumo, geração de energia elétrica por fonte e balanço de energia elétrica mês a mês - Cenário 2.

| Mês | Consumo de energia (MWh) | Geração Solar (MWh) | Geração Eólica (MWh) | Geração total das fontes complementares (MWh) | Balanço de Energia Elétrica consumida e gerada (MWh) |
|-----------|--------------------------|---------------------|----------------------|---|--|
| Janeiro | 2.912.760,00 | 2.399.400,00 | 7.172,79 | 2.406.572,79 | -506.187,21 |
| Fevereiro | 2.767.900,80 | 2.167.200,00 | 7.172,79 | 2.174.372,79 | -593.528,01 |
| Março | 2.867.599,20 | 2.488.680,00 | 12.630,79 | 2.501.310,79 | -366.288,41 |
| Abril | 2.697.624,00 | 2.208.600,00 | 12.630,79 | 2.221.230,79 | -476.393,21 |
| Maió | 2.723.709,60 | 2.003.220,00 | 12.630,79 | 2.015.850,79 | -707.858,81 |
| Junho | 2.582.424,00 | 1.938.600,00 | 14.439,43 | 1.953.039,43 | -629.384,57 |
| Julho | 2.729.959,20 | 1.953.000,00 | 14.439,43 | 1.967.439,43 | -762.519,77 |
| Agosto | 2.739.631,20 | 2.338.020,00 | 14.439,43 | 2.352.459,43 | -387.171,77 |
| Setembro | 2.676.672,00 | 2.257.200,00 | 11.476,71 | 2.268.676,71 | -407.995,29 |
| Outubro | 2.936.196,00 | 2.343.600,00 | 11.476,71 | 2.355.076,71 | -581.119,29 |
| Novembro | 2.770.704,00 | 2.322.000,00 | 11.476,71 | 2.333.476,71 | -437.227,29 |
| Dezembro | 2.828.688,00 | 2.399.400,00 | 7.172,79 | 2.406.572,79 | -422.115,21 |

Fonte: Elaboração dos autores.

Para visualização do cenário, foi gerado o Gráfico 13 que demonstra a particularidade da curva de energia solar, que nesse caso é formadora de aproximadamente 100% da complementação da matriz do Estado. Bem como, pode-se ver que a metade da potência instalada na Alemanha, seria responsável por mais de 80% da geração de eletricidade no Estado, quase suprimindo a necessidade do consumo.

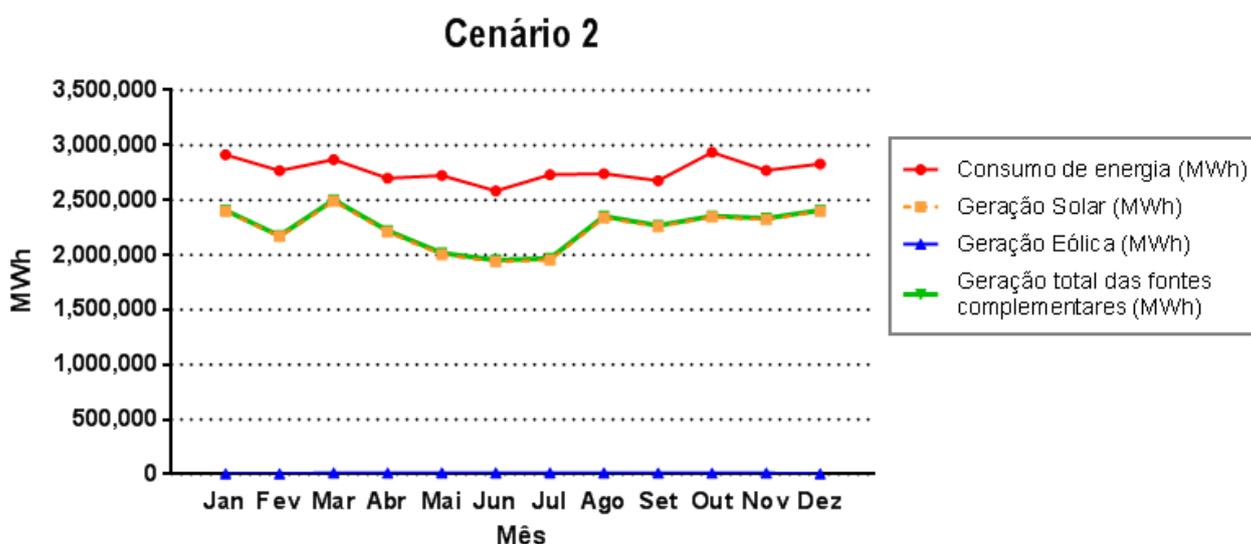


Gráfico 13 - Consumo e geração de energia elétrica para o cenário 2.
Fonte: Elaboração dos autores.

Foram novamente calculados o consumo de energia anual, bem como a geração das fontes complementares e sua totalidade, de acordo com a Tabela 19.

Tabela 19 - Consumo e geração de energia por fonte pelo período de um ano - Cenário 2.

| Ano | |
|---|---------------|
| Consumo de energia (MWh) | 33.233.868,00 |
| Geração Solar (MWh) | 26.818.920,00 |
| Geração Eólica (MWh) | 137.159,17 |
| Geração total das fontes complementares (MWh) | 26.956.079,17 |

Fonte: Elaboração dos autores.

Para o balanço anual desse cenário, é visto que a demanda de potência instalada estipulada não supriria a matriz elétrica paranaense em sua totalidade. Para tanto, aproximadamente 6,27 TWh seriam necessários, como mostra a Tabela 20.

Tabela 20 - Balanço de energia elétrica pelo período de um ano - Cenário 2.

| Balanço de energia elétrica anual | |
|---|---------------|
| Saldo de energia elétrica (MWh) | -6.277.788,83 |
| Percentual de complementariedade na matriz elétrica (%) | 81,11 |

Fonte: Elaboração dos autores.

É importante ressaltar, no entanto, que apesar da perspectiva de não suprimento da matriz elétrica paranaense, as fontes que seriam provedoras da complementação da eletricidade no Estado atenderiam quase 100% da necessidade energética do mesmo no cenário 2, demonstrando a importância no estudo e implementação dessas fontes.

4.2.3 Estudo da complementariedade – Cenário 3

Para o 3º cenário foi estipulado que a geração eólica seria a máxima possível (entre as 3 cidades estudadas), ou seja, com 675 aerogeradores em cada cidade com potência instalada de aproximadamente 1,013 GW no Estado, considerando a mesma potência instalada em fonte solar fotovoltaica, ou seja, também com 1,013 GW. Desta forma, obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 21, ilustrando o terceiro cenário com a mesma capacidade instalada das duas fontes.

Tabela 21 - Cenário 3 com a potência instalada por fonte.

| Cenário 3 | |
|---|-----------|
| Potência Instalada para energia solar (kWp) | 1.012.500 |
| Número de aerogeradores por cidade | 675 |
| Potência instalada para energia eólica (kW) | 1.012.500 |

Fonte: Elaboração dos autores.

Através da definição da potência de capacidade instalada, é possível obter a geração de energia elétrica que cada fonte é capaz de produzir mensalmente, conforme a Tabela 22, que ilustra também o consumo mensal médio de energia e a geração das duas fontes, mostrando o balanço de energia, ou seja, a diferença entre o consumo e a produção.

Tabela 22 - Consumo, geração de energia elétrica por fonte e balanço de energia elétrica mês a mês - Cenário 3.

| Mês | Consumo de energia (MWh) | Geração Solar (MWh) | Geração Eólica (MWh) | Geração total das fontes complementares (MWh) | Balanço de Energia Elétrica consumida e gerada (MWh) |
|-----------|--------------------------|---------------------|----------------------|---|--|
| Janeiro | 2.912.760,00 | 134.966,25 | 96.832,69 | 231.798,94 | -2.680.961,06 |
| Fevereiro | 2.767.900,80 | 121.905,00 | 96.832,69 | 218.737,69 | -2.549.163,11 |
| Março | 2.867.599,20 | 139.988,25 | 170.515,69 | 310.503,94 | -2.557.095,26 |
| Abril | 2.697.624,00 | 124.233,75 | 170.515,69 | 294.749,44 | -2.402.874,56 |
| Maio | 2.723.709,60 | 112.681,13 | 170.515,69 | 283.196,81 | -2.440.512,79 |
| Junho | 2.582.424,00 | 109.046,25 | 194.932,30 | 303.978,55 | -2.278.445,45 |
| Julho | 2.729.959,20 | 109.856,25 | 194.932,30 | 304.788,55 | -2.425.170,65 |
| Agosto | 2.739.631,20 | 131.513,63 | 194.932,30 | 326.445,93 | -2.413.185,27 |
| Setembro | 2.676.672,00 | 126.967,50 | 154.935,58 | 281.903,08 | -2.394.768,92 |
| Outubro | 2.936.196,00 | 131.827,50 | 154.935,58 | 286.763,08 | -2.649.432,92 |
| Novembro | 2.770.704,00 | 130.612,50 | 154.935,58 | 285.548,08 | -2.485.155,92 |
| Dezembro | 2.828.688,00 | 134.966,25 | 96.832,69 | 231.798,94 | -2.596.889,06 |

Fonte: Elaboração dos autores.

Com os dados da Tabela 22, um gráfico pode ser elaborado, para representar graficamente esta complementariedade. O Gráfico 14, ilustra o consumo total de energia mensal, a geração de energia solar, a geração de energia eólica e a geração total das duas fontes, para o cenário 3, com a capacidade máxima de geração eólica e a mesma capacidade instalada em solar. Neste caso, a geração eólica é mais elevada que a solar, mesmo com a mesma capacidade instalada, entretanto a capacidade eólica está no limite máximo, enquanto a capacidade solar está bem abaixo do seu potencial máximo de instalação, e desta forma a curva de geração total das duas fontes ficam distantes da curva de consumo de energia do Estado.

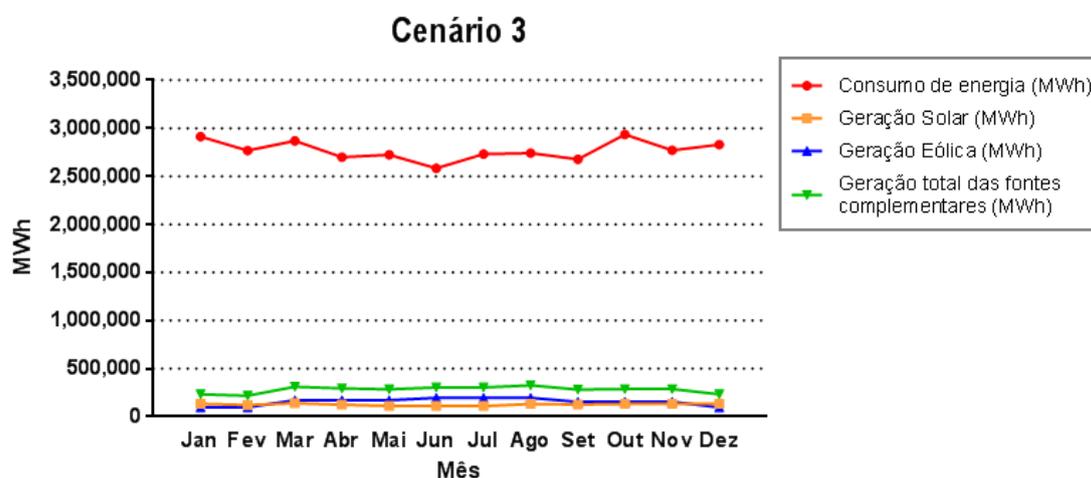


Gráfico 14 - Consumo e geração de energia elétrica para o cenário 3.

Fonte: Elaboração dos autores.

Ainda é possível analisar o consumo e geração no período anual, conforme a Tabela 23, no cenário 3.

Tabela 23 - Consumo e geração de energia elétrica por fonte pelo período de um ano - Cenário 3.

| Ano | |
|---|---------------|
| Consumo de energia (MWh) | 33.233.868,00 |
| Geração Solar (MWh) | 1.508.564,25 |
| Geração Eólica (MWh) | 1.851.648,76 |
| Geração total das fontes complementares (MWh) | 3.360.213,01 |

Fonte: Elaboração dos autores.

A Tabela 24, representa o balanço de energia para o 3º cenário, ou seja, para este caso, as duas fontes de energia supririam apenas 10,11% da curva total de demanda de energia, o que demandaria mais de 29 TWh de energia por outras fontes de geração de energia, como a hidráulica e a térmica, para atender o consumo paranaense.

Tabela 24 - Balanço de energia elétrica pelo período de um ano - Cenário 3.

| Balanço de energia elétrica anual | |
|---|-----------------------|
| Saldo de energia elétrica (MWh) | -29.873.654,99 |
| Percentual de complementariedade na matriz elétrica (%) | 10,11 |

Fonte: Elaboração dos autores.

Este cenário, mesmo apresentando um suprimento menor da curva de demanda paranaense, ilustra como é possível obter significativa participação das fontes renováveis, o que representaria o desligamento de muitas usinas térmicas, contribuindo desta maneira com o aspecto ambiental e econômico.

5 CONCLUSÃO

Através da metodologia proposta foi possível atingir os objetivos deste trabalho. O referencial teórico proporcionou a base necessária para o alcance desses objetivos, contribuindo para a construção dos cenários que demonstraram a possibilidade de aplicação da complementariedade usando as fontes solar fotovoltaica e eólica na matriz elétrica do Estado do Paraná.

Os estudos apresentados demonstram o potencial paranaense para fontes de energias renováveis, as quais possuem uma série de vantagens se comparadas às fontes tradicionais de geração de energia elétrica, dentre os principais aspectos positivos pode-se frisar a sustentabilidade, o baixo impacto ambiental e a sua capacidade de reutilização contínua.

Com base na pesquisa elaborada, mostrou-se que ambas as fontes detêm um enorme potencial, no entanto, para a energia solar fotovoltaica este potencial pode ser utilizado de forma distribuída, haja vista que todas as cidades paranaenses possuem potencial representativo se comparado com os países europeus. Além disso, sua geração dispensa o modo centralizado, não sendo necessariamente instalados em grandes usinas, consumidores residenciais podem instalar sistemas fotovoltaicos com intuito de atender à sua demanda pessoal por energia elétrica. A geração distribuída tem como consequência outro fator positivo, como a diminuição de custos de infraestrutura para os sistemas de transmissão e distribuição e também a redução das perdas de energia. E ainda, ao contrário de outras fontes de geração, a solar fotovoltaica não precisa necessariamente de investimentos públicos diretos, pois pode, como geração distribuída, ser implantada pelos próprios consumidores. Basta para isto que existam políticas públicas específicas de incentivo à disseminação desta fonte, como já destacado por Tiepolo (2015).

Por sua vez, a geração de energia por meio de fonte eólica permite, nas mesmas condições de potência instalada, um maior fator de capacidade, um melhor rendimento se comparada à solar fotovoltaica. Entretanto, as possibilidades de instalação de usinas eólicas são mais limitadas, visto que são muitos os fatores que influenciam na escolha de áreas para a implementação

do sistema, restringindo a sua aplicabilidade, fato este que restringiu a pesquisa à apenas algumas cidades com viabilidade física e técnica. Inclusive, as restrições afetam não somente o âmbito de instalação mas também a busca por dados atualizados e mais específicos, como a velocidade do vento, altura dos anemômetros de medição, os fatores k e c para cada cidade, informações para determinados períodos de tempo, entre outros. E da mesma maneira existem poucas fontes de pesquisa pública e de livre acesso para consulta sobre o assunto.

A complementariedade se torna pertinente, ao passo que cada fonte apresenta um melhor potencial em determinada época do ano. A fonte solar fotovoltaica demonstra valores mais favoráveis de irradiação para os meses de verão, o que reflete uma maior capacidade de geração de energia elétrica neste período, enquanto a fonte eólica é mais vantajosa nos meses de inverno por apresentar maior velocidade do vento, e conseqüentemente maior produção de energia elétrica nesta estação do ano. Logo, há a possibilidade de atender a demanda de consumo de energia elétrica paranaense mesmo em períodos de estiagem, nos meses secos, diminuindo assim o risco de cortes de energia, e ainda a estabilização dos preços das tarifas, evitando a utilização de termelétricas na complementação da matriz do Estado.

De acordo com os cenários apresentados, os resultados são bastante positivos podendo contribuir para suprir as necessidades futuras. O primeiro cenário evidenciou a possibilidade de instalação de um grande potencial solar fotovoltaico e eólico, o produto desta aplicação demonstrou que as duas fontes renováveis conseguem suprir a maior parte da demanda de energia do Estado, mais de 86%, um percentual muito representativo e significativo visto a demanda de energia elétrica do Estado.

O segundo cenário comprovou que a energia solar fotovoltaica é capaz de suprir praticamente 81% da curva de demanda paranaense, de forma quase individual, indicando assim a necessidade de investimentos neste tipo de geração de energia elétrica.

O terceiro cenário, ainda que suprimindo apenas 10% do consumo paranaense, é uma possibilidade expressiva de implementação do sistema, pois representa o objetivo do estudo do trabalho, que é a complementação da

matriz, sendo viável a sua instalação a curto e médio prazo, reduzindo assim custos com geração térmica.

A exatidão da pesquisa obteria melhores resultados com a obtenção de dados mais precisos com relação à energia eólica, como por exemplo os potenciais para torres com altura de 100 metros e estudos de viabilidade de instalação de sistemas *Offshore*, que aumentaria o potencial significativamente para o Estado do Paraná, podendo chegar até 90 GW de potência instalada, como esboçado nos dados levantados no Atlas do Potencial Eólico do Estado do Paraná.

Há uma tendência mundial de modificação da estrutura da geração de eletricidade, com forte implementação das fontes renováveis. Este estudo comprova a capacidade de complementação entre fontes de geração de energia. Para tanto, incentivos públicos e privados podem acelerar o processo de implantação destes sistemas e outros estudos devem ser realizados para maior abrangência e desenvolvimento de tecnologias que otimizem a produção de energia elétrica.

Para isso, seguem sugestões de trabalhos futuros, relacionados aos interesses apresentados:

- Estudo da complementariedade incluindo a fonte hidráulica e outras, na matriz elétrica do Estado do Paraná.
- Obtenção de novos cenários, incluindo geração em torres eólicas de 100 metros.
- Estudos de complementariedade para os demais estados do Brasil, aplicando a mesma metodologia apresentada.
- Análise da viabilidade econômica e sócio-ambiental para implementação de sistemas eólico e solar fotovoltaico.

6 REFERÊNCIAS

ABEEólica - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA . **Incentivos e barreiras.** Disponível em:

<<http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/noticias/1603-incentivos-e-barreiras-%C3%A0-gera%C3%A7%C3%A3o-distribu%C3%ADda.html>>.

Acesso em: 16 out. 2014

ABNT. **Energia solar fotovoltaica – Terminologia**, NBR 10899. Rio de Janeiro, 2013.

ALDABÓ, Ricardo. **Energia Eólica**. São Paulo, 2002. Editora Artliber.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica Brasileiro – 2008**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas>>. Acesso em: 20 jan. 2015

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil - 2002**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2014

ANEEL. **Informações Técnicas – Bandeiras Tarifárias - 2015**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=758>>. Acesso em: 23 jan. 2015.

ANEEL. **Resoluções - 2012**. Disponível em: <<http://biblioteca.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 20 abr. 2014.

AUTODESK. **Revit products – learn and explore (Rosa dos ventos atual)**. Disponível em: <<http://knowledge.autodesk.com/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/PTB/Revit-Analyze/files/GUID-2AACFEA1-16BD-4A01-BD75-81B12E56A57C-htm.html> |>. Acesso em: 14 out. 2014

BELUCO, A; SOUZA, K. P; KRENZINGER, A. **A Complementariedade no Tempo entre as Energias Hidrelétrica e Fotovoltaica.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 8 n.1 Jan/Mar 2003, 99–109. Disponível em: <http://www.researchgate.net/profile/Alexandre_Beluco/publication/260554944_Energetic_complementarity_in_time_between_hydropower_and_PV_energy_in_portuguese/links/0f317531917c34390b000000.pdf> Acesso em: 28 mai. 2015

BEN. **Balanco Energético Nacional – 2014.** Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2015

BERMANN, Célio. **Crise Ambiental e as Energias Renováveis.** Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252008000300010.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2015

CARAJILESCOV, Pedro; MOREIRA, João M. L. **Aspectos técnicos, econômicos e sociais do uso pacífico da energia nuclear.** Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S00097252008000300012>. Acesso em: 22 jun. 2014.

CENTRO DE ENERGIA EÓLICA. **Componentes de uma turbina eólica.** Disponível em: <<http://www.pucrs.br/ce-eolica/faq.php?q=10>>. Acesso em: 23 jan. 2015

CEPA - CENTRO DE PESQUISA E PESQUISA APLICADA. **Impacto Ambiental.** Disponível em: <<http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo2B/Hidraulica/ambiental.htm>>. Acesso em: 22 jun. 2014.

CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro - 2001.** Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2014.

CER - CENTRO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS – Governo do Chile. **Vento**. Disponível em: <<http://cer.gob.cl/tecnologias/eolica/on-shore/>>. Acesso em: 15 out. 2014

CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Matriz Energética: Cenários, Oportunidades e Desafios** - 2007. Disponível em: <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_24/2012/09/06/306/20121130193425844634e.pdf>. Acesso em: 17 out. 2014.

COPEL. **Atlas do Potencial Eólico do Estado do Paraná – 2007**. Disponível em: <http://www.copel.com/download/mapa_eolico/Atlas_do_Potencial_Eolico_do_Estado_do_Parana.pdf>. Acesso em: 15 out. 2014

COPEL. **Dados Curva de Carga**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <marcos.delima@copel.com > em 30 de abril de 2015.

COPEL. **Geração - 2013**. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/acopel/atuacaoGer.jsp>>. Acesso em: 08 fev. 2014

COPEL. **Manual de Eficiência Energética – 2005**. Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/manual/\\$FILE/manual_eficiencia_energ.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/manual/$FILE/manual_eficiencia_energ.pdf)>. Acesso em: 02 mai. 2014

COPEL. **Usina Eólica de Palmas agora faz parte do parque gerador da Copel - 2012**. Disponível em: <http://www.copel.com/ci/edicoes/299/usina_eolica_de_palmas.jsp>. Acesso em: 05 jun. 2015

CPTEC. **Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos**. Disponível em: <http://infoclima.cptec.inpe.br/~rinfo/pdf_infoclima/201501.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2015

CRESESB - CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA
SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Base de dados do vento – Busca por coordenada – 2001.** Disponível em:
<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico>. Acesso em: 30 abr. 2015.

CRESESB - CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA
SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Tutorial de Energia Eólica - 2008.** Disponível em:
<http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2014.

CRESESB - CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA
SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos – 2014.** Disponível em:
<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_F_V_2014.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2015.

EIA. **International Energy Statistics.** Disponível em:
<<http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/>>. Acesso em: 29 abr. 2014.

Electrónica. **Instalação de Sistemas Solares Fotovoltaicos.** Disponível em:
<<http://www.electronica-pt.com/content/view/273/>>. Acesso em: 2 out. 2014.

ELETROBRAS. **Procel - 2015.** Disponível em:
<http://www.eletrobras.gov.br/EM_Programas_Procel/>. Acesso em 18 out. 2014

EMBRAPA. **Banco de Dados Climáticos do Brasil.** Disponível em:
<<http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/resultados/index.php?UF=pr>>. Acesso em 26 mai. 2015

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário estatístico de energia elétrica 2013.** Disponível em:

<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20130909_1.pdf>.

Acesso em: 21 jul. 2014.

EPIA. **Global Market Outlook.** Disponível em:

<[http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/Global-Market-](http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/Global-Market-Outlook-2016.pdf)

[Outlook-2016.pdf](http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/Global-Market-Outlook-2016.pdf)>. Acesso em: 28 abr. 2014.

ESTENDER, A. C.; PITTA, T. T. M. **Conceito de desenvolvimento sustentável.** Disponível em:

<http://www.institutosiegen.com.br/artigos/conceito_desenv_sustent.pdf>.

Acesso em: 25 abr. 2014.

EWING, REX A.; PRATT, DOUG. **Got sun? go solar.** Editora Pixyjack Press Inc, 2ed, Masonville, Colorado, Estados Unidos, 2009. Disponível em:

<[http://books.google.com.br/books?id=fyrprEm0VKwC&printsec=frontcover&dq=got+sun+go+solar&hl=pt-BR&sa=X&ei=VYNyVPb-](http://books.google.com.br/books?id=fyrprEm0VKwC&printsec=frontcover&dq=got+sun+go+solar&hl=pt-BR&sa=X&ei=VYNyVPb-CcKWNpiYg_gN&ved=0CBwQ6AEwAA#v=onepage&q=got%20sun%20go%20solar&f=false)

[CckKWNpiYg_gN&ved=0CBwQ6AEwAA#v=onepage&q=got%20sun%20go%20solar&f=false](http://books.google.com.br/books?id=fyrprEm0VKwC&printsec=frontcover&dq=got+sun+go+solar&hl=pt-BR&sa=X&ei=VYNyVPb-CcKWNpiYg_gN&ved=0CBwQ6AEwAA#v=onepage&q=got%20sun%20go%20solar&f=false)>. 5 nov. 2014.

FERREIRA, Gilza S. S. **Intervalo de Confiança para Previsão de Carga a Curto-Prazo.** Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 2013. Disponível em:

<http://uenf.br/pos-graduacao/engenharia-de-producao/files/2013/04/disserta%C3%A7%C3%A3o_gilza-2.pdf>. Acesso em:

02 mai. 2015.

FFSOLAR. **Referências de Sistemas Autônomos.** Disponível em:

<<http://ffsolar.com/index.php?lang=PT&page=referencias&gallery=2&special=>>>.

Acesso em: 5 nov. 2014.

FIESP. **Complementariedade energética favorece interconexão na América Latina - 2011.** Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/noticias/complementariedade-energetica-favorece-interconexao-na-america-latina/>>. Acesso em: 28 mai. 2015.

GARCIA, Douglas A. A.; DUZZI, Francisco E. **Aspectos de sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.** Disponível em: <http://www.osetoelettrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed73_fasc_distribicao_cap1.pdf>. Acesso em 08 jan. 2015

GRANDIN, Felipe. O sol já vale a pena. **Revista Brasil Energia**, Rio de Janeiro (RJ), n. 380, p. 80-83, jul. 2012.

HOUAISS, Antonio. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa.** Edição 1. São Paulo: Objetiva, 2009. 1986 p.

IBGE. **Projeções e estimativas da população do Brasil e das Unidades da Federação.** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>>. Acesso em: 22 jul. 2014.

IEA. **Key World Energy Statistics.** Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2014.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2015.

INTERNATIONAL MONETARY FUND. **World Economic Outlook 2010.** Disponível em: <<https://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2010/01/>>. Acesso em: 15 jun. 2015.

INTERNATIONAL MONETARY FUND. **World Economic Outlook 2014.** Disponível em: <<http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2014/01/pdf/text.pdf>>. Acesso em: 19 abr. 2015.

IPARDES. **Anuário Estatístico do Estado do Paraná 2013**. Disponível em: <http://www.ipardes.pr.gov.br/anuario_2013/index.html>. Acesso em: 19 abr. 2015.

ITAIPU. **Geração - 2014**. Disponível em: <<http://www.itaipu.gov.py/es/energia/generacion>>. Acesso em: 25 jan. 2015

ITAIPU. **Geração atualizada - 2015**. Disponível em: <<http://www.itaipu.gov.br/energia/geracao-atualizada>>. Acesso em: 25 jan. 2015

JUCÁ, SANDRO C.S; CARVALHO, PAULO C.M de. **Métodos de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos: aplicações em dessalinização**. Espaço científico livre projetos editoriais, Duque de Caxias, 2013. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=3KqvXt2ZKZ8C&pg=PT27&dq=monocristalino&hl=pt-BR&sa=X&ei=zFtyVL2II4mpNv-_qqgH&ved=0CCQQ6AEwAQ#v=onepage&q=monocristalino&f=false>. Acesso em 10 out. 2014.

LUCON, Oswald; GOLDEMBERG, José. **Crise financeira, energia e sustentabilidade no Brasil**. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 23, n. 65, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142009000100009&lang=pt>. Acesso em: 11 jul. 2014.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ECHER, M. P. S. **Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário - o Projeto Swera**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 26, n. 2, 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172004000200010&lang=pt>. Acesso em: 10 jul. 2014.

MELO, Arthur A. de ; CZARNOBAY, Victor. **Prospecção tecnológica das energias renováveis no brasil: panorama atual e perspectivas após resolução normativa 482 e programa de patentes verdes**. Disponível em: <<http://www.portalseer.ufba.br/index.php/nit/article/view/11402/8229>>. Acesso em: 30 jan. 2015

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Energia eólica - 2014**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-eolica>>. Acesso em: 20 jun. 2014.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **XIV Congresso Brasileiro de Energia - 2012**. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/CBE2012/xiv-cbe-palestra-2-altino-ventura-filho-24-outubro-2012>>. Acesso em: 19 abr. 2015.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Luz para todos - 2015**. Disponível em: <http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/Asp/o_programa.asp>. Acesso em: 19 abr. 2015.

MUKERJEE, A.K.; NIVEDITA THAKUR. **Photovoltaic Systems analysis and design**. PHI Learning Private Limited, Nova Delhi, 2011. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=FatKWSuVk48C&pg=PA206&dq=photovoltaic+systems&hl=pt-BR&sa=X&ei=LFVyVP2TK4WrggSm2YO4CA&ved=0CFYQ6AEwBg#v=onepage&q=photovoltaic%20systems&f=false>>. Acesso em: 10 out. 2014.

NATIONAL GEOGRAPHIC LEARNING. **National geographic reader: Sustainability**. Delmar Cengage Learning, 2012. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=LTwLAAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false>>. Acesso em: 30 set. 2014.

Nations Encyclopedia. **Germany**. Disponível em: <<http://www.nationsencyclopedia.com/economies/Europe/Germany.html>>. Acesso em: 28 jun. 2015.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Horário de Verão**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/analise_carga_demanda/horario_verao.aspx>. Acesso em: 02 mai. 2015.

PEREIRA, Enio B.; MARTINS, Fernando R.; ABREU, Samuel L. de; RUTHER, Ricardo. **Atlas Brasileiro de Energia Solar – 2006**. Disponível em: <http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/atlas_solar-reduced.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2015.

PINTO, Milton de Oliveira. **Fundamentos de Energia Eólica**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

PORTAL ENERGIA. **História e funcionamento da energia eólica no Brasil**. Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/historia-e-funcionamento-da-energia-eolica-no-brasil/#ixzz3G9O20r6s>>. Acesso em: 14 out. 2014

PROINFA - PROGRAMA DE INCENTIVO AS FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Tecnologias contempladas**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/menu/programa/tecnologias_contempladas.html>. Acesso em: 22 jun. 2014.

RAMOS, M. C. G. **Avaliação dos Pontos de Desperdício de Energia Elétrica na Indústria**. Curso de Conservação de energia, 2003. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/322/1/CT_COELE_2011_2_18.pdf>. Acesso em: 02 mai. 2015.

REN21 - RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY. **About REN21**. Disponível em: <<http://www.ren21.net/AboutREN21.aspx>>. Acesso em: 29 jun. 2014.

REVISTA PLANETA TERRA. **China, o poluidor-mor se torna líder das energias renováveis**. Disponível em: <<http://revistaplaneta.terra.com.br/secao/meio-ambiente/china-o-poluidor-mor-se-torna-lider-das-energias-renovaveis>>. Acesso em: 24 jan. 2015.

SAPA SOLAR. **Tecnologia fotovoltaica, uma solução promissora.** Disponível em: <<http://www.sapa-solar.com/portugal/a-promessa-solar/Tecnologia-fotovoltaica.html>>. Acesso em: 17 mai. 2014.

SolarGis. **Solar and PV Data.** Disponível em: <<http://solargis.info/doc/solar-and-pv-data#GHI>>. Acesso em: 2 out. 2014.

SUZLON. **Products - 2015.** Disponível em: <<http://www.suzlon.com/products/l3.aspx?l1=2&l2=44&l3=128>>. Acesso em: 30 abr. 2015.

TIEPOLO, Gerson. M. *et al.*, 2014. **Comparação entre o potencial de geração fotovoltaica no Estado do Paraná com Alemanha, Itália e Espanha.** V Congresso Brasileiro de Energia Solar. Disponível em: <<http://www.escriorioverdeonline.com.br/wp-content/uploads/2012/08/R0204-1.pdf>>. Acesso em: 7 fev. 2015.

TIEPOLO, Gerson. M., 2015. **Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Estado do Paraná.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas – PPGEPS. Tese de doutorado. Disponível em: <<http://www.researchgate.net/publication/275828862>>. Acesso em: 5 mai. 2015.

TOLMASQUIM, T. M. ; GUERREIRO, A. ; GORINI, R. **Matriz energética brasileira: uma prospectiva.** Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-33002007000300003&lang=pt>. Acesso em 30 out. 2014.

UDOP - UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA. **Empresas de energia eólica estão investindo R\$ 10 bilhões no Piauí.** Disponível em: <http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=1111092#nc>. Acesso em: 8 jul. 2014.

URBANETZ Jr, Jair. **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade de energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar na conectividade.** Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/94284/282788.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 7 fev. 2015.

VEIGA, José Eli. **Desenvolvimento sustentável – desafio do século XXI.** *Ambiente e Sociedade*, Campinas, v. 7, n. 2, 2004. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2004000200016>. Acesso em: 11 jul. 2014.

VIANA, Trajano de Souza. **Potencial de Geração de Energia Elétrica com Sistemas Fotovoltaicos com Concentrador no Brasil.** Florianópolis, 2010.

VILLALVA, Marcelo Gradella. GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia Solar Fotovoltaica.** São Paulo, 2013. Editora Érica.

VIRIDIAN – Ecotecnologia. **Energia Eólica.** Disponível em: <http://www.viridian.com.br/tecnologia/energia+eolica/6>>. Acesso em: 18 out. 2014

WIKIMEDIA. **Wind Turbine.** Disponível em: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wind_turbine_int_pt.svg>. Acesso em: 23 jan. 2015

WWF - WORLD WIDE FUND FOR NATURE. **Além de grandes hidrelétricas:** Políticas para fontes renováveis de energia elétrica no Brasil. Disponível em: <http://d3nehc6yl9gzo4.cloudfront.net/downloads/alem_de_grandes_hidreletricas_sumario_para_tomadores_de_decisao.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2014.

ZILLES, R.; MACÊDO, W.N.; GALHARDO, M. A. B.; OLIVEIRA, S.H. F. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. p. 208.

APÊNDICE A

Cálculos do Potencial da cidade de Palmas – Verão.

| Memorial de cálculo do potencial eólico | | |
|--|-------------|-------------------|
| Cidade Palmas | | |
| Verão (Dez-Fev) | | |
| Coordenadas Latitude | 26°29' 03" | S |
| Coordenadas Longitude | 51°59' 26" | W |
| Densidade do ar (ρ) - nível do mar | 1,225 | kg/m ³ |
| Densidade de potência (E) | 244 | W/m ² |
| Velocidade do vento (u ou v) | 6,05 | m/s |
| 1. Cálculo da densidade do ar | | |
| Temperatura (T) | 20 | °C |
| Altitude (Z) | 1100 | m |
| Densidade do ar (ρ) - calculado | 1,05789542 | kg/m ³ |
| 2. Cálculo da superfície de contato | | |
| Diâmetro de um rotor (torre de 50m) | 40 | m |
| Área varrida por um rotor (A) | 1256,637061 | m ² |
| Coefficiente aerodinâmico do rotor (Cp) | 0,5 | |
| Eficiência (η) | 0,93 | |
| 3. Potência instantânea gerada por um aerogerador | | |
| Potência (P) (0 m/s) | 0 | ener. G |
| Potência (P) (1 m/s) | 0,309083313 | 0,010812 |
| Potência (P) (2 m/s) | 2,472666502 | 0,178916 |
| Potência (P) (3 m/s) | 8,345249444 | 0,863694 |
| Potência (P) (4 m/s) | 19,78133202 | 2,447359 |
| Potência (P) (5 m/s) | 38,63541409 | 5,062754 |
| Potência (P) (6 m/s) | 66,76199555 | 8,420674 |
| Potência (P) (7 m/s) | 106,0155763 | 11,85088 |
| Potência (P) (8 m/s) | 158,2506561 | 14,5444 |
| Potência (P) (9 m/s) | 225,321735 | 15,86808 |
| Potência (P) (10 m/s) | 309,0833127 | 15,59006 |
| Potência (P) (11 m/s) | 411,3898893 | 13,91875 |
| Potência (P) (12 m/s) | 500 | 10,64095 |
| Potência (P) (13 m/s) | 500 | 6,282237 |
| Potência (P) (14 m/s) | 500 | 3,483163 |
| Potência (P) (15 m/s) | 500 | 1,814366 |
| Potência (P) (16 m/s) | 500 | 0,888117 |
| Potência (P) (17 m/s) | 500 | 0,408569 |
| Potência (P) (18 m/s) | 500 | 0,176658 |
| Potência (P) (19 m/s) | 500 | 0,07179 |
| Potência (P) (20 m/s) | 500 | 0,027419 |
| Potência (P) (21 m/s) | 500 | 0,009841 |
| Potência (P) (22 m/s) | 500 | 0,003319 |
| Potência (P) (23 m/s) | 500 | 0,001051 |
| Potência (P) (24 m/s) | 500 | 0,000313 |
| Potência (P) (25 m/s) | 500 | 8,75E-05 |
| Fator k | 2,13 | |
| Fator C | 6,83 | m/s |
| 4. Cálculo da frequência de ocorrência | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (0 m/s) | 0 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (1 m/s) | 0,034979317 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (2 m/s) | 0,072357469 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (3 m/s) | 0,103495308 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (4 m/s) | 0,123720627 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (5 m/s) | 0,131039208 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (6 m/s) | 0,126129752 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (7 m/s) | 0,111784365 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (8 m/s) | 0,091907369 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (9 m/s) | 0,070424079 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (10 m/s) | 0,050439661 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (11 m/s) | 0,033833478 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (12 m/s) | 0,021281893 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (13 m/s) | 0,012564474 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (14 m/s) | 0,006966326 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (15 m/s) | 0,003628732 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (16 m/s) | 0,001776234 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (17 m/s) | 0,000817138 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (18 m/s) | 0,000353315 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (19 m/s) | 0,000143581 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (20 m/s) | 5,48372E-05 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (21 m/s) | 1,96815E-05 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (22 m/s) | 6,6374E-06 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (23 m/s) | 2,10298E-06 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (24 m/s) | 6,259E-07 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (25 m/s) | 1,74959E-07 | |
| Variação do vento (Δu) | 1 | m/s |
| Tempo de geração anual | 2,166 | h |
| 5. Cálculo da produção de energia (1 aerogerador) | | |
| Produção de energia sazonal | 243,8141741 | MWh |

Cálculos do Potencial da cidade de Palmas – Outono.

| Memorial de cálculo do potencial eólico | | |
|--|-------------|-------------------|
| Cidade Palmas | | |
| Outono (Mar-Mai) | | |
| Coordenadas Latitude | 26°29' 03" | S |
| Coordenadas Longitude | 51°59' 26" | W |
| Densidade do ar (ρ) - nível do mar | 1,225 | kg/m ³ |
| Densidade de potência (E) | 461 | W/m ² |
| Velocidade do vento (u ou v) | 7,49 | m/s |
| 1. Cálculo da densidade do ar | | |
| Temperatura (T) | 16,23 | oC |
| Altitude (Z) | 1100 | m |
| Densidade do ar (ρ) - calculado | 1,071677526 | kg/m ³ |
| 2. Cálculo da superfície de contato | | |
| Diâmetro de um rotor (torre de 50m) | 40 | m |
| Área varrida por um rotor (A) | 1256,637061 | m ² |
| Coefficiente aerodinâmico do rotor (Cp) | 0,5 | |
| Eficiência (η) | 0,93 | |
| 3. Potência instantânea gerada por um aerogerador | | |
| Potência (P) (0 m/s) | 0 | kW |
| Potência (P) (1 m/s) | 0,313110005 | kW |
| Potência (P) (2 m/s) | 2,504880037 | kW |
| Potência (P) (3 m/s) | 8,453970124 | kW |
| Potência (P) (4 m/s) | 20,03904029 | kW |
| Potência (P) (5 m/s) | 39,13875057 | kW |
| Potência (P) (6 m/s) | 67,63176099 | kW |
| Potência (P) (7 m/s) | 107,3967316 | kW |
| Potência (P) (8 m/s) | 160,3123224 | kW |
| Potência (P) (9 m/s) | 228,2571934 | kW |
| Potência (P) (10 m/s) | 313,1100046 | kW |
| Potência (P) (11 m/s) | 416,7494161 | kW |
| Potência (P) (12 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (13 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (14 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (15 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (16 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (17 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (18 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (19 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (20 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (21 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (22 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (23 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (24 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (25 m/s) | 500 | kW |
| Fator k | 2,14 | |
| Fator C | 8,46 | m/s |
| 4. Cálculo da frequência de ocorrência | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (0 m/s) | 0 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (1 m/s) | 0,021945284 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (2 m/s) | 0,046685405 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (3 m/s) | 0,069586631 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (4 m/s) | 0,088057776 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (5 m/s) | 0,100400453 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (6 m/s) | 0,10586338 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (7 m/s) | 0,104641586 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (8 m/s) | 0,097733024 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (9 m/s) | 0,086675372 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (10 m/s) | 0,073226688 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (11 m/s) | 0,059062878 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (12 m/s) | 0,045550665 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (13 m/s) | 0,033626361 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (14 m/s) | 0,023779713 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (15 m/s) | 0,016118205 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (16 m/s) | 0,010475696 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (17 m/s) | 0,006530211 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (18 m/s) | 0,00390511 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (19 m/s) | 0,002240554 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (20 m/s) | 0,001233462 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (21 m/s) | 0,000651567 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (22 m/s) | 0,00033026 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (23 m/s) | 0,000160622 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (24 m/s) | 7,49535E-05 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (25 m/s) | 3,35573E-05 | |
| Variação do vento (Δu) | 1 | m/s |
| Tempo de geração anual | 2,208 | h |
| 5. Cálculo da produção de energia (1 aerogerador) | | |
| Produção de energia sazonal | 397,7802774 | MWh |

Cálculos do Potencial da cidade de Palmas – Inverno.

| Memorial de cálculo do potencial eólico | | | |
|--|-------------|-------------------|---------|
| Cidade Palmas | | | |
| Inverno (Jun-Ago) | | | |
| Coordenadas Latitude | 26°29'03" | S | |
| Coordenadas Longitude | 51°59'26" | W | |
| Densidade do ar (ρ) - nível do mar | 1,225 | kg/m ³ | |
| Densidade de potência (E) | 490 | W/m ² | |
| Velocidade do vento (u ou v) | 8,04 | m/s | |
| 1. Cálculo da densidade do ar | | | |
| Temperatura (T) | 12,2 | oC | |
| Altitude (Z) | 1100 | m | |
| Densidade do ar (ρ) - calculado | 1,086812835 | kg/m ³ | |
| 2. Cálculo da superfície de contato | | | |
| Diâmetro de um rotor (torre de 50m) | 40 | m | |
| Área varrida por um rotor (A) | 1256,637061 | m ² | |
| Coefficiente aerodinâmico do rotor (Cp) | 0,5 | | |
| Eficiência (η) | 0,93 | | |
| 3. Potência instantânea gerada por um aerogerador | | | |
| | | | ener. G |
| Potência (P) (0 m/s) | 0 | kW | 0 |
| Potência (P) (1 m/s) | 0,317532059 | kW | 0,00273 |
| Potência (P) (2 m/s) | 2,540256475 | kW | 0,06462 |
| Potência (P) (3 m/s) | 8,573365602 | kW | 0,40038 |
| Potência (P) (4 m/s) | 20,3220518 | kW | 1,40739 |
| Potência (P) (5 m/s) | 39,69150742 | kW | 3,56639 |
| Potência (P) (6 m/s) | 68,58692482 | kW | 7,23259 |
| Potência (P) (7 m/s) | 108,9134964 | kW | 12,3902 |
| Potência (P) (8 m/s) | 162,5764144 | kW | 18,4927 |
| Potência (P) (9 m/s) | 231,4808713 | kW | 24,5038 |
| Potência (P) (10 m/s) | 317,5320593 | kW | 29,1704 |
| Potência (P) (11 m/s) | 422,635171 | kW | 31,4384 |
| Potência (P) (12 m/s) | 500 | kW | 28,0917 |
| Potência (P) (13 m/s) | 500 | kW | 19,7738 |
| Potência (P) (14 m/s) | 500 | kW | 12,956 |
| Potência (P) (15 m/s) | 500 | kW | 7,88992 |
| Potência (P) (16 m/s) | 500 | kW | 4,45842 |
| Potência (P) (17 m/s) | 500 | kW | 2,3336 |
| Potência (P) (18 m/s) | 500 | kW | 1,12929 |
| Potência (P) (19 m/s) | 500 | kW | 0,5043 |
| Potência (P) (20 m/s) | 500 | kW | 0,20741 |
| Potência (P) (21 m/s) | 500 | kW | 0,07841 |
| Potência (P) (22 m/s) | 500 | kW | 0,0272 |
| Potência (P) (23 m/s) | 500 | kW | 0,00864 |
| Potência (P) (24 m/s) | 500 | kW | 0,00251 |
| Potência (P) (25 m/s) | 500 | kW | 0,00066 |
| Fator k | 2,59 | | |
| Fator C | 9,05 | m/s | |
| 4. Cálculo da frequência de ocorrência | | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (0 m/s) | 0 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (1 m/s) | 0,008592792 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (2 m/s) | 0,025439781 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (3 m/s) | 0,046700888 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (4 m/s) | 0,06925435 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (5 m/s) | 0,089852779 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (6 m/s) | 0,105451486 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (7 m/s) | 0,113761751 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (8 m/s) | 0,113747924 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (9 m/s) | 0,105856682 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (10 m/s) | 0,091866063 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (11 m/s) | 0,074386711 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (12 m/s) | 0,05618342 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (13 m/s) | 0,039547673 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (14 m/s) | 0,025911944 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (15 m/s) | 0,015779838 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (16 m/s) | 0,008916841 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (17 m/s) | 0,004667201 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (18 m/s) | 0,002258578 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (19 m/s) | 0,0010086 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (20 m/s) | 0,000414825 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (21 m/s) | 0,000156827 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (22 m/s) | 5,43913E-05 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (23 m/s) | 1,72716E-05 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (24 m/s) | 5,01151E-06 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (25 m/s) | 1,32612E-06 | | |
| Variação do vento (Δu) | 1 | m/s | |
| Tempo de geração anual | 2,208 | h | |
| 5. Cálculo da produção de energia (1 aerogerador) | | | |
| Produção de energia sazonal | 455,1384893 | MWh | |

Cálculos do Potencial da cidade de Palmas – Primavera.

| Memorial de cálculo do potencial eólico | | |
|--|-------------|-------------------|
| Cidade Palmas | | |
| Primavera (Set-Nov) | | |
| Coordenadas Latitude | 26°29'03" | S |
| Coordenadas Longitude | 51°59'26" | W |
| Densidade do ar (ρ) - nível do mar | 1,225 | kg/m ³ |
| Densidade de potência (E) | 385 | W/m ² |
| Velocidade do vento (u ou v) | 6,94 | m/s |
| 1. Cálculo da densidade do ar | | |
| Temperatura (T) | 16,37 | oC |
| Altitude (Z) | 1100 | m |
| Densidade do ar (ρ) - calculado | 1,071159307 | kg/m ³ |
| 2. Cálculo da superfície de contato | | |
| Diâmetro de um rotor (torre de 50m) | 40 | m |
| Área varrida por um rotor (A) | 1256,637061 | m ² |
| Coeficiente aerodinâmico do rotor (Cp) | 0,5 | |
| Eficiência (η) | 0,93 | |
| 3. Potência instantânea gerada por um aerogerador | | |
| | | ener. G |
| Potência (P) (0 m/s) | 0 | kW |
| Potência (P) (1 m/s) | 0,312958597 | kW |
| Potência (P) (2 m/s) | 2,50366878 | kW |
| Potência (P) (3 m/s) | 8,449882131 | kW |
| Potência (P) (4 m/s) | 20,02935024 | kW |
| Potência (P) (5 m/s) | 39,11982468 | kW |
| Potência (P) (6 m/s) | 67,59905705 | kW |
| Potência (P) (7 m/s) | 107,3447989 | kW |
| Potência (P) (8 m/s) | 160,2348019 | kW |
| Potência (P) (9 m/s) | 228,1468175 | kW |
| Potência (P) (10 m/s) | 312,9585974 | kW |
| Potência (P) (11 m/s) | 416,5478932 | kW |
| Potência (P) (12 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (13 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (14 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (15 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (16 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (17 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (18 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (19 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (20 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (21 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (22 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (23 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (24 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (25 m/s) | 500 | kW |
| Fator k | 2,03 | |
| Fator C | 7,83 | m/s |
| 4. Cálculo da frequência de ocorrência | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (0 m/s) | 0 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (1 m/s) | 0,030654911 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (2 m/s) | 0,059706614 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (3 m/s) | 0,083685432 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (4 m/s) | 0,100508554 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (5 m/s) | 0,109237805 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (6 m/s) | 0,110070346 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (7 m/s) | 0,104153457 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (8 m/s) | 0,093259411 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (9 m/s) | 0,079404795 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (10 m/s) | 0,064501678 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (11 m/s) | 0,050104817 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (12 m/s) | 0,037283172 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (13 m/s) | 0,026608903 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (14 m/s) | 0,018232585 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (15 m/s) | 0,012003552 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (16 m/s) | 0,007597592 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (17 m/s) | 0,004625505 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (18 m/s) | 0,002709768 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (19 m/s) | 0,001528047 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (20 m/s) | 0,00082964 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (21 m/s) | 0,0004338 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (22 m/s) | 0,000218483 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (23 m/s) | 0,000106009 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (24 m/s) | 4,95592E-05 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (25 m/s) | 2,2326E-05 | |
| Varição do vento (Δu) | 1 | m/s |
| Tempo de geração anual | 2,184 | h |
| 5. Cálculo da produção de energia (1 aerogerador) | | |
| Produção de energia sazonal | 340,7365765 | MWh |

Cálculos do Potencial da cidade de Guarapuava – Verão.

| Memorial de cálculo do potencial eólico | | |
|--|-------------|-------------------|
| Cidade Guarapuava | | |
| Verão (Dez-Fev) | | |
| Coordenadas Latitude | 25°23'43" | S |
| Coordenadas Longitude | 51°27'29" | W |
| Densidade do ar (ρ) - nível do mar | 1,225 | kg/m ³ |
| Densidade de potência (E) | 79 | W/m ² |
| Velocidade do vento (u ou v) | 4,1 | m/s |
| 1. Cálculo da densidade do ar | | |
| Temperatura (T) | 20,5 | oC |
| Altitude (Z) | 1020 | m |
| Densidade do ar (ρ) - calculado | 1,066198653 | kg/m ³ |
| 2. Cálculo da superfície de contato | | |
| Diâmetro de um rotor (torre de 50m) | 40 | m |
| Área varrida por um rotor (A) | 1256,637061 | m ² |
| Coefficiente aerodinâmico do rotor (Cp) | 0,5 | |
| Eficiência (η) | 0,93 | |
| 3. Potência instantânea gerada por um aerogerador | | |
| | | ener. G |
| Potência (P) (0 m/s) | 0 | kW |
| Potência (P) (1 m/s) | 0,311509253 | kW |
| Potência (P) (2 m/s) | 2,492074021 | kW |
| Potência (P) (3 m/s) | 8,410749821 | kW |
| Potência (P) (4 m/s) | 19,93659217 | kW |
| Potência (P) (5 m/s) | 38,93865658 | kW |
| Potência (P) (6 m/s) | 67,28599856 | kW |
| Potência (P) (7 m/s) | 106,8476736 | kW |
| Potência (P) (8 m/s) | 159,4927373 | kW |
| Potência (P) (9 m/s) | 227,0902452 | kW |
| Potência (P) (10 m/s) | 311,5092526 | kW |
| Potência (P) (11 m/s) | 414,6188152 | kW |
| Potência (P) (12 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (13 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (14 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (15 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (16 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (17 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (18 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (19 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (20 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (21 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (22 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (23 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (24 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (25 m/s) | 500 | kW |
| Fator k | 2,05 | |
| Fator C | 4,63 | m/s |
| 4. Cálculo da frequência de ocorrência | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (0 m/s) | 0 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (1 m/s) | 0,084829725 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (2 m/s) | 0,153351591 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (3 m/s) | 0,186153342 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (4 m/s) | 0,18100496 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (5 m/s) | 0,148867744 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (6 m/s) | 0,106053898 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (7 m/s) | 0,066257431 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (8 m/s) | 0,036561583 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (9 m/s) | 0,017898637 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (10 m/s) | 0,007795982 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (11 m/s) | 0,003027059 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (12 m/s) | 0,001049184 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (13 m/s) | 0,000324916 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (14 m/s) | 8,99639E-05 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (15 m/s) | 2,22815E-05 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (16 m/s) | 4,93791E-06 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (17 m/s) | 9,79399E-07 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (18 m/s) | 1,73884E-07 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (19 m/s) | 2,76361E-08 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (20 m/s) | 3,93218E-09 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (21 m/s) | 5,00877E-10 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (22 m/s) | 5,71165E-11 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (23 m/s) | 5,83051E-12 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (24 m/s) | 5,32774E-13 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (25 m/s) | 4,35752E-14 | |
| Variação do vento (Δu) | 1 | m/s |
| Tempo de geração anual | 2,166 | h |
| 5. Cálculo da produção de energia (1 aerogerador) | | |
| Produção de energia sazonal | 86,46834124 | MWh |

Cálculos do Potencial da cidade de Guarapuava – Outono.

| Memorial de cálculo do potencial eólico | | |
|--|-------------|-------------------|
| Cidade Guarapuava | | |
| Outono (Mar-Mai) | | |
| Coordenadas Latitude | 25°23'43" | S |
| Coordenadas Longitude | 51°27'29" | W |
| Densidade do ar (ρ) - nível do mar | 1,225 | kg/m ³ |
| Densidade de potência (E) | 160 | W/m ² |
| Velocidade do vento (u ou v) | 5,13 | m/s |
| 1. Cálculo da densidade do ar | | |
| Temperatura (T) | 16,97 | oC |
| Altitude (Z) | 1020 | m |
| Densidade do ar (ρ) - calculado | 1,079171496 | kg/m ³ |
| 2. Cálculo da superfície de contato | | |
| Diâmetro de um rotor (torre de 50m) | 40 | m |
| Área varrida por um rotor (A) | 1256,637061 | m ² |
| Coefficiente aerodinâmico do rotor (Cp) | 0,5 | |
| Eficiência (η) | 0,93 | |
| 3. Potência instantânea gerada por um aerogerador | | |
| Potência (P) (0 m/s) | 0 | kW |
| Potência (P) (1 m/s) | 0,315299504 | kW |
| Potência (P) (2 m/s) | 2,52239603 | kW |
| Potência (P) (3 m/s) | 8,513086601 | kW |
| Potência (P) (4 m/s) | 20,17916824 | kW |
| Potência (P) (5 m/s) | 39,41243797 | kW |
| Potência (P) (6 m/s) | 68,10469281 | kW |
| Potência (P) (7 m/s) | 108,1477298 | kW |
| Potência (P) (8 m/s) | 161,4333459 | kW |
| Potência (P) (9 m/s) | 229,8533382 | kW |
| Potência (P) (10 m/s) | 315,2995038 | kW |
| Potência (P) (11 m/s) | 419,6636395 | kW |
| Potência (P) (12 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (13 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (14 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (15 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (16 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (17 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (18 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (19 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (20 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (21 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (22 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (23 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (24 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (25 m/s) | 500 | kW |
| Fator k | 1,98 | |
| Fator C | 5,79 | m/s |
| 4. Cálculo da frequência de ocorrência | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (0 m/s) | 0 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (1 m/s) | 0,059312175 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (2 m/s) | 0,106816614 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (3 m/s) | 0,13677441 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (4 m/s) | 0,147152099 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (5 m/s) | 0,140195245 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (6 m/s) | 0,121091327 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (7 m/s) | 0,096024587 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (8 m/s) | 0,070442244 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (9 m/s) | 0,048040259 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (10 m/s) | 0,030561406 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (11 m/s) | 0,018180228 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (12 m/s) | 0,010131558 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (13 m/s) | 0,005296797 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (14 m/s) | 0,002600701 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (15 m/s) | 0,001200309 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (16 m/s) | 0,000521118 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (17 m/s) | 0,000212952 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (18 m/s) | 8,19504E-05 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (19 m/s) | 2,97119E-05 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (20 m/s) | 1,01527E-05 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (21 m/s) | 3,27075E-06 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (22 m/s) | 9,93684E-07 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (23 m/s) | 2,8477E-07 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (24 m/s) | 7,69982E-08 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (25 m/s) | 1,96469E-08 | |
| Variação do vento (Δu) | 1 | m/s |
| Tempo de geração anual | 2,208 | h |
| 5. Cálculo da produção de energia (1 aerogerador) | | |
| Produção de energia sazonal | 172,8942287 | MWh |

Cálculos do Potencial da cidade de Guarapuava – Inverno.

| Memorial de cálculo do potencial eólico | | |
|--|-------------|-------------------|
| Cidade Guarapuava | | |
| Inverno (Jun-Ago) | | |
| Coordenadas Latitude | 25°23'43" | S |
| Coordenadas Longitude | 51°27'29" | W |
| Densidade do ar (ρ) - nível do mar | 1,225 | kg/m ³ |
| Densidade de potência (E) | 168 | W/m ² |
| Velocidade do vento (u ou v) | 5,6 | m/s |
| 1. Cálculo da densidade do ar | | |
| Temperatura (T) | 13,2 | oC |
| Altitude (Z) | 1120 | m |
| Densidade do ar (ρ) - calculado | 1,080439375 | kg/m ³ |
| 2. Cálculo da superfície de contato | | |
| Diâmetro de um rotor (torre de 50m) | 40 | m |
| Área varrida por um rotor (A) | 1256,637061 | m ² |
| Coefficiente aerodinâmico do rotor (Cp) | 0,5 | |
| Eficiência (η) | 0,93 | |
| 3. Potência instantânea gerada por um aerogerador | | |
| Potência (P) (0 m/s) | 0 | kW |
| Potência (P) (1 m/s) | 0,315669938 | kW |
| Potência (P) (2 m/s) | 2,5253595 | kW |
| Potência (P) (3 m/s) | 8,523088313 | kW |
| Potência (P) (4 m/s) | 20,202876 | kW |
| Potência (P) (5 m/s) | 39,45874219 | kW |
| Potência (P) (6 m/s) | 68,18470651 | kW |
| Potência (P) (7 m/s) | 108,2747886 | kW |
| Potência (P) (8 m/s) | 161,623008 | kW |
| Potência (P) (9 m/s) | 230,1233845 | kW |
| Potência (P) (10 m/s) | 315,6699375 | kW |
| Potência (P) (11 m/s) | 420,1566869 | kW |
| Potência (P) (12 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (13 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (14 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (15 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (16 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (17 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (18 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (19 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (20 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (21 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (22 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (23 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (24 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (25 m/s) | 500 | kW |
| Fator k | 2,53 | |
| Fator C | 6,31 | m/s |
| 4. Cálculo da frequência de ocorrência | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (0 m/s) | 0 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (1 m/s) | 0,023710324 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (2 m/s) | 0,065447211 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (3 m/s) | 0,110368849 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (4 m/s) | 0,145591001 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (5 m/s) | 0,161221148 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (6 m/s) | 0,15391915 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (7 m/s) | 0,128043894 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (8 m/s) | 0,093139516 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (9 m/s) | 0,05923518 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (10 m/s) | 0,032871484 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (11 m/s) | 0,015867198 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (12 m/s) | 0,006637318 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (13 m/s) | 0,002396094 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (14 m/s) | 0,000743272 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (15 m/s) | 0,000197236 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (16 m/s) | 4,4572E-05 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (17 m/s) | 8,53896E-06 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (18 m/s) | 1,38056E-06 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (19 m/s) | 1,87529E-07 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (20 m/s) | 2,13066E-08 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (21 m/s) | 2,01597E-09 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (22 m/s) | 1,58159E-10 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (23 m/s) | 1,02444E-11 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (24 m/s) | 5,4554E-13 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (25 m/s) | 2,3785E-14 | |
| Variação do vento (Δu) | 1 | m/s |
| Tempo de geração anual | 2,208 | h |
| 5. Cálculo da produção de energia (1 aerogerador) | | |
| Produção de energia sazonal | 188,8230666 | MWh |

Cálculos do Potencial da cidade de Guarapuava – Primavera.

| Memorial de cálculo do potencial eólico | | |
|--|-------------|-------------------|
| Cidade Guarapuava | | |
| Primavera (Set-Nov) | | |
| Coordenadas Latitude | 25°23'43" | S |
| Coordenadas Longitude | 51°27'29" | W |
| Densidade do ar (ρ) - nível do mar | 1,225 | kg/m ³ |
| Densidade de potência (E) | 133 | W/m ² |
| Velocidade do vento (u ou v) | 4,85 | m/s |
| 1. Cálculo da densidade do ar | | |
| Temperatura (T) | 17,23 | oC |
| Altitude (Z) | 1120 | m |
| Densidade do ar (ρ) - calculado | 1,065444642 | kg/m ³ |
| 2. Cálculo da superfície de contato | | |
| Diâmetro de um rotor (torre de 50m) | 40 | m |
| Área varrida por um rotor (A) | 1256,637061 | m ² |
| Coefficiente aerodinâmico do rotor (Cp) | 0,5 | |
| Eficiência (η) | 0,93 | |
| 3. Potência instantânea gerada por um aerogerador | | |
| Potência (P) (0 m/s) | 0 | ener. G |
| Potência (P) (1 m/s) | 0,311288955 | 0,02012 |
| Potência (P) (2 m/s) | 2,490311636 | 0,29126 |
| Potência (P) (3 m/s) | 8,404801772 | 1,24759 |
| Potência (P) (4 m/s) | 19,92249309 | 3,12049 |
| Potência (P) (5 m/s) | 38,91111932 | 5,63937 |
| Potência (P) (6 m/s) | 67,23841418 | 8,09642 |
| Potência (P) (7 m/s) | 106,7721114 | 9,71378 |
| Potência (P) (8 m/s) | 159,3799447 | 10,0377 |
| Potência (P) (9 m/s) | 226,9296478 | 9,10949 |
| Potência (P) (10 m/s) | 311,2889545 | 7,35773 |
| Potência (P) (11 m/s) | 414,3255985 | 5,33955 |
| Potência (P) (12 m/s) | 500 | 3,25898 |
| Potência (P) (13 m/s) | 500 | 1,531 |
| Potência (P) (14 m/s) | 500 | 0,66875 |
| Potência (P) (15 m/s) | 500 | 0,27183 |
| Potência (P) (16 m/s) | 500 | 0,10289 |
| Potência (P) (17 m/s) | 500 | 0,03628 |
| Potência (P) (18 m/s) | 500 | 0,01193 |
| Potência (P) (19 m/s) | 500 | 0,00366 |
| Potência (P) (20 m/s) | 500 | 0,00105 |
| Potência (P) (21 m/s) | 500 | 0,00028 |
| Potência (P) (22 m/s) | 500 | 6,9E-05 |
| Potência (P) (23 m/s) | 500 | 1,6E-05 |
| Potência (P) (24 m/s) | 500 | 3,5E-06 |
| Potência (P) (25 m/s) | 500 | 7,1E-07 |
| Fator k | 2 | |
| Fator C | 5,47 | m/s |
| 4. Cálculo da frequência de ocorrência | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (0 m/s) | 0 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (1 m/s) | 0,064645841 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (2 m/s) | 0,116957028 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (3 m/s) | 0,148437564 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (4 m/s) | 0,156631563 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (5 m/s) | 0,144929407 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (6 m/s) | 0,120413582 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (7 m/s) | 0,090976761 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (8 m/s) | 0,062979777 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (9 m/s) | 0,040142354 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (10 m/s) | 0,023636328 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (11 m/s) | 0,012887328 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (12 m/s) | 0,006517966 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (13 m/s) | 0,003062001 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (14 m/s) | 0,001337494 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (15 m/s) | 0,00054366 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (16 m/s) | 0,000205778 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (17 m/s) | 7,25672E-05 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (18 m/s) | 2,38533E-05 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (19 m/s) | 7,3111E-06 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (20 m/s) | 2,09018E-06 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (21 m/s) | 5,5753E-07 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (22 m/s) | 1,38783E-07 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (23 m/s) | 3,22462E-08 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (24 m/s) | 6,99469E-09 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (25 m/s) | 1,41669E-09 | |
| Variação do vento (Δu) | 1 | m/s |
| Tempo de geração anual | 2,184 | h |
| 5. Cálculo da produção de energia (1 aerogerador) | | |
| Produção de energia sazonal | 143,8387583 | MWh |

Cálculos do Potencial da cidade de Castro – Verão.

| Memorial de cálculo do potencial eólico | | |
|--|-------------|-------------------|
| Cidade Castro | | |
| Verão (Dez-Fev) | | |
| Coordenadas Latitude | 24º47' 28" | S |
| Coordenadas Longitude | 50º00' 43" | W |
| Densidade do ar (ρ) - nível do mar | 1,225 | kg/m ³ |
| Densidade de potência (E) | 90 | W/m ² |
| Velocidade do vento (u ou v) | 4,5 | m/s |
| 1. Cálculo da densidade do ar | | |
| Temperatura (T) | 19,23 | oC |
| Altitude (Z) | 1009 | m |
| Densidade do ar (ρ) - calculado | 1,072231395 | kg/m ³ |
| 2. Cálculo da superfície de contato | | |
| Diâmetro de um rotor (torre de 50m) | 40 | m |
| Área varrida por um rotor (A) | 1256,637061 | m ² |
| Coefficiente aerodinâmico do rotor (C_p) | 0,5 | |
| Eficiência (η) | 0,93 | |
| 3. Potência instantânea gerada por um aerogerador | | |
| Potência (P) (0 m/s) | 0 | kW |
| Potência (P) (1 m/s) | 0,313271828 | kW |
| Potência (P) (2 m/s) | 2,50617462 | kW |
| Potência (P) (3 m/s) | 8,458339343 | kW |
| Potência (P) (4 m/s) | 20,04939696 | kW |
| Potência (P) (5 m/s) | 39,15897844 | kW |
| Potência (P) (6 m/s) | 67,66671474 | kW |
| Potência (P) (7 m/s) | 107,4522368 | kW |
| Potência (P) (8 m/s) | 160,3951757 | kW |
| Potência (P) (9 m/s) | 228,3751623 | kW |
| Potência (P) (10 m/s) | 313,2718275 | kW |
| Potência (P) (11 m/s) | 416,9648024 | kW |
| Potência (P) (12 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (13 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (14 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (15 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (16 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (17 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (18 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (19 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (20 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (21 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (22 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (23 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (24 m/s) | 500 | kW |
| Potência (P) (25 m/s) | 500 | kW |
| Fator k | 2,42 | |
| Fator C | 5,08 | m/s |
| 4. Cálculo da frequência de ocorrência | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (0 m/s) | 0 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (1 m/s) | 0,046464552 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (2 m/s) | 0,11417733 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (3 m/s) | 0,170504122 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (4 m/s) | 0,193644569 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (5 m/s) | 0,177923995 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (6 m/s) | 0,135172721 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (7 m/s) | 0,085543547 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (8 m/s) | 0,04514716 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (9 m/s) | 0,019833546 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (10 m/s) | 0,007227619 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (11 m/s) | 0,002175446 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (12 m/s) | 0,000538267 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (13 m/s) | 0,00010894 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (14 m/s) | 1,79436E-05 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (15 m/s) | 2,39312E-06 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (16 m/s) | 2,57128E-07 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (17 m/s) | 2,21461E-08 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (18 m/s) | 1,52148E-09 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (19 m/s) | 8,29758E-11 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (20 m/s) | 3,57514E-12 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (21 m/s) | 1,21133E-13 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (22 m/s) | 3,21274E-15 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (23 m/s) | 6,64027E-17 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (24 m/s) | 1,06484E-18 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (25 m/s) | 1,31916E-20 | |
| Variação do vento (Δu) | 1 | m/s |
| Tempo de geração anual | 2,166 | h |
| 5. Cálculo da produção de energia (1 aerogerador) | | |
| Produção de energia sazonal | 100,0849822 | MWh |

Cálculos do Potencial da cidade de Castro – Outono.

| Memorial de cálculo do potencial eólico | | |
|--|-------------|-------------------|
| Cidade Castro | | |
| Outono (Mar-Mai) | | |
| Coordenadas Latitude | 24°47'28" | S |
| Coordenadas Longitude | 50°00'43" | W |
| Densidade do ar (p) - nível do mar | 1,225 | kg/m ³ |
| Densidade de potência (E) | 169 | W/m ² |
| Velocidade do vento (u ou v) | 5,47 | m/s |
| 1. Cálculo da densidade do ar | | |
| Temperatura (T) | 16,97 | oC |
| Altitude (Z) | 1009 | m |
| Densidade do ar (p) - calculado | 1,080583949 | kg/m ³ |
| 2. Cálculo da superfície de contato | | |
| Diâmetro de um rotor (torre de 50m) | 40 | m |
| Área varrida por um rotor (A) | 1256,637061 | m ² |
| Coefficiente aerodinâmico do rotor (Cp) | 0,5 | |
| Eficiência (η) | 0,93 | |
| 3. Potência instantânea gerada por um aerogerador | | |
| Potência (P) (0 m/s) | 0 kW | ener. G |
| Potência (P) (1 m/s) | 0,315712177 | 0,01103 |
| Potência (P) (2 m/s) | 2,52569742 | 0,20318 |
| Potência (P) (3 m/s) | 8,524228792 | 1,03021 |
| Potência (P) (4 m/s) | 20,20557936 | 2,95965 |
| Potência (P) (5 m/s) | 39,46402219 | 6,02037 |
| Potência (P) (6 m/s) | 68,19383034 | 9,55575 |
| Potência (P) (7 m/s) | 108,2892769 | 12,4454 |
| Potência (P) (8 m/s) | 161,6446349 | 13,6896 |
| Potência (P) (9 m/s) | 230,1541774 | 12,945 |
| Potência (P) (10 m/s) | 315,7121775 | 10,6434 |
| Potência (P) (11 m/s) | 420,2129082 | 7,66604 |
| Potência (P) (12 m/s) | 500 | 4,45542 |
| Potência (P) (13 m/s) | 500 | 1,96307 |
| Potência (P) (14 m/s) | 500 | 0,77953 |
| Potência (P) (15 m/s) | 500 | 0,27869 |
| Potência (P) (16 m/s) | 500 | 0,0896 |
| Potência (P) (17 m/s) | 500 | 0,02588 |
| Potência (P) (18 m/s) | 500 | 0,0067 |
| Potência (P) (19 m/s) | 500 | 0,00156 |
| Potência (P) (20 m/s) | 500 | 0,00032 |
| Potência (P) (21 m/s) | 500 | 6E-05 |
| Potência (P) (22 m/s) | 500 | 9,9E-06 |
| Potência (P) (23 m/s) | 500 | 1,5E-06 |
| Potência (P) (24 m/s) | 500 | 1,9E-07 |
| Potência (P) (25 m/s) | 500 | 2,3E-08 |
| Fator k | 2,29 | |
| Fator C | 6,17 | m/s |
| 4. Cálculo da frequência de ocorrência | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (0 m/s) | 0 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (1 m/s) | 0,034942358 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (2 m/s) | 0,080444516 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (3 m/s) | 0,120856506 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (4 m/s) | 0,146476673 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (5 m/s) | 0,152553327 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (6 m/s) | 0,140126249 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (7 m/s) | 0,114927007 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (8 m/s) | 0,084689228 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (9 m/s) | 0,056244992 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (10 m/s) | 0,033712272 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (11 m/s) | 0,018243231 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (12 m/s) | 0,008910845 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (13 m/s) | 0,003926137 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (14 m/s) | 0,00155905 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (15 m/s) | 0,000557382 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (16 m/s) | 0,000179205 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (17 m/s) | 5,17523E-05 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (18 m/s) | 1,34077E-05 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (19 m/s) | 3,11229E-06 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (20 m/s) | 6,4648E-07 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (21 m/s) | 1,20014E-07 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (22 m/s) | 1,98869E-08 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (23 m/s) | 2,93778E-09 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (24 m/s) | 3,86415E-10 | |
| Frequência de ocorrência f(u) (25 m/s) | 4,52008E-11 | |
| Variação do vento (Δu) | 1 | m/s |
| Tempo de geração anual | 2,208 | h |
| 5. Cálculo da produção de energia (1 aerogerador) | | |
| Produção de energia sazonal | 187,1729927 | MWh |

Cálculos do Potencial da cidade de Castro – Inverno.

| Memorial de cálculo do potencial eólico | | | |
|--|-------------|-------------------|---------|
| Cidade Castro | | | |
| Inverno (Jun-Ago) | | | |
| Coordenadas Latitude | 24°47'28" | S | |
| Coordenadas Longitude | 50°00'43" | W | |
| Densidade do ar (ρ) - nível do mar | 1,225 | kg/m ³ | |
| Densidade de potência (E) | 196 | W/m ² | |
| Velocidade do vento (u ou v) | 5,96 | m/s | |
| 1. Cálculo da densidade do ar | | | |
| Temperatura (T) | 12,87 | oC | |
| Altitude (Z) | 1009 | m | |
| Densidade do ar (ρ) - calculado | 1,096073755 | kg/m ³ | |
| 2. Cálculo da superfície de contato | | | |
| Diâmetro de um rotor (torre de 50m) | 40 | m | |
| Área varrida por um rotor (A) | 1256,637061 | m ² | |
| Coefficiente aerodinâmico do rotor (Cp) | 0,5 | | |
| Eficiência (η) | 0,93 | | |
| 3. Potência instantânea gerada por um aerogerador | | | |
| Potência (P) (0 m/s) | 0 | kW | 0 |
| Potência (P) (1 m/s) | 0,320237805 | kW | 0,00535 |
| Potência (P) (2 m/s) | 2,561902438 | kW | 0,13083 |
| Potência (P) (3 m/s) | 8,64642073 | kW | 0,80099 |
| Potência (P) (4 m/s) | 20,49521951 | kW | 2,6741 |
| Potência (P) (5 m/s) | 40,0297256 | kW | 6,16425 |
| Potência (P) (6 m/s) | 69,17136584 | kW | 10,8372 |
| Potência (P) (7 m/s) | 109,841567 | kW | 15,2545 |
| Potência (P) (8 m/s) | 163,9617561 | kW | 17,6348 |
| Potência (P) (9 m/s) | 233,4533597 | kW | 16,9688 |
| Potência (P) (10 m/s) | 320,2378048 | kW | 13,6805 |
| Potência (P) (11 m/s) | 426,2365182 | kW | 9,26406 |
| Potência (P) (12 m/s) | 500 | kW | 4,76043 |
| Potência (P) (13 m/s) | 500 | kW | 1,78503 |
| Potência (P) (14 m/s) | 500 | kW | 0,56947 |
| Potência (P) (15 m/s) | 500 | kW | 0,15361 |
| Potência (P) (16 m/s) | 500 | kW | 0,03481 |
| Potência (P) (17 m/s) | 500 | kW | 0,00659 |
| Potência (P) (18 m/s) | 500 | kW | 0,00103 |
| Potência (P) (19 m/s) | 500 | kW | 0,00013 |
| Potência (P) (20 m/s) | 500 | kW | 1,4E-05 |
| Potência (P) (21 m/s) | 500 | kW | 1,2E-06 |
| Potência (P) (22 m/s) | 500 | kW | 8,5E-08 |
| Potência (P) (23 m/s) | 500 | kW | 4,8E-09 |
| Potência (P) (24 m/s) | 500 | kW | 2,1E-10 |
| Potência (P) (25 m/s) | 500 | kW | 7,6E-12 |
| Fator k | 2,66 | | |
| Fator C | 6,71 | m/s | |
| 4. Cálculo da frequência de ocorrência | | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (0 m/s) | 0 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (1 m/s) | 0,016712973 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (2 m/s) | 0,051068585 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (3 m/s) | 0,092637908 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (4 m/s) | 0,130474471 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (5 m/s) | 0,153991781 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (6 m/s) | 0,156671483 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (7 m/s) | 0,138877646 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (8 m/s) | 0,107554404 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (9 m/s) | 0,072686067 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (10 m/s) | 0,042719892 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (11 m/s) | 0,02173455 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (12 m/s) | 0,009520852 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (13 m/s) | 0,003570054 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (14 m/s) | 0,001138941 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (15 m/s) | 0,000307215 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (16 m/s) | 6,96222E-05 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (17 m/s) | 1,31722E-05 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (18 m/s) | 2,06732E-06 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (19 m/s) | 2,67449E-07 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (20 m/s) | 2,83415E-08 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (21 m/s) | 2,44473E-09 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (22 m/s) | 1,70595E-10 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (23 m/s) | 9,57094E-12 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (24 m/s) | 4,29089E-13 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (25 m/s) | 1,52798E-14 | | |
| Variação do vento (Δu) | 1 | m/s | |
| Tempo de geração anual | 2,208 | h | |
| 5. Cálculo da produção de energia (1 aerogerador) | | | |
| Produção de energia sazonal | 222,4042249 | MWh | |

Cálculos do Potencial da cidade de Castro – Primavera.

| Memorial de cálculo do potencial eólico | | | |
|--|-------------|-------------------|--------------|
| Cidade Castro | | | |
| Primavera (Set-Nov) | | | |
| Coordenadas Latitude | 24°47'28" | S | |
| Coordenadas Longitude | 50°00'43" | W | |
| Densidade do ar (ρ) - nível do mar | 1,225 | kg/m ³ | |
| Densidade de potência (E) | 187 | W/m ² | |
| Velocidade do vento (u ou v) | 5,66 | m/s | |
| 1. Cálculo da densidade do ar | | | |
| Temperatura (T) | 15,67 | oC | |
| Altitude (Z) | 1009 | m | |
| Densidade do ar (ρ) - calculado | 1,085447737 | kg/m ³ | |
| 2. Cálculo da superfície de contato | | | |
| Diâmetro de um rotor (torre de 50m) | 40 | m | |
| Área varrida por um rotor (A) | 1256,637061 | m ² | |
| Coeficiente aerodinâmico do rotor (Cp) | 0,5 | | |
| Eficiência (η) | 0,93 | | |
| 3. Potência instantânea gerada por um aerogerador | | | |
| Potência (P) (0 m/s) | 0 | kW | ener. G 0 |
| Potência (P) (1 m/s) | 0,317133221 | kW | 0,0101 |
| Potência (P) (2 m/s) | 2,537065769 | kW | 0,18824 |
| Potência (P) (3 m/s) | 8,562596971 | kW | 0,96748 |
| Potência (P) (4 m/s) | 20,29652615 | kW | 2,82689 |
| Potência (P) (5 m/s) | 39,64165264 | kW | 5,87288 |
| Potência (P) (6 m/s) | 68,50077577 | kW | 9,56388 |
| Potência (P) (7 m/s) | 108,7766949 | kW | 12,8416 |
| Potência (P) (8 m/s) | 162,3722092 | kW | 14,636 |
| Potência (P) (9 m/s) | 231,1901182 | kW | 14,4148 |
| Potência (P) (10 m/s) | 317,1332211 | kW | 12,4097 |
| Potência (P) (11 m/s) | 422,1043173 | kW | 9,40969 |
| Potência (P) (12 m/s) | 500 | kW | 5,76304 |
| Potência (P) (13 m/s) | 500 | kW | 2,70289 |
| Potência (P) (14 m/s) | 500 | kW | 1,14896 |
| Potência (P) (15 m/s) | 500 | kW | 0,44224 |
| Potência (P) (16 m/s) | 500 | kW | 0,15396 |
| Potência (P) (17 m/s) | 500 | kW | 0,04843 |
| Potência (P) (18 m/s) | 500 | kW | 0,01375 |
| Potência (P) (19 m/s) | 500 | kW | 0,00352 |
| Potência (P) (20 m/s) | 500 | kW | 0,00081 |
| Potência (P) (21 m/s) | 500 | kW | 0,00017 |
| Potência (P) (22 m/s) | 500 | kW | 3,1E-05 |
| Potência (P) (23 m/s) | 500 | kW | 5,2E-06 |
| Potência (P) (24 m/s) | 500 | kW | 7,8E-07 |
| Potência (P) (25 m/s) | 500 | kW | 1E-07 |
| Fator k | 2,3 | | |
| Fator C | 6,39 | m/s | |
| 4. Cálculo da frequência de ocorrência | | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (0 m/s) | 0 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (1 m/s) | 0,031840409 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (2 m/s) | 0,074197384 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (3 m/s) | 0,112988914 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (4 m/s) | 0,139279491 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (5 m/s) | 0,14814913 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (6 m/s) | 0,139617138 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (7 m/s) | 0,118054359 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (8 m/s) | 0,090138827 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (9 m/s) | 0,06235053 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (10 m/s) | 0,039130844 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (11 m/s) | 0,022292324 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (12 m/s) | 0,011526075 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (13 m/s) | 0,005405772 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (14 m/s) | 0,002297914 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (15 m/s) | 0,000884478 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (16 m/s) | 0,000307927 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (17 m/s) | 9,68545E-05 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (18 m/s) | 2,74906E-05 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (19 m/s) | 7,03263E-06 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (20 m/s) | 1,61952E-06 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (21 m/s) | 3,35322E-07 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (22 m/s) | 6,23469E-08 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (23 m/s) | 1,03973E-08 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (24 m/s) | 1,5533E-09 | | |
| Frequência de ocorrência f(u) (25 m/s) | 2,07641E-10 | | |
| Variação do vento (Δu) | 1 | m/s | |
| Tempo de geração anual | 2,184 | h | |
| 5. Cálculo da produção de energia (1 aerogerador) | | | |
| Produção de energia sazonal | 204,0272297 | MWh | |