

GILSON DEBASTIANI

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO
EÓLICO-FOTOVOLTAICO PARA CASCAVEL-PARANÁ**

**CASCATEL
PARANÁ – BRASIL
DEZEMBRO – 2013**

GILSON DEBASTIANI

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO
EÓLICO-FOTOVOLTAICO PARA CASCAVEL- PARANÁ**

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

**Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo
Nogueira**

**Co-orientador: Prof. Dr. Jair Antonio Cruz
Siqueira**

**CASCAVEL
PARANÁ – BRASIL
DEZEMBRO – 2013**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Ficha catalográfica elaborada por Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362

D331a Debastiani, Gilson
Avaliação da eficiência energética de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico para Cascavel-Paraná / Gilson Debastiani — Cascavel, PR: UNIOESTE, 2013.
77 p.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira
Co-orientador: Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
Bibliografia.

1. Energia eólica. 2. Energia Fotovoltaica. 3. Sistemas híbridos: Eólico-fotovoltaico. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 21.ed. 333.79

GILSON DEBASTIANI

“Avaliação da eficiência energética de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico para
Cascavel - Paraná”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovado** pela seguinte Banca Examinadora:

Orientador: 
Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel


Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel


Prof. Dr. José Ailton Azevedo dos Santos
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/Medianeira

Cascavel, 05 de dezembro de 2013.

*À minha querida esposa Ilva e
aos meus amados filhos João Vítor e
Bruno Eduardo.*

AGRADEC/IMENTOS

Agradeço a Deus, pois sempre tem me presenteado com o caminho certo e por ter colocado tantas pessoas maravilhosas em meu destino.

A minha esposa Ilva e meus filhos João Vítor e Bruno Eduardo, pela compreensão, companhia, incentivo e ajuda dispensada durante mais esta etapa vencida, tendo vivenciado de perto todos os momentos de angústia, aflição e alegria.

A meus pais Ricardo e Leonilda, meus irmãos e amigos, que mesmo distantes, sempre ofereceram palavras de incentivo, principalmente nos momentos em que nada dava certo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira, pelo apoio incondicional, paciência, orientação precisa e amizade.

Ao Professor Jair Antônio Cruz Siqueira pela co-orientação, bem como a todos os demais professores que tiveram importante contribuição na construção do conhecimento.

Ao grande amigo Jeferson Manenti Acorci, por se fazer presente em todas as etapas da montagem do experimento, independente do horário.

Ao Comando do 15º Batalhão Logístico e aos integrantes da SALC, por terem flexibilizado meu horário de trabalho, proporcionando o necessário tempo destinado à pesquisa.

À Unioeste e ao Programa de Pós Graduação “Mestrado em Energia na Agricultura” pela oportunidade que me foi dispensada.

A Faculdade Assis Gurgacz – FAG e Faculdade Dom Bosco, pela disponibilização das instalações e pelo apoio financeiro, permitindo assim a montagem do projeto de pesquisa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Participação das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira.....	3
Figura 2: Matriz elétrica brasileira	4
Figura 3: Evolução da matriz eólica no cenário brasileiro	7
Figura 4: Tubo de Betz	9
Figura 5: Comparação da potência máxima do vento e o valor máximo de Betz	11
Figura 6: Coeficiente de potência (C_p) para diferentes turbinas.....	11
Figura 7: Formato típico da distribuição de frequências da velocidade do vento	12
Figura 8: Origem da energia produzida pelo sol	13
Figura 9: Quantificação da energia emitida pelo sol que pode ser aproveitada	15
Figura 10: Variação da curva I-V com a radiação incidente	16
Figura 11: Eficiência de conversão versus radiação de um painel fotovoltaico.....	17
Figura 12: Evolução dos custos históricos de módulos de c-Si.....	19
Figura 13: Mapa de insolação do território brasileiro	20
Figura 14: Células de monocristalino	21
Figura 15: Células de policristalino.....	22
Figura 16: Células de silício amorfo.....	23
Figura 17: Vista panorâmica da instalação do sistema híbrido eólico fotovoltaico	26
Figura 18: Estação meteorológica	27
Figura 19: Conjunto torre e estação meteorológica.....	27
Figura 20: Console Vantage Pro2 (receptor) da estação meteorológica	27
Figura 21: Conjunto torre e aerogerador	28
Figura 22: Aerogerador utilizado no experimento, instalado na FAG	28
Figura 23: Módulos fotovoltaicos utilizados no experimento, vista frontal.....	29
Figura 24: Módulos fotovoltaicos utilizados no experimento, vista lateral	29
Figura 25: Ponte retificadora trifásica, modelo 36MT120	30
Figura 26: Proteção do controlador de carga.....	30
Figura 27: Controlador de carga C40 - 12 ... 48 V DC – 40A.....	31
Figura 28: Controlador de carga C40 - 12 ... 48 V DC – 40A vista superior.....	31
Figura 29: Bateria de chumbo-ácido 100 Ah, MAXXICARGO.....	32
Figura 30: Banco de baterias, utilizadas no experimento	32
Figura 31: Carga instalada no experimento.....	32

Figura 32: Datalogger FieldLogger instalado para a coleta de dados	33
Figura 33: Contator SIEMENS – Vista superior	34
Figura 34: Contator SIEMENS – Vista lateral	34
Figura 35 Divisor de tensão.....	35
Figura 36: Dispositivo eletrônico	35
Figura 37: Fonte de alimentação	36
Figura 38: Volt-amperímetro digital modelo ET-2082A	37
Figura 39: Vista frontal do dispositivo de coleta de dados.....	38
Figura 40: Vista lateral do dispositivo de coleta de dados	38
Figura 41: Vista externa do sistema híbrido eólico-fotovoltaico	39
Figura 42: Fonte de alimentação DC regulada MPL-1303M	41
Figura 43: Calibração dos canais de tensão do sistema e da bateria	42
Figura 44: Velocidade média diária do vento.....	45
Figura 45: Velocidade média horária do vento	46
Figura 46: Velocidade do vento – frequência de ocorrência	46
Figura 47: Energia do aerogerador	47
Figura 48: Irradiância solar – média diária.....	48
Figura 49: Irradiância solar – média horária	48
Figura 50: Irradiância solar – frequência de ocorrência	49
Figura 51: Energia dos painéis fotovoltaicos	50
Figura 52: Disponibilidade de Energia	51
Figura 53: Disponibilidade de Energia do Sistema Híbrido x Consumo de Energia	52
Figura 54: Energia elétrica fornecida pelos Sistemas Eólico e Solar x Consumo de Energia .	53
Figura 55: Energia elétrica diária do Sistema Híbrido x Bateria x Consumo de Energia	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações técnicas do aerogerador utilizado no sistema híbrido	28
Tabela 2: Especificações técnicas dos módulos fotovoltaicos.....	29
Tabela 3: Especificações técnicas do controlador de carga	31
Tabela 4: Especificações técnicas do datalogger FieldLogger	33
Tabela 5: Características do contator SIEMENS	34
Tabela 6: Características da fonte de alimentação universal – LUCCAS NULLE	36
Tabela 7: Especificações técnicas do Volt-amperímetro Digital modelo ET-2082A.....	37
Tabela 8: Dados elétricos coletados (datalogger) X valores reais	40
Tabela 9: Especificações da Fonte de Alimentação DC Regulada MPL-1303M	41
Tabela 10: Equações de correção dos valores coletados e valores reais.....	42

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Potência do vento (P)	9
Equação 2: Energia cinética (E_K)	9
Equação 3: Potência (P)	9
Equação 4: Fluxo de massa de ar	10
Equação 5: Potência de uma massa de ar	10
Equação 6: Densidade de distribuição de Weibull.....	13
Equação 7: Coeficiente de Potência	43
Equação 8: Potência Eólica do Aerogerador.....	43
Equação 9: Potência Eólica Disponível	44
Equação 10: Eficiência Solar	44
Equação 11: Potência Elétrica Solar	44
Equação 12: Potência Solar Disponível	44
Equação 13: Eficiência do Sistema Híbrido.....	44

RESUMO

O presente trabalho foi desenvolvido na Faculdade Assis Gurgaz – FAG – e teve por objetivo determinar a eficiência de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico para geração de eletricidade. Foram instalados três painéis fotovoltaicos de 140 W para avaliação da geração de energia fotovoltaica e eficiência de sua participação no sistema híbrido. Foi utilizado um aerogerador de pequeno porte de 2000 W para avaliar a produção de energia eólica local, estabelecendo a contribuição eólica no sistema híbrido. O consumo da energia foi realizado com a instalação de quatro lâmpadas incandescentes de 60 W. As medidas das grandezas meteorológicas foram obtidas com a instalação de uma estação Micrometeorológica e os dados elétricos, com o emprego de um datalogger. Foi instalado quatro baterias de 100 Ah cada para armazenar o excedente da produção de energia elétrica e alimentar a carga instalada, nos momentos em que a produção do sistema foi insuficiente; um controlador de carga, para proteger o banco de baterias de possíveis sobrecargas, quando estas estiverem carregadas e a produção foi superior ao consumo da carga instalada no sistema. Foi instalado um divisor de tensão, uma ponte retificadora e um dispositivo eletrônico, para ser possível o registro das grandezas no datalogger. Através dos dados coletados, realizou-se as correlações entre as grandezas elétricas de corrente e tensão do sistema solar e eólico, juntamente como os valores meteorológicos de irradiância solar, velocidade do vento, temperatura e pressão, permitindo assim a representação gráfica das eficiências e potências do sistema em análise. O sistema apresentou eficiência de 12,5% para a geração de energia pela fonte solar fotovoltaica, 18,7% para a geração eólica e 11,9% para todo o sistema híbrido. A participação da matriz fotovoltaica contribuiu com 75,2% de toda energia gerada, enquanto que a matriz eólica apresentou contribuição de 24,8%.

Palavras-chaves: Energia eólica, Energia fotovoltaica, Sistemas híbridos: eólico-fotovoltaico.

ABSTRACT

This study was conducted at the College Assis Gurgaz - FAG - and aimed to determine the efficiency of a wind-photovoltaic hybrid system for electricity generation. Three photovoltaic panels of 140 W for evaluation of photovoltaic power generation and efficiency of their participation in the hybrid system were installed. A wind turbine small 2000 W was used to assess the local wind energy production, establishing wind contribution in the hybrid system. Energy consumption was carried out with the installation of four incandescent lamps of 60 W. Measurements of meteorological quantities were obtained with the installation of a micrometeorological station and electrical data, with the use of a datalogger. Four batteries of 100 Ah each was installed to store excess production of electricity and power the installed load, at times when the system output was insufficient, a charge controller to protect the battery bank of possible overloads when these are loaded and the production was higher than that of the load in a system. A voltage divider, a bridge rectifier and an electronic device was installed, to be able to record the quantities in datalogger. Through the data collected, we performed correlations between the electrical quantities of current and voltage of the solar and wind system together as meteorological values of solar irradiance, wind speed, temperature and pressure, thus allowing the graphical representation of efficiencies and powers the system being analyzed. The system showed an efficiency of 12.5% for power generation by solar photovoltaic power, 18.7% for wind generation and 11.9% for the whole hybrid system. The participation of the photovoltaic array contributed 75.2% of all energy generated, while the wind array presented a contribution of 24.8%.

Keywords: Wind Energy, Photovoltaics, Hybrid systems: wind - photovoltaic.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE EQUAÇÕES.....	viii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos do trabalho.....	2
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 A energia elétrica no Brasil.....	3
2.1.1 Características da energia elétrica no Brasil.....	3
2.1.2 Importância das fontes alternativas na matriz elétrica nacional.....	4
2.2 Energia eólica.....	5
2.2.1 Energia eólica no Brasil.....	6
2.2.2 Complementaridade hídrico-eólica no Brasil.....	7
2.2.3 Velocidade do vento e potência eólica.....	8
2.2.4 Potência de uma massa de ar.....	8
2.2.5 Eficiência de Betz.....	10
2.2.6 A distribuição de Weibull.....	12
2.3 Energia solar.....	13
2.3.1 Características da energia solar.....	14
2.3.2 Energia solar fotovoltaica.....	15
2.3.3 Energia solar fotovoltaica no Brasil.....	18
2.3.4 Potencial solar.....	19
2.3.5 Painéis fotovoltaicos.....	20
2.3.5.1 Células de silício monocristalino.....	21
2.3.5.2 Células de silício policristalino.....	21
2.3.5.3 Células de silício amorfo.....	22
2.4 Sistemas híbridos de geração de energia elétrica.....	23
2.4.1 Características dos sistemas híbridos de energia elétrica.....	23

2.4.2 Sistema híbrido de energia eólica-fotovoltaica.....	24
3. MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1 Localização da área experimental	26
3.2 Equipamentos de medições meteorológicas.....	26
3.3 Equipamentos instalados no sistema híbrido eólico-fotovoltaico.....	28
3.4 Sistema de aquisição de dados elétricos.....	33
3.4.1 Equipamentos para medição de dados elétricos	34
3.5 Coleta dos dados meteorológicos e elétricos	39
3.6 Análise dos dados coletados.....	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 Velocidade do vento – média diária.....	45
4.2 Velocidade do vento – média horária	45
4.3 Velocidade do vento – frequência de ocorrência	46
4.4 Energia do aerogerador	47
4.5 Irradiância solar – média diária.....	47
4.6 Irradiância solar – média horária.....	48
4.7 Irradiância solar – frequência de ocorrência	49
4.8 Energia dos painéis fotovoltaicos.....	49
4.9 Disponibilidade de energia.....	50
4.10 Disponibilidade de energia do sistema híbrido x consumo de energia	51
4.11 Energia elétrica fornecida pelos sistemas eólico e solar x consumo de energia	52
4.12 Energia elétrica diária do sistema híbrido x bateria x consumo de energia	53
4.13 Eficiências dos sistemas.....	54
5. CONCLUSÕES.....	55
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
APÊNDICE	62

1. INTRODUÇÃO

A preocupação constante com o desenvolvimento sustentável está permitindo que muitos pequenos proprietários e/ou alguns condomínios instalem em suas propriedades pequenas “usinas” para produzir a energia que consomem, não onerando ainda mais o sistema energético brasileiro. Também já é constante a utilização de painéis solares para o aquecimento de ambientes ou da água utilizada em piscinas, laticínios e residências.

No entanto, mesmo o Brasil sendo particularmente privilegiado por ter níveis de irradiância solar superiores aos das nações desenvolvidas, em função de suas proporções continentais e privilegiada localização geográfica, o seu grande potencial de energia solar apresenta uma participação inexpressível na matriz de energia elétrica nacional.

A exploração da energia eólica, mesmo apresentando grande crescimento, tem sido encontrada apenas em alguns parques eólicos no Nordeste e Sul do Brasil empregando geradores de médio e grande porte, o que faz com que sejam necessários grandes investimentos iniciais para sua instalação.

O potencial eólico e a energia solar estão presentes em praticamente todos os locais em nosso território, bastando apenas serem mensurados o investimento inicial, seu potencial isolado ou agregado em sistemas híbridos e a eficiência que os mesmos possam oferecer, permitindo assim um dimensionamento de sistemas complementares de energia, autônomos ou conectados à rede.

A utilização de aerogeradores de pequeno porte associados de forma híbrida com painéis fotovoltaicos não apresentam grande interesse quando avaliados em escala comercial, mas podem aparecer como uma alternativa atrativa quando instalados em conjuntos residenciais ou pequenas propriedades isoladas, tendo em vista a atual consciência energética ambiental que está sendo criada, pois ambas não geram resíduos nem necessitam de grandes áreas para sua instalação.

Como o sul do Brasil, em especial o oeste do Paraná, está localizado numa região que é afetada pela sazonalidade, apresentando grande incidência de radiação solar no verão e de baixa incidência no inverno, a geração de energia elétrica solar fotovoltaica, de forma isolada, não apresenta grande atrativo na sua implantação; também a nossa região não é contemplada pela incidência de ventos constantes em todas as horas do dia, não sendo confiável a dependência desta fonte, de forma isolada. Neste contexto, os projetos que

viabilizem a geração híbrida de energia devem ser explorados como forma de maximizar a eficiência dos atuais sistemas energéticos alternativos, permitindo o aproveitamento simultâneo dos potenciais eólicos e fotovoltaico com maior percentual de eficiência.

1.1. Objetivos do trabalho

O objetivo deste trabalho foi realizar a avaliação da eficiência energética de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico, pelo período de 25 dias, para a cidade de Cascavel, Paraná.

Os objetivos específicos foram:

- Avaliar a eficiência energética de um sistema eólico e um fotovoltaico; e
- Avaliar a eficiência energética de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A Energia Elétrica no Brasil

2.1.1 Características da Energia Elétrica no Brasil

A Matriz Elétrica Brasileira é essencialmente constituída por fontes renováveis de energia. A participação das fontes renováveis atingiu o percentual de 88,9% de toda energia elétrica produzida no ano de 2011, porém, em função de condições hidrológicas desfavoráveis e ao aumento da geração térmica, este índice caiu para 84,5% no ano de 2012. A Figura 1 representa que, mesmo com queda de 4,4% da participação das energias renováveis, a matriz elétrica brasileira continua com índices muito superiores aos índices apresentados pelos demais países do mundo (19,7 % no ano de 2010) (BEN, 2013).

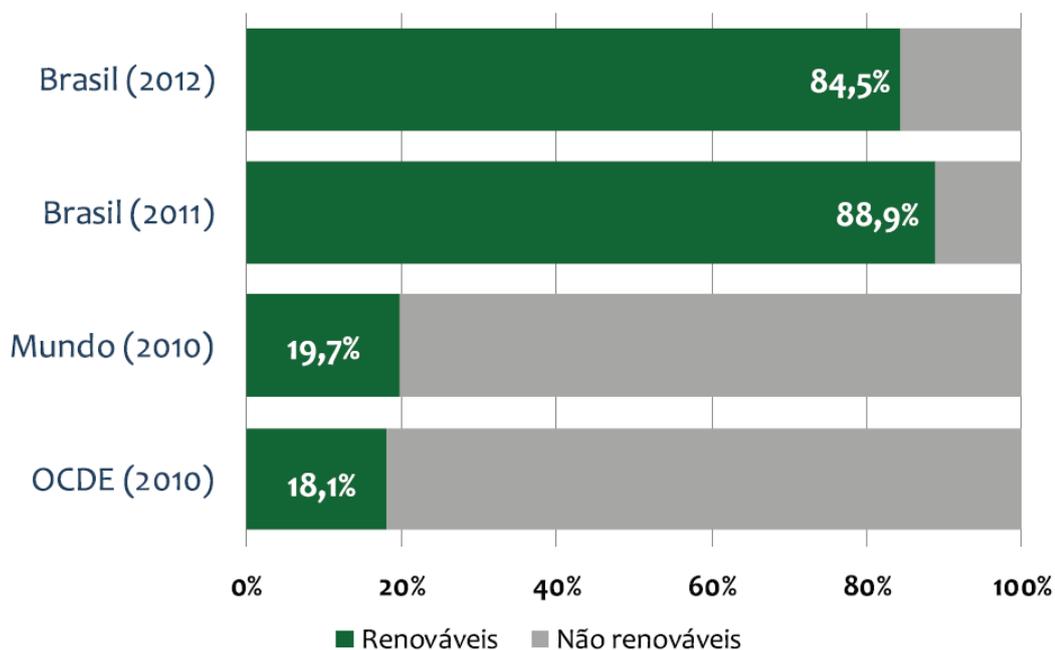


Figura 1 – Participação das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira.
(Fonte: BEN, 2013).

A energia elétrica de origem Hidráulica apresenta maior representatividade no cenário brasileiro, com participação de 81,8% e 76,9%, em 2011 e 2012, respectivamente. A fonte eólica, apesar de sofrer um acréscimo de 24,3% comparado ao período de 2010/2011, contribuiu com apenas 0,5% em 2011; já com uma expansão de 86,7% no período 2011/2012,

passou a contribuir com 0,9% na geração de energia elétrica em 2012. Por outro lado, a geração de eletricidade por fontes fotovoltaicas, mesmo com todo potencial disponível no território nacional, ainda não aparece no cenário atual (BEN, 2013). A Figura 2 analisa a composição da matriz elétrica brasileira nos anos de 2011 e 2012.

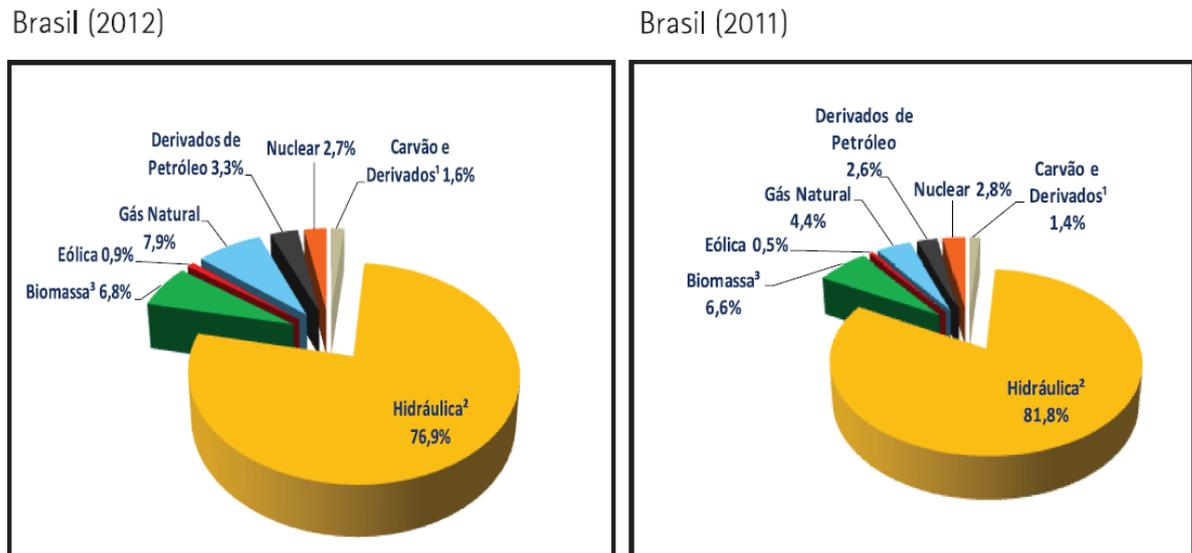


Figura 2 – Matriz elétrica brasileira.
(Fonte: BEN, 2013).

2.1.2 Importância das fontes alternativas na matriz elétrica nacional

O Brasil possui uma matriz energética com grande participação de fontes renováveis, o que contribui para que as emissões do setor energético sejam relativamente baixas quando comparadas às dos países desenvolvidos. Todavia, o crescimento previsto deste setor pode aumentar significativamente as emissões do país.

Atualmente, o uso racional da energia elétrica, a preocupação com as questões ambientais e o crescente aumento da demanda energética tem norteado a procura por uma maior eficiência da atual matriz energética brasileira.

Neste contexto, intensificam-se a busca por fontes alternativas de energia que, integradas à rede ou em sistemas isolados, possibilitem o desenvolvimento de todas as regiões de nosso país, provocando o menor impacto ambiental possível.

A expansão do consumo energético tem originado nas últimas décadas um impacto negativo sobre o ambiente, contribuindo para a implementação de novas estratégias energéticas e ambientais (GOMES, 2011).

A sustentabilidade ambiental prima pela utilização racional dos recursos naturais para satisfazer as necessidades humanas atuais, sem comprometer os recursos para as gerações futuras (SANTOS, 2013).

Neste momento de transição, a continuidade da participação de fontes alternativas no setor elétrico deve ser analisada sob as diferentes oportunidades de desenvolvimento tecnológico e social aliada a preservação do meio ambiente (DUTRA, 2007).

A intensidade de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) do setor energético brasileiro é relativamente baixa quando comparada aos padrões internacionais, devido à importância das fontes renováveis na matriz energética nacional (BANCO MUNDIAL, 2010).

As fontes energéticas renováveis, em especial a eólica, se mostram atrativas, tanto pelo caráter não poluente quanto por se apresentarem com uma fonte inesgotável de energia (CUSTÓDIO, 2009).

Porém, o Brasil necessita urgentemente vencer os desafios técnicos, políticos e econômicos para a inserção das fontes eólica e solar, de forma significativa, em sua matriz energética. Para Villalva; Gazoli (2013), as fontes de energia intermitentes funcionam bem quando complementam outras fontes que estão disponíveis com mais regularidade, como é o caso da energia hidrelétrica, que depende da quantidade da água dos reservatórios.

Ainda em seus primeiros passos, mas com imenso potencial, a geração de energia elétrica que aproveita a irradiação solar (fotovoltaica), a força dos ventos (eólica) e a biomassa (térmica) têm no Brasil o cenário ideal para desenvolver-se (MARINHO, 2012).

Segundo Pires (2010), o aproveitamento do sol, bem como a utilização do vento para conversão em energia, são práticas que tendem a minimizar a emissão de poluentes na atmosfera, visto que não requerem processos de combustão.

2.2 Energia Eólica

As pressões impostas por organismos internacionais, buscando limitar a emissão de gases poluentes para a atmosfera, têm proporcionado uma posição de destaque para a produção de energia eólica, uma vez que esta fonte não é poluente e inesgotável.

A energia eólica é uma fonte alternativa, limpa e renovável para a produção de energia elétrica. É atrativa, do ponto de vista ambiental pelo seu caráter não poluente, e econômico, por caracterizar-se como uma fonte inesgotável (MARINHO, 2012).

Para Custódio (2009), a ampliação do uso da energia eólica contribui para a redução da emissão de gases de efeito estufa, especialmente nos países onde a matriz energética apresenta predominância de fontes fósseis.

Luiz (2013) destaca que a geração de energia elétrica usando energia eólica é mais econômica do que a geração de energia elétrica usando-se o gás natural em usinas termoelétricas.

A energia eólica se encontra entre as fontes mais baratas de energia renovável. O custo da produção de eletricidade usando o vento é comparável à produção de eletricidade à base de combustível fóssil (PINTO, 2013).

A geração direta de uma unidade de eletricidade a partir do vento compensa a combustão de três unidades de combustível fóssil que abastece uma usina térmica a carvão convencional (CUSTÓDIO, 2009).

Para Pinto (2013), a energia de fontes eólicas já é parcialmente competitiva em preço, sendo também apoiada por uma legislação estatal que visa promover sua participação no mercado.

Montezano (2012), também destaca que a geração eólica tem apresentado custos competitivos com fontes convencionais de energia baseadas em combustíveis fósseis, porém pode causar impactos no ambiente que devem ser analisados e mitigados.

A contribuição do potencial de energia eólica para o fornecimento global de energia elétrica não é limitada pela disponibilidade de recursos, mas por fatores econômicos e sociais (PINTO, 2013).

2.2.1 Energia Eólica no Brasil

Dutra (2007) destaca que o recurso eólico disponível no Brasil, mesmo que incipiente na utilização para geração de energia elétrica, aponta um grande potencial para novos projetos de geração de energia.

O Brasil chegou ao fim de 2009 com uma potência eólica instalada de 600 MW, o que o colocou na 21ª posição no ranking mundial (PINTO, 2013).

Para Villalva; Gazoli (2013) a indústria de energia eólica consolidou-se no Brasil e vem crescendo muito. Diversos parques de geração eólica foram instalados e encontram-se em construção no País, especialmente no Nordeste e Sul, onde há bons regimes de vento.

A energia eólica apresentou grande expansão (Figura 3) em função da instalação de novos parques eólicos. Com um crescimento de 86,7% no período 2011/2012, a energia eólica passou a contribuir com 0,9% na geração de energia elétrica brasileira (BEN, 2013).

							em GWh	
2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	$\Delta\%$ 2012/2011	
237	663	1,183	1,238	2,177	2,705	5,050	86,7%	

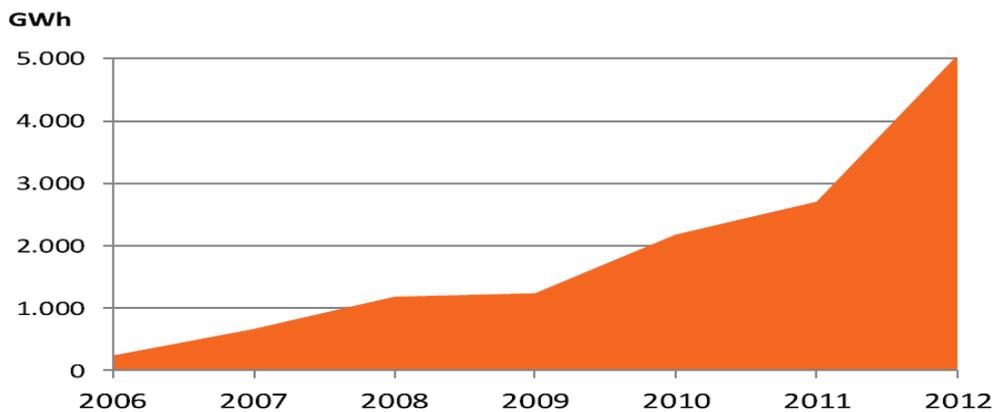


Figura 3 – Evolução da matriz eólica no cenário brasileiro.
(Fonte: BEN, 2013).

Além da diversificação da oferta energética com a expansão de fontes renováveis na matriz brasileira, a energia eólica também contribui com a redução das emissões de CO₂ na atmosfera por não emitir gases poluentes durante sua geração (BANCO MUNDIAL, 2010).

2.2.2 Complementaridade Hídrico-Eólica no Brasil

Para Dutra (2007), uma importante característica dos benefícios da utilização da geração eólica no Brasil está no fenômeno de complementaridade hídrico-eólica que ocorre de forma mais caracterizada na Região Nordeste.

A energia eólica ganha distinção no Brasil como uma alternativa viável de estabilidade sazonal no aproveitamento energético através da complementariedade entre os regimes naturais eólico/hídrico (MARINHO; AQUINO, 2009).

Como a velocidade dos ventos costuma ser maior em períodos de estiagem, é possível então que os parques eólicos operem complementando a geração hidroelétrica, o que manteria parte da água nos reservatórios nos períodos de seca (PINTO, 2013).

A complementaridade existente entre o regime de vento e a vazão do reservatório de Sobradinho mostram que a energia eólica pode atuar na otimização dos reservatórios brasileiros (DUTRA, 2007).

2.2.3 Velocidade do vento e potência eólica

A energia retirada do vento para transformação em eletricidade requer um aparelho de interação com um escoamento de ar. Aerogeradores são máquinas intermediárias feitas para captação do vento e posterior transformação em energia elétrica (PERES; OLIVEIRA, 2010). Uma turbina eólica capta uma parte da energia cinética do vento que passa através da área varrida pelo rotor e a transforma em energia elétrica (SANSON, 2006). Quanto maior for a área varrida pelas pás, maior será a potência que o aerogerador aproveitará do vento (DALMAZ *et al*, 2008).

A energia cinética associada a um corpo em movimento é diretamente proporcional à metade do produto de sua massa específica pelo quadrado da velocidade. Para o vento, no entanto, ao duplicar sua velocidade, considerando-se o fluxo de ar incidente na área do aerogerador, teremos que a vazão do ar por unidade de área também dobrará; a quantidade de energia contida em cada unidade de massa do fluxo de ar quadruplicará; logo, a quantidade de energia contida no vento será oito vezes maior, ou seja, é uma função cúbica de sua velocidade (AMÊNDOLA, 2007).

Através das turbinas eólicas, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica pelo giro das pás do rotor e transformada em energia elétrica pelo gerador. As turbinas eólicas são instaladas na superfície da atmosfera, e utilizam a energia do vento em uma ampla faixa de alturas (MARTINS *et al*, 2008).

2.2.4 Potência de uma massa de ar

Toda massa de ar em movimento (vento) adquire energia cinética em função da diferença de pressão entre duas regiões. Esta diferença de pressão ocorre em função da energia solar, que aquece a superfície de forma desigual, ocasionado diferenças de

temperatura. A energia mecânica dessas massas de ar pode ser transformada em energia elétrica através dos geradores eólicos ou turbinas eólicas.

Melo (2009) destaca que o vento é o deslocamento das massas de ar provocado pelas variações de pressão induzidas pelo aquecimento desigual da superfície terrestre. A energia cinética resultante é a fornecedora primária da energia dos aerogeradores.

Quando se avalia a potência (P) de uma massa de ar incompressível, percebemos sua equivalência à derivada da Energia Cinética (E_K) ao longo do tempo (dt). Assim,

$$P = \frac{dE_K}{dt} \quad (1)$$

$$\text{Como } E_K = \frac{1}{2}mv^2, \quad (2)$$

$$\text{Logo } P = \frac{1}{2} \dot{m}v^2 \quad (3)$$

Onde:

E_K = Energia cinética (J);

P = Potência ($W = J.s^{-1}$);

m = massa de ar (kg);

\dot{m} = fluxo de massa de ar ($kg.s^{-1}$);

v = velocidade da massa de ar em movimento ($m.s^{-1}$); e

t = tempo (s).

Verifica-se que o fluxo de massa de ar que atravessa perpendicularmente uma seção transversal de área S , conforme pode ser observado na Figura 4, é descrito pela Equação 4 (MELO, 2012):

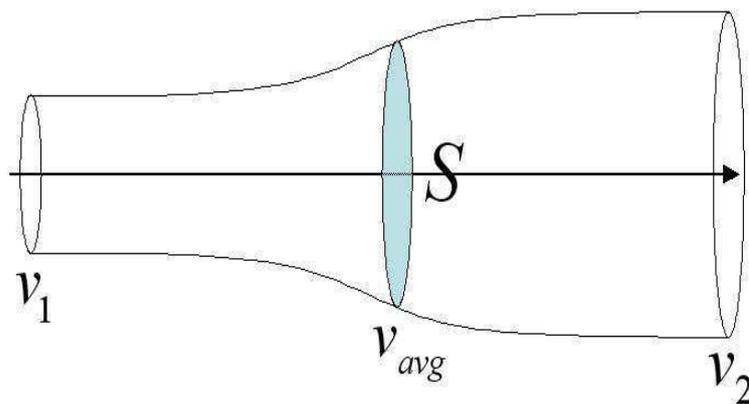


Figura 4 – Tubo de Betz.
(Melo, 2012)

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot S \quad (4)$$

Onde:

ρ = massa específica do ar (kgm^{-3}); e

S = Área da seção transversal (m^2).

Dessa forma, substituindo-se a Equação 4 na Equação 3, destaca-se um novo cálculo para a potência de uma massa de ar que atravessa a seção transversal de área S :

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (5)$$

Em condições normais, a massa específica do ar não varia significativamente (o padrão é $1,225 \text{ kg.m}^{-3}$), de modo que a potência disponível no vento é essencialmente proporcional ao cubo da sua velocidade (GARCÍA, 2004).

2.2.5 Eficiência de Betz

Uma forma simples de ser calculada a máxima potência que uma turbina eólica pode retirar do vento em determinado local, de forma teórica, foi proposto pela primeira vez pelo físico alemão Albert Betz, em 1919 (DWIA, 2013; GOLDEMBERG, 1979).

O valor máximo proposto, conhecido como limite de Betz, se fundamenta nos princípios da continuidade aplicado a fluidos incompressíveis, definido por Bernoulli e é válido para velocidades de vento de até 100 m/s, sendo representado pela razão de 16/27 da velocidade do vento, ou seja, um valor aproximado de 59,3% (DWIA, 2013; GOLDEMBERG, 1979).

No entanto, devido às perdas aerodinâmicas na conversão da energia eólica, uma turbina real somente fará a extração de parte deste máximo (Figura 5).

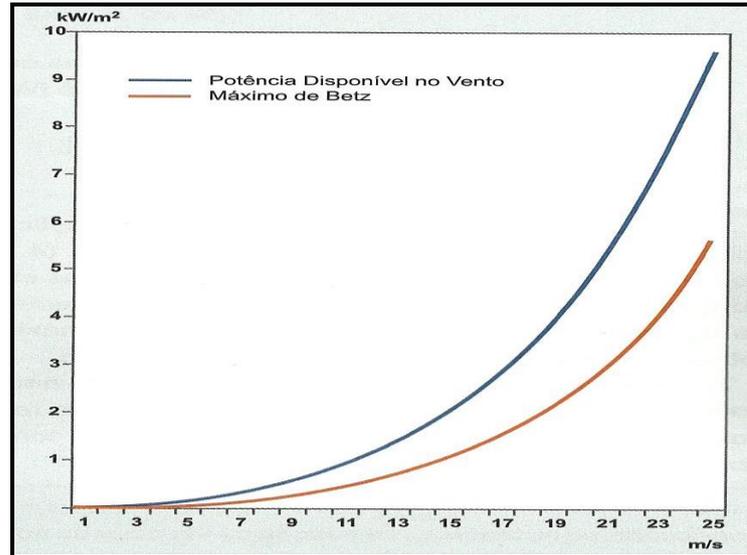
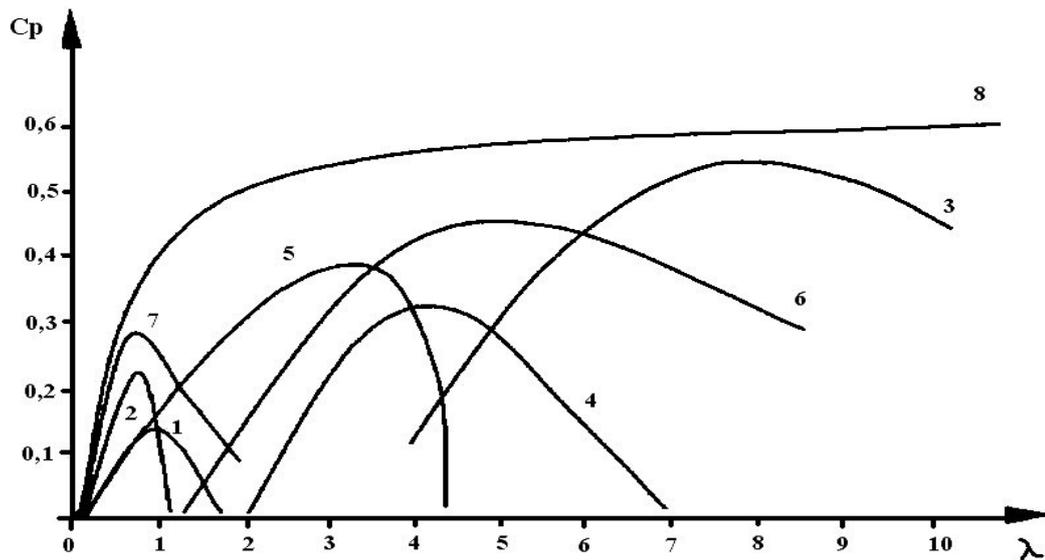


Figura 5 – Comparação da potência máxima do vento e o valor máximo de Betz.
(Custódio, 2009)

Para Nogueira (2004), apenas parte desta potência disponível pode ser extraída para geração de energia, e essa parte é quantificada pelo Coeficiente de Potência (C_p) que representa a relação entre a potência possível de ser extraída do vento e a quantidade total de potência nele contida. A Figura 6 representa o coeficiente de potência para diferentes turbinas.



1. Savonius
2. Filippini
3. Hélice de 2 pás, HAWT
4. Hélice de 3 pás
5. Hélice de 4 pás (tipo moinho holandês)
6. Hélice de 6 pás
7. Múltiplas pás, de fazenda ou raiada
8. Turbina teórica

Figura 6 – Coeficiente de potência (C_p) para diferentes turbinas.

(Nogueira, 2004)

2.2.6 A Distribuição de Weibull

Uma das características mais peculiares do vento é a constante variação do valor de sua velocidade, que reflete na quantidade de energia eólica na forma de flutuações, cuja amplitude depende das características da superfície da localidade (AMÊNDOLA, 2007).

Estudos estatísticos de séries de velocidades do vento de vários anos mostram que a probabilidade de ocorrência das velocidades segue comportamentos típicos, que podem ser representados através de expressões analíticas (GARCÍA, 2004).

O regime de vento pode ser modelado utilizando-se a distribuição de Weibull, expressa em termos de fator de escala e fator de forma. Esses dois parâmetros podem ser obtidos a partir da média e do desvio padrão do conjunto de dados (NOGUEIRA, 2004). A Figura 7 representa a distribuição de Weibull das velocidades do vento.

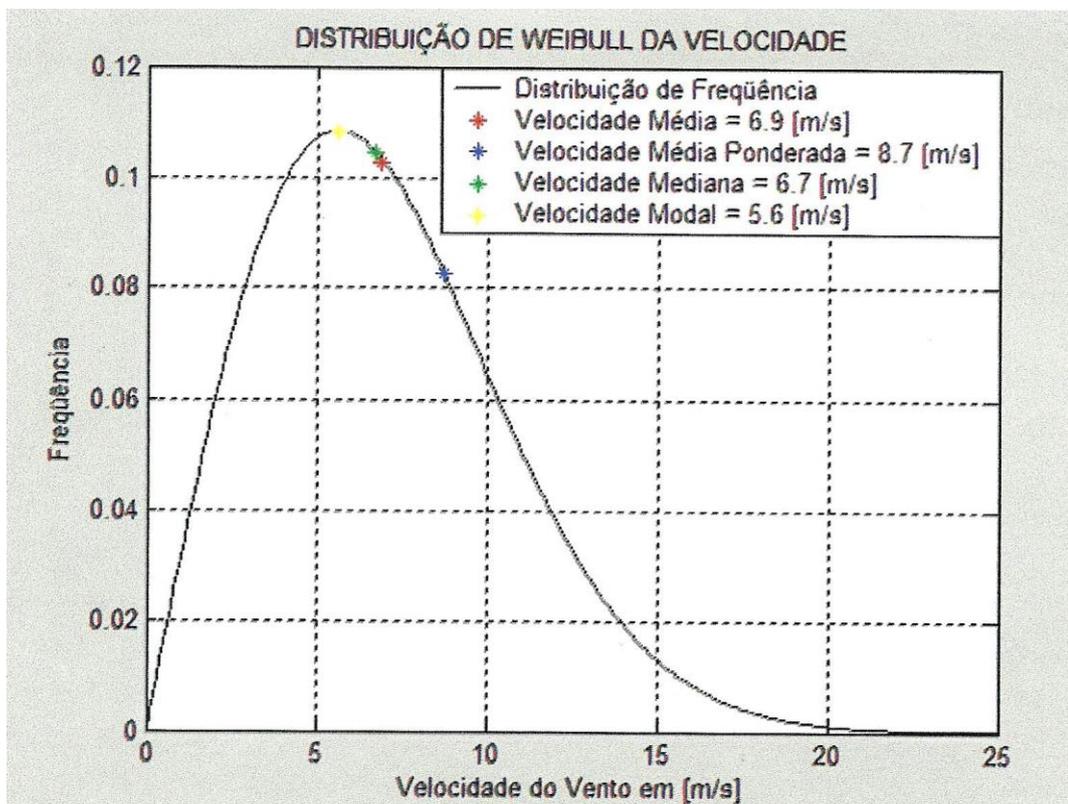


Figura 7 – Formato típico da distribuição de frequências da velocidade do vento. (AMÊNDOLA, 2007)

A distribuição de Weibull é uma das mais flexíveis, e é usada para representar vários tipos de fenômenos físicos. A Equação 6 define a densidade de distribuição, baseada em três parâmetros (RAPOSO, 2004):

$$f(t) = \frac{b}{\beta} \cdot (t - \alpha)^{b-1} \cdot e^{-\left[\frac{(t-\alpha)^b}{\beta}\right]} \quad \text{para } t > \alpha \text{ e } b, \beta, \alpha > 0 \quad (6)$$

Onde α , β e b são parâmetros de localização, escala e forma, respectivamente, e t é o tempo.

2.3 Energia Solar

A energia solar pode ser aproveitada de forma direta, como fonte de energia térmica, ou, através da utilização de elementos semicondutores, diretamente convertida em energia elétrica. A energia solar também é considerada responsável pela produção da energia hidráulica, eólica, biomassa, energia dos oceanos e combustíveis fósseis, sendo essas as principais formas indiretas de manifestação da energia solar.

A energia solar que atinge a superfície terrestre é originada no núcleo solar, onde, através de fusões nucleares, dois núcleos pesados de hidrogênio se fundem formando um núcleo de hélio, com liberação de grande quantidade de energia. A principal reação que ocorre no núcleo solar (Figura 8) envolve os isótopos de hidrogênio, Deutério e Trítio, obedecendo à equação: $D^2 + T^3 \rightarrow (He^4 + 3,52 \text{ MeV}) + (n + 14,06 \text{ MeV})$ (InPE, 2013).

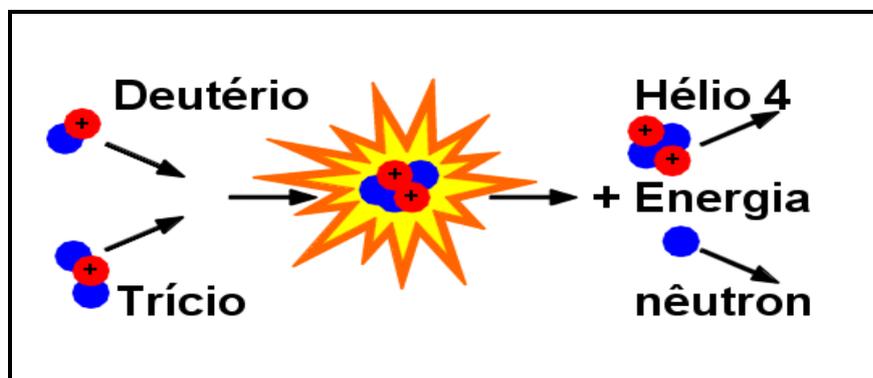


Figura 8 – Origem da energia produzida pelo sol.

(http://www.plasma.inpe.br/LAP_Portal/LAP_Sitio/Texto/Reacoes_de_Fusao.htm)

Porém, mesmo com o sol liberando energia na ordem de $38 \times 10^{25} \text{ J.s}^{-1}$, o topo da atmosfera terrestre recebe em média 1.353 W.m^{-2} , valor definido como Constante Solar. Já, na superfície terrestre, ao nível do mar, o valor médio de radiação solar é de apenas 1.000 W.m^{-2} .

Estudos apontam que a qualidade de vida das futuras gerações dependerá intensamente das tecnologias de exploração da energia solar. Diante dessas tendências, o Brasil precisa no curto prazo ingressar, de forma sustentável, no mercado de energia fotovoltaica, a fim de garantir seu espaço estratégico na geração de dividendos socioeconômicos no futuro.

Conforme CGEE (2010), documentos internacionais reportam para o ano de 2050 que 50% da geração de energia no mundo virão de fontes renováveis. Dessa demanda, 25% serão supridos pela energia solar fotovoltaica. No fim deste século, essa dependência será de até 90%, dos quais 70% serão de origem fotovoltaica.

2.3.1 Características da Energia Solar

A energia radiativa recebida pela Terra na forma de ondas eletromagnéticas provenientes do Sol é denominada de radiação solar (MOURA, 2007).

A radiação solar é a causa final para o movimento da atmosfera. O eixo de rotação da terra está inclinado em $23^{\circ}45'$ com relação a seu plano de órbita, fazendo com que a intensidade anual de radiação solar seja maior nas regiões equatoriais (CUSTÓDIO, 2009).

Um projeto para implantação de sistema fotovoltaico requer dados de medições em locais mais próximos possíveis de onde se pretende implantar o sistema, pois a radiação incidente em cada local terrestre é extremamente variável. Pinho (2008) destaca que além das variações regulares, diária e anual, devidas ao movimento aparente do Sol, variações irregulares são causadas por condições climáticas (nuvens), bem como pela composição geral da atmosfera. Esteves (2012) apresenta o espectro de radiação solar (Figura 9).

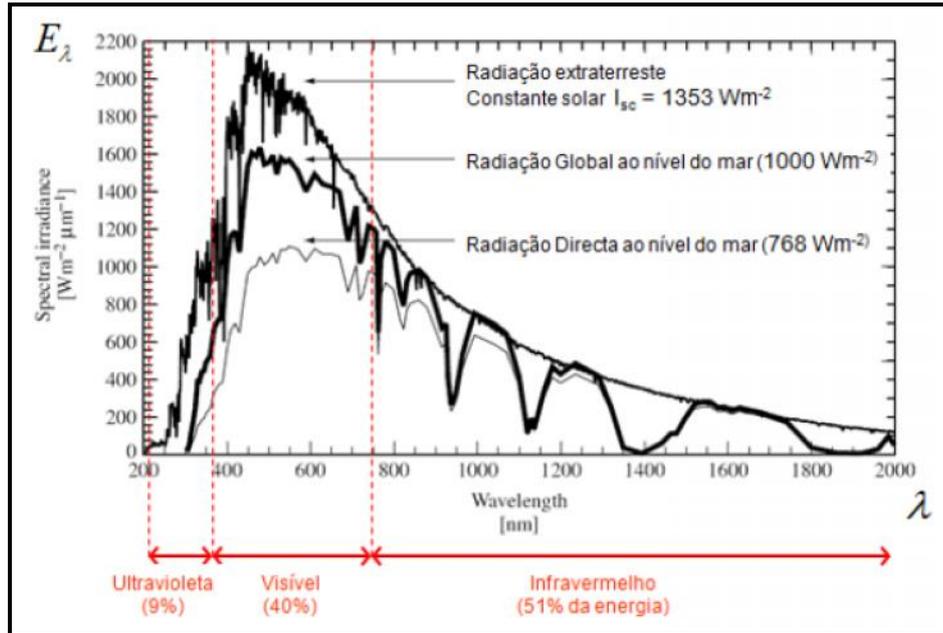


Figura 9 – Quantificação da energia emitida pelo sol que pode ser aproveitada. (Esteves, 2012)

2.3.2 Energia Solar Fotovoltaica

A geração de energia por sistema solar fotovoltaico utiliza elementos semicondutores fotossensíveis que convertem a radiação solar em uma diferença de potencial nos terminais de suas junções. Através de ligações elétricas nesses terminais, ocorre a circulação de elétrons em corrente contínua.

Cada célula solar produz uma diferença de potencial de 0,5 a 0,6 V, com potência entre 1,0 e 1,5 W. Através de arranjos, com ligações série-paralelo são confeccionados os módulos fotovoltaicos, cuja potência pode chegar até 250 W, com tensão de 12 ou 24 V. Com novas associações série-paralelo entre painéis é possível dimensionar potências e voltagens que atendam a demandas específicas.

No entanto, existem alguns conceitos que nos permitem maior clareza no entendimento de variáveis que influenciam o dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico, a seguir mencionados:

- a) **Irradiância solar:** é a medida de densidade de potência, expressa em Wm^{-2} . Usualmente, a radiação incidente é medida em um plano horizontal.

b) Irradiação solar: é a unidade de densidade de energia, expressa em $\text{KWh/m}^2/\text{dia}$ ou $\text{KWh/m}^2/\text{ano}$. Representa a medida da quantidade de energia solar fornecida ao longo de determinado período.

c) Fator de capacidade: é a razão entre a energia média produzida num intervalo de tempo e a capacidade nominal do sistema, multiplicada pelo número de horas do período considerado. Está diretamente dependente da irradiância solar incidente no local como do fator de desempenho do sistema, medindo assim a qualidade da instalação fotovoltaica.

d) Constante solar: a medida da radiação solar recebida na parte superior da atmosfera terrestre. Seu valor numérico é de 1.353 Wm^{-2} .

A potência de saída de um painel fotovoltaico aumenta sempre que houver aumento da radiação solar, fazendo com que a corrente elétrica de curto-circuito também sofra variação linear com esse aumento. Para Castro (2008) a tensão de circuito aberto varia pouco com a radiação incidente, sendo esta variação, no entanto, mais importante para valores baixos de radiação incidente, conforme Figura 10.

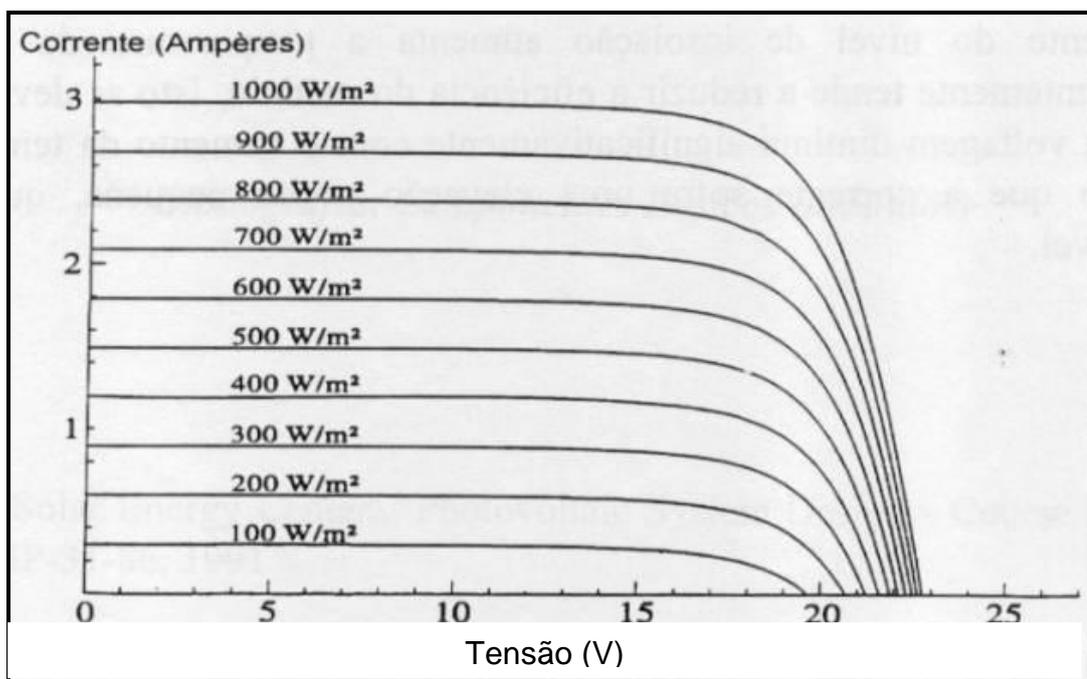


Figura 10 – Variação da curva I-V com a radiação incidente.
(Adaptado pelo autor)

No entanto, a eficiência de conversão de um painel fotovoltaico dependerá da irradiância incidente (Figura 11), através da relação:

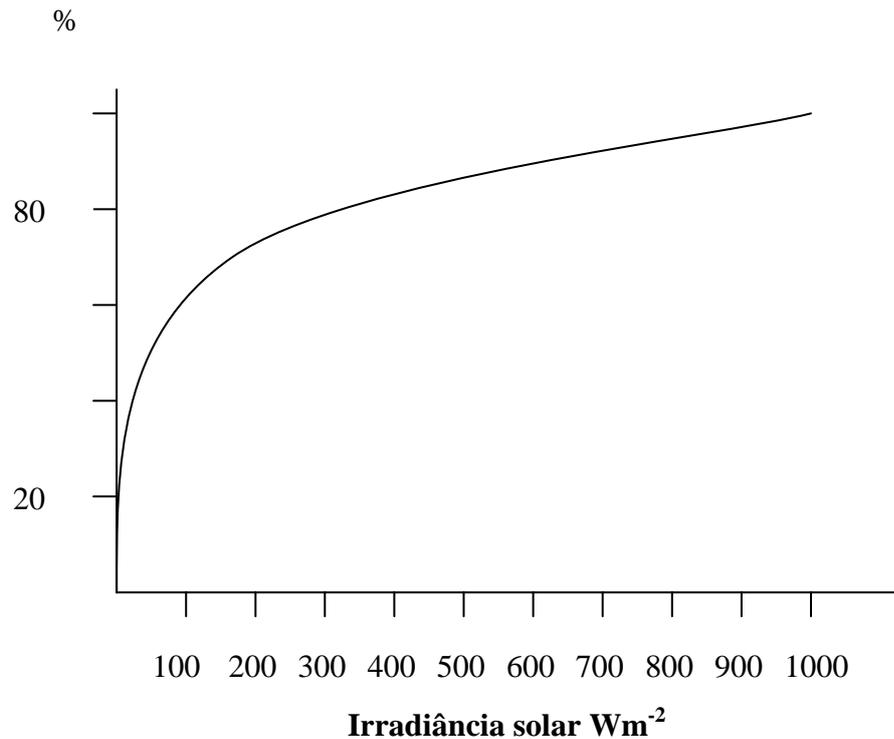


Figura 11 – Eficiência de conversão versus radiação de um painel fotovoltaico. (Fadigas, 2011)

Para Kelman (2012), a irradiação média diária ao nível do mar é de 6 kWhm^{-2} , o que corresponde a uma irradiância diária média de aproximadamente 250 Wm^{-2} ($6000 \text{ W/m}^2/24\text{h}$). Ou seja, apenas 20% da irradiância que atinge o topo da atmosfera poder ser efetivamente aproveitada na geração de energia.

Uma das restrições técnicas à difusão de projetos de aproveitamento de energia solar é a baixa eficiência dos sistemas de conversão de energia, o que torna necessário o uso de grandes áreas para a captação de energia em quantidade suficiente para que o empreendimento se torne economicamente viável (ANEEL, 2002).

Porém, a geração fotovoltaica não ocasiona ruído ou emissões de gases em seu funcionamento e necessita pouca manutenção (SANTOS, 2013).

A produção de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos pode ser obtida de duas formas principais: em sistemas isolados (ou autônomos) e conectados à rede elétrica. A principal diferença entre os dois sistemas é a existência ou não de acumuladores de energia que, aos sistemas isolados são conectados um banco de acumuladores químicos (baterias) onde a

energia elétrica produzida é transformada em energia química para o posterior consumo, à noite e em horários onde não haja produção.

Já os sistemas conectados à rede elétrica funcionam como usinas geradoras de energia, em paralelo às grandes centrais geradoras. Sua produção poderá ser consumida em qualquer parte do território nacional, estando à disposição do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e proporcionando a manutenção dos reservatórios das hidroelétricas, por exemplo.

Quando instalado em uma região urbana e ligado diretamente à rede elétrica de baixa tensão, o sistema fotovoltaico produz eletricidade a um custo muito competitivo e pode ser empregado para reduzir a conta de eletricidade do consumidor (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

A utilização da energia solar fotovoltaica interligada à rede elétrica, de forma complementar a hidroeletricidade, pode ser considerada uma grande alternativa para a utilização de medidas de gerenciamento pelo lado da demanda (SALAMONI, 2009).

No mundo inteiro, a energia solar fotovoltaica é a fonte alternativa que tem recebido mais atenção. Os sistemas de geração distribuída são muito adequados para a instalação em qualquer lugar onde haja bastante incidência de luz (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Embora a produção mundial de eletricidade recorrendo a sistemas fotovoltaicos seja ainda marginal quando comparada com a produção total, o mercado tem crescido a uma taxa anual de 35% (FREITAS, 2008).

2.3.3 Energia Solar Fotovoltaica no Brasil

O Brasil dispõe de grande potencial para a aplicação da energia solar fotovoltaica por ser privilegiado por elevados níveis de irradiação solar, porém, o papel dessa fonte renovável no mercado brasileiro ainda é bastante pequeno (SALAMONI, 2009).

A firme trajetória de aumento de eficiência e queda dos custos de implantação de módulos e sistemas fotovoltaicos tem tornado cada vez mais clara a oportunidade de explorar a energia fotovoltaica no Brasil (KELMAN, 2012).

O número de sistemas fotovoltaicos conectados à rede vem aumentando no Brasil e sua utilização deverá ter um salto extraordinário nos próximos anos, principalmente com a aprovação resolução 482/2012 pela ANEEL (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Existe uma tendência de queda acentuada nos custos dos módulos fotovoltaicos comercializados no Brasil (Figura 12). No estudo da evolução dos custos para o período de 2001 a 2012, a interpolação linear indica queda de 1,70 R\$/Wp.ano (GALDINO, 2012).

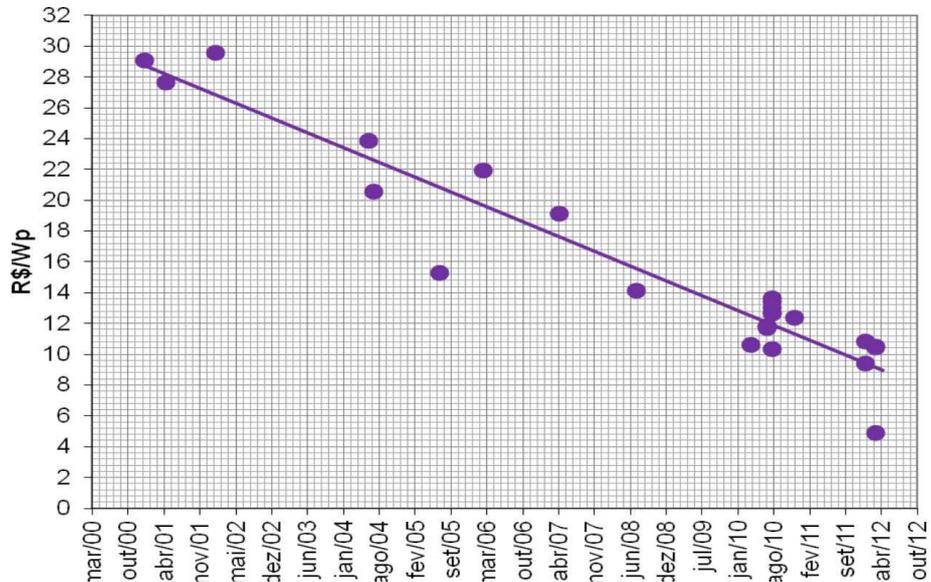


Figura 12 – Custos históricos de módulos de c-Si, valores corrigidos a valores de mar/2012. (Galdino, 2012)

2.3.4 Potencial Solar

A determinação do potencial solar de uma localidade pode ser feita de diversas maneiras: por meio de dados de um Atlas solarimétrico, através de cálculos que interpolam dados de estações próximas ao local, ou pela medição da radiação solar no próprio local (HAUSCHILD, 2006).

A medição da radiação solar em um determinado local pode ser feita com a utilização de equipamentos específicos. O pireliômetro é utilizado para determinar a medida da radiação solar direta e o piranômetro, para medir a radiação solar global. Outras formas de medir a radiação solar em determinado local pode ser feita com a utilização de células fotovoltaicas de silício, porém estas medidas não conseguem distinguir a radiação direta da difusa.

Para o uso prático, na análise e no dimensionamento de instalações fotovoltaicas, podemos recorrer a mapas de insolação e a ferramentas que fornecem imediatamente as informações desejadas sobre a radiação solar de uma determinada localidade (VILLALVA; GAZOLI, 2013). A Figura 13 apresenta o mapa de insolação do território brasileiro.

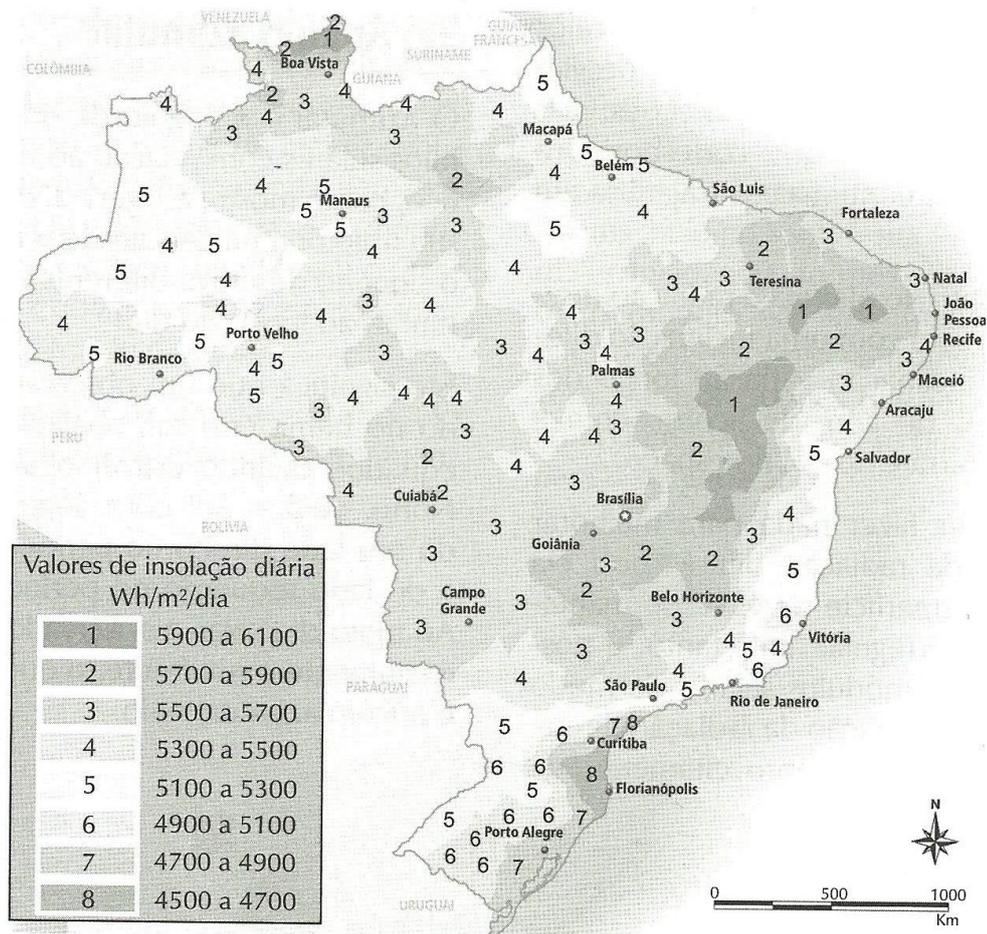


Figura 13 – Mapa de insolação do território brasileiro.
(Villalva; Gazoli, 2013)

2.3.5 Painéis Fotovoltaicos

São os componentes do sistema fotovoltaico responsáveis por captar a energia (irradiação) solar transformando-a em eletricidade.

O efeito fotovoltaico foi descoberto em 1839 por Edmond Becquerel, e consiste no aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, quando exposto à presença de luz solar. Os Painéis Fotovoltaicos são dispositivos utilizados para converter a energia da luz do Sol diretamente em energia elétrica através do chamado “Efeito Fotovoltaico” (BOLAÑOS, 2007).

A unidade fundamental empregada no processo de conversão é chamada célula fotovoltaica. Estas, geralmente são fabricadas utilizando o silício (Si) e podem ser constituídas por cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo.

2.3.5.1 Células de Silício Monocristalino

São fabricadas a partir do cristal de silício. Estas células são as mais eficientes, e também as mais caras, de todas as células de silício. O monocristal é crescido a partir do silício fundido de alta pureza (99,99% a 99,9999%) em reatores sob atmosfera controlada (FALCÃO, 2005).

As células de silício monocristalino (Figura 14) são as mais eficientes produzidas em larga escala e disponíveis comercialmente. Alcançam eficiências de 15 a 18%, mas tem um custo de produção mais elevado do que outros tipos de células (VILLALVA; GAZOLI, 2013).



Figura 14 – Células de monocristalino.
(Falcão, 2005)

2.3.5.2 Células de Silício Policristalino

As células de silício policristalino (Figura 15) são mais baratas que as de silício monocristalino por exigirem um processo de preparação das células menos rigoroso (SILVA *et al*, 2008).

O silício policristalino é a tecnologia fotovoltaica mais tradicional, mas o fato de fazer uso de “wafers” representa uma maior limitação em termos de redução de custos de

produção, tendo em vista a quantidade de material utilizado na fabricação das células (FALCÃO, 2005).

As células de silício policristalino têm eficiências comerciais entre 13 e 15%, ligeiramente inferiores às das células monocristalinas, entretanto seu custo de fabricação é menor do que o das células de monocristalinas e isso compensa a redução de eficiência (VILLALVA; GAZOLI, 2013).



Figura 15 – Células de policristalino.
(Falcão, 2005)

2.3.5.3 Células de Silício Amorfo

Uma célula de silício amorfo (Figura 16) apresenta alto grau de desordem na estrutura dos átomos, característica esta suficiente para diferenciar esse tipo de célula das Células de Silício Monocristalino e Silício Policristalino (SILVA *et al*, 2008).

Estas células são menos eficientes que as células de silício policristalino, no entanto, poderão vir a ser competitivas para produção em grande escala (FALCÃO, 2005).

A eficiência dos módulos de filmes finos de silício amorfo é muito baixa quando comparada com as dos dispositivos cristalinos. A maior desvantagem das células amorfas consiste na sua baixa eficiência (entre 5 e 8%) (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

A terceira geração fotovoltaica visa atingir alta eficiência, mesmo usando o "filme fino". A ideia consiste em reduzir o custo por watt de pico, com apenas um pequeno aumento nos custos de área, utilizando materiais abundantes e não tóxicos (UNSW, 2010/11)



Figura 16 – Células de silício amorfo.
(Falcão, 2005)

2.4 Sistemas Híbridos de Geração de Energia Elétrica

2.4.1 Características dos Sistemas Híbridos de Energia Elétrica

Sistemas híbridos de geração de energia elétrica são sistemas formados por duas ou mais fontes de geração de energia. As fontes de energia renováveis mais comumente utilizadas nesse tipo de sistema são a solar e a eólica (HAUSCHILD, 2006).

Sistemas híbridos podem operar independente da existência de grandes redes elétricas, incorporando duas ou mais fontes alternativas de energia. Podem ser usados para disponibilizar eletricidade em sistemas autônomos, onde a conexão à rede da concessionária é impossível ou muito cara devido às longas linhas necessárias para a transmissão.

Considerados mais complexos, os sistemas híbridos exigem um controle capaz de permitir a integração das diferentes formas de energia associadas. Estes sistemas podem estar isolados ou conectados a rede.

Geralmente, um sistema híbrido conta com a utilização de um grupo gerador diesel para garantir a regularidade e estabilidade no fornecimento de energia elétrica (BOLAÑOS, 2007).

De modo geral, os sistemas híbridos podem ser moldados utilizando fontes renováveis de energia (eólica, fotovoltaica, biomassa, hidroelétricas) associadas à utilização de geradores a diesel, acoplados a controladores de carga, conversores de potência, acumuladores de energia (baterias) entre outros acessórios de controle e supervisão.

O sucesso dos sistemas fotovoltaicos e dos sistemas híbridos eólico-diesel e fotovoltaico-diesel permitiu a “migração” para os sistemas híbridos eólico-fotovoltaico-diesel a partir da década de 90 (SIQUEIRA, 2005, GABRIEL FILHO, 2007).

Na instalação de sistemas híbridos objetiva-se maximizar a utilização de fontes alternativas de energia frente às fontes tradicionais, mantendo-se a confiabilidade e qualidade da energia fornecida, minimizando os danos ao meio ambiente.

A utilização de fontes de energia renováveis na configuração de sistemas híbridos de energia, mostra-se tecnicamente viável, flexível e, dependendo do caso, bem atrativa economicamente para o atendimento das pequenas e médias demandas em áreas remotas (BARBOSA; PINHO, 2008).

Um bom dimensionamento do sistema híbrido eólico-fotovoltaico, no funcionamento autônomo para suprimento de energia elétrica em locais isolados, pode proporcionar um fornecimento confiável de energia elétrica, diminuindo a necessidade de suprimento complementar de combustível para geradores a diesel. Para Gabriel Filho (2007) o objetivo deles é produzir o máximo de energia possível das fontes renováveis (sol e vento), enquanto mantidas a qualidade da energia e a confiabilidade especificadas para cada projeto.

O levantamento da velocidade e constância dos ventos e da radiação solar disponível está diretamente relacionado com o potencial produtivo de eletricidade de um sistema energético alternativo. Pela individualidade de cada local, faz-se necessário a coleta desses índices junto do local em que será instalado o sistema, visando estabelecer uma base de dados confiáveis em função do potencial energético disponível e da demanda de energia elétrica a ser exigida, evitando-se assim erros de projeto dos sistemas de geração.

2.4.2 Sistema Híbrido de Energia Eólica-Fotovoltaica

Com o objetivo de diminuir o custo da energia fornecida, alguns sistemas que empregavam combustíveis tradicionais começaram a suprir parte da demanda através de sistemas baseados nas energias alternativas, surgindo assim os sistemas híbridos (GARCÍA, 2004).

A integração dos recursos eólico e solar fotovoltaico é feita pela eletricidade por eles gerada, podendo ser armazenada em baterias eletroquímicas, em sistemas isolados. Esta energia pode ser usada diretamente na forma DC, ou com o auxílio de um sistema de

condicionamento de potência, na forma AC. Assim, a complementaridade deste tipo de arranjo pode ter caráter sazonal, já que ocorreria toda vez que, em certos períodos, existissem ótimas condições de radiação solar e fraca intensidade de velocidades de vento, ou vice-versa.

A utilização de aerogeradores de pequeno porte associados de forma híbrida com painéis fotovoltaicos não apresentam grande interesse quando avaliados em escala comercial, mas podem aparecer como uma alternativa atrativa quando instalados em conjuntos residenciais ou pequenas propriedades isoladas, tendo em vista a atual consciência energética ambiental que está sendo criada.

Uma desvantagem comum da instalação da energia eólica e solar fotovoltaica, de forma isolada, reside na instabilidade da produção energética, causando certa insegurança na sua implantação, tendo em vista que cada sistema deveria ser superdimensionado para se tornar confiável, tornando seu custo final muito elevado. Uma forma de minimizar tais efeitos é desenvolver o sistema híbrido eólico-fotovoltaico, tornando-o mais competitivo, estável e viável.

Uma combinação da energia solar e eólica em um sistema de geração híbrido pode atenuar as flutuações individuais destas formas de energia, aumentando a produção de energia global e reduzindo significativamente a necessidade de armazenamento de energia (SIQUEIRA, 2005, CANEPPELE; SERAPHIM, 2010).

Em sistemas isolados, Luiz (2013) destaca que, tanto a energia eólica quanto a energia solar, pelo fato de serem fontes de energia intermitentes, necessitam de armazenamento adequado para manter o suprimento de energia nos períodos de ausência dessas fontes.

Macêdo (2002) destaca que os locais para implantação de sistemas híbridos solar-eólico devem ser selecionados com bastante cuidado, principalmente com relação à energia eólica, para se ter certeza de que a melhor velocidade de vento foi encontrada em uma determinada área selecionada.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização da Área Experimental

O trabalho foi desenvolvido no Bloco das Engenharias da Faculdade Assis Gurgacz – FAG, (Figura 17), localizada no município de Cascavel, Paraná, com localização geográfica definida pelas coordenadas 24° 57' Latitude Sul (S) e 53° 27' Longitude Oeste (W) e altitude média de 781 metros acima do nível do mar.

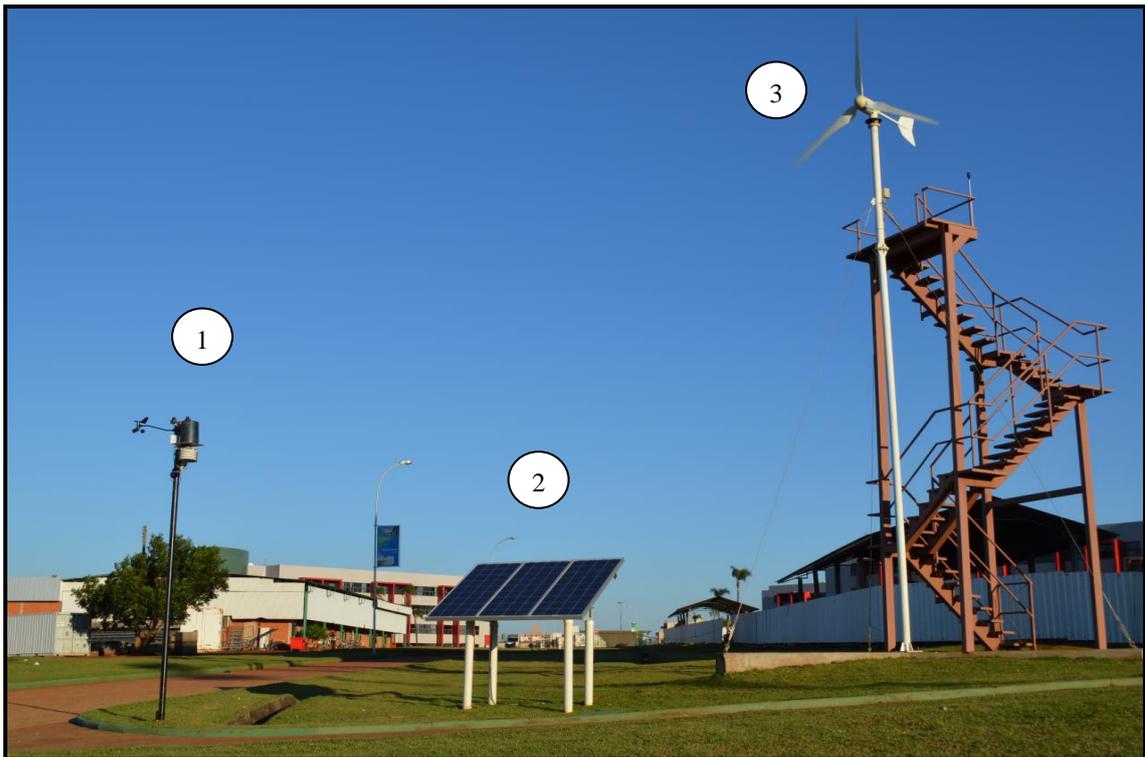


Figura 17 – Vista panorâmica da instalação do sistema híbrido eólico fotovoltaico. 1 – Estação meteorológica; 2 – Painéis fotovoltaicos do sistema; 3 – Aerogerador do sistema.

3.2 Equipamentos de Medições Meteorológicas

Para a medição das variáveis meteorológicas e de aquisição de dados do experimento foi utilizada a estação Micrometeorológica da marca Davis Instruments, composta pelo Conjunto de Sensores Integrados (ISS) modelo Vantage PRO2 6162 (Figura 18), instalada em uma torre confeccionada em alumínio tubular, com altura total de 3 metros. A torre está ilustrada conforme a Figura 19. O equipamento contém sensor de chuva – pluviômetro (modelo 7852: Rain Collector, 0,2 mm), sensor de temperatura, sensor de umidade e sensor de pressão

atmosférica (modelo 7859), sensor de radiação solar e de radiação UV – piranômetro (modelo 6450) e anemômetro (modelo K7911) que coletam os dados do tempo e os enviam para o console da Vantage Pro2 via ondas de rádio de baixa intensidade. O “wireless” ISS é alimentado por bateria de lítio de 3V e envia os dados ao Console Vantage Pro2 localizado no interior do laboratório. O Console Vantage Pro2 encontra-se representado na Figura 20. Os dados registrados no console são transferidos para o computador através de um cabo USB e analisados com a ajuda de um software.

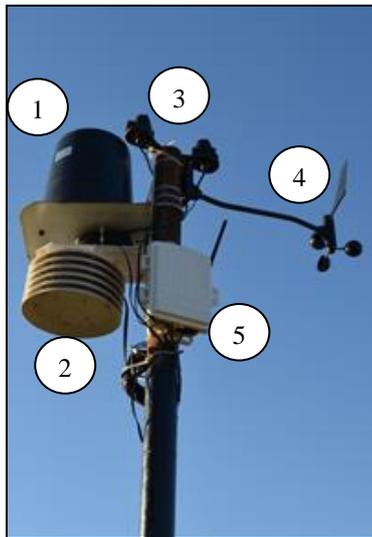


Figura 18 – 1 – Coletor de chuva; 2 – Sensor de temperatura e sensor de umidade; 3 – Piranômetro e sensor de radiação UV; 4 – Anemômetro; 5 – Transmissor Wireless.

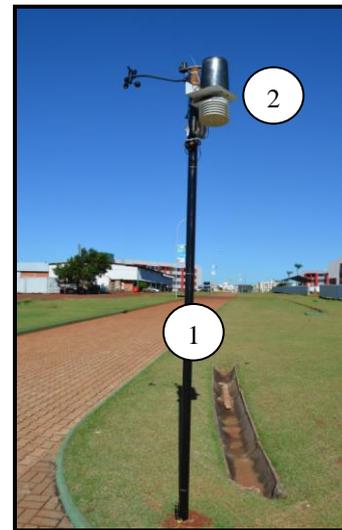


Figura 19 – 1 – Torre utilizada para instalação da estação meteorológica; 2 – Estação meteorológica.

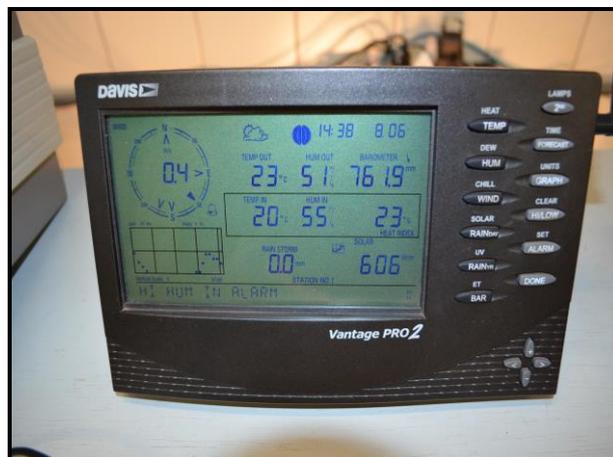


Figura 20 – Console Vantage Pro2 (receptor) da estação meteorológica localizado no interior do laboratório.

3.3 Equipamentos instalados no sistema híbrido eólico-fotovoltaico

A geração de energia elétrica de origem eólica é fornecida por um aerogerador Modelo NA – FD – 2KW, marca GUANGZHOU, 3 pás, com potência nominal de 2.000W, tensão de 48 V, corrente elétrica alternada trifásica e dotado de controlador de carga interno, constituindo-se assim a geração eólica do sistema eólico-fotovoltaico. O aerogerador encontra-se montado em uma torre de aço com 8 metros de altura (Figura 21). O aerogerador utilizado no experimento já se encontrava instalado no local do experimento e pode ser observado na Figura 22. Os aspectos técnicos e construtivos do aerogerador podem ser verificados na Tabela 1.

Tabela 1: Especificações técnicas do aerogerador utilizado no sistema híbrido

AEROGERADOR – ESPECIFICAÇÕES	
Diâmetro do rotor	3,0 m
Velocidade do vento para partida	2,5 m/s
Tensão	48 VAC
Potência nominal	2.000 W
Número de Pás	Três
Sobrevivência à velocidade do vento	40 m/s
Proteção contra excesso de velocidade	Controle de torque eletrônico
Marca	Guangzhou



Figura 21 – 1 – Torre utilizada para instalação do aerogerador; 2 – Aerogerador.

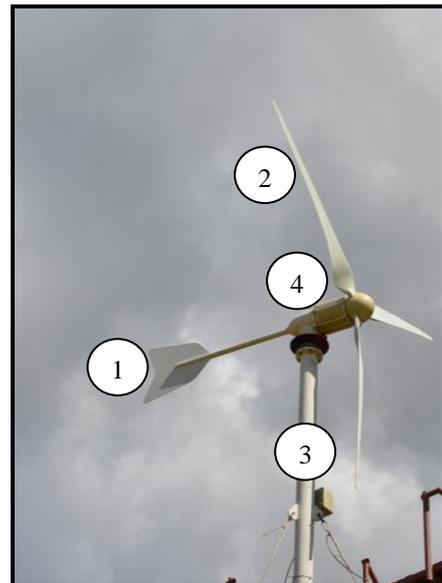


Figura 22 – Aerogerador. 1 – Leme; 2 – Pá; 3 – Torre; 4 – Turbina.

O sistema híbrido eólico-fotovoltaico foi concebido com a instalação de três módulos fotovoltaicos da marca BYD, modelo 146 P6-18, com potência nominal de 140 Wp cada e

tensão individual de 18 V, perfazendo um total de 420 Wp instalados, para a geração de energia elétrica a partir da energia solar incidente no local. Os módulos foram conectados em série para elevação da tensão de saída em 54 V.

Na Figura 23 e Figura 24, encontram-se os módulos fotovoltaicos instalados em um suporte, voltado para o norte geográfico e inclinado em um ângulo de 30° nesta direção, correspondente à latitude do local (24° 57') adicionada de 5°. As especificações físicas, elétricas e construtivas dos módulos fotovoltaicos são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Especificações técnicas dos módulos fotovoltaicos utilizados no sistema híbrido

Marca/modelo: BYD/146 P6-18	
ESPECIFICAÇÕES	
FÍSICAS	
Dimensões	1482 x 676 x 50 mm
Peso	13 kg
Número de células	36
Área de células do módulo	1,0018 m ²
ELÉTRICAS (1000 W/m ² , 25 °C célula, AM 1.5)	
Tensão nominal	18 V
Potência máxima	140 Wp (Watt pico)
Corrente de curto-circuito	8,76 A
Tensão de circuito aberto	21,49 V
Corrente de máxima potência	7,78 A
Tensão de máxima do sistema	1000 V
Temperatura Nominal de Operação de Célula	45±2°C
Tolerância	± 3%
CONSTRUTIVAS	
Células	Silício policristalino
Fabricante	BYD Company Limited
Cor	Azul
Eficiência do painel	13,97 %

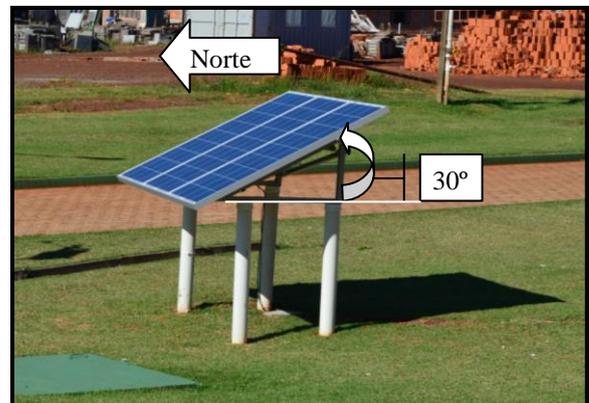


Figura 23 e Figura 24 – Três módulos fotovoltaicos policristalino de 140 Wp cada, instalados em paralelo, com inclinação de 30° voltados para o norte geográfico do local e constituindo o painel fotovoltaico do sistema híbrido.

A relação de participação da potência eólica/fotovoltaica instalada, 2000 W e 420 W, respectivamente, ocorreu por limitações do controlador de carga existente (modelo WWS20A-48), que suportava 2000 W de potência eólica e até 600 W de potência solar. Posteriormente, por problemas técnicos, o controlador de cargas pré-existente foi substituído por outro da marca Xantrex série C.

Para a transformação da tensão em corrente alternada trifásica, gerada pelo aerogerador, em tensão em corrente contínua, foi utilizado uma ponte retificadora 35A 1200V 36MT120 trifásica. A ponte retificadora encontra-se em destaque na Figura 25.



Figura 25 – Ponte retificadora trifásica, modelo 36MT120.

Foi instalado um sistema de proteção para o controlador de carga de possíveis sobrecargas produzidas pelo sistema eólico ou sistema solar fotovoltaico, composto por três disjuntores de 16 A, da marca Soprano. A Figura 26 representa a proteção do sistema, uma vez que o controlador de carga apenas protegerá sobrecargas superiores a 40 A.



Figura 26 – Proteção do controlador de carga – três disjuntores SOPRANO de 16 A.

A proteção do banco de baterias de eventuais sobrecargas produzidas pelos componentes do sistema híbrido eólico-fotovoltaico, por produção excessiva de corrente pelo painel fotovoltaico e/ou aerogerador, foi instalado um controlador de carga de 40A, da marca XANTREX (Figuras 27 e 28). As especificações técnicas do controlador de carga estão apresentadas na Tabela 3 abaixo:

Tabela 3: Especificações técnicas do controlador de carga

Tipo/modelo: Controlador de carga C40 – 12...48 V DC – 40A carga	
ESPECIFICAÇÕES	
FÍSICAS	
Altura	254 mm
Largura	127 mm
Profundidade	63,5 mm
Peso	1,4 kg
Temperatura do ar ambiente para funcionamento	0 ... 40° C
ELÉTRICAS	
Tensão de entrada	≤ 125 V DC – circuito aberto
Corrente de carga	40A a 25° C
Corrente de pico	85A
Tensão	48 V DC

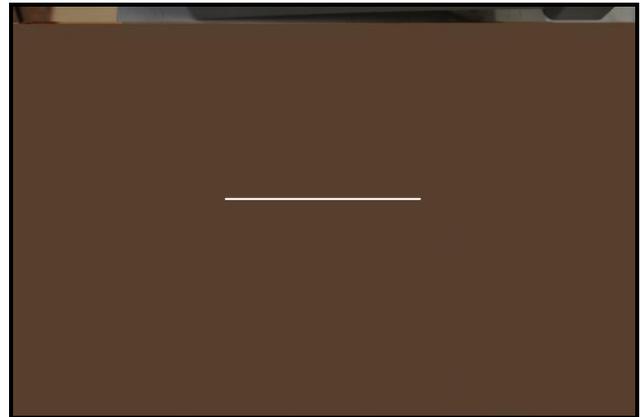


Figura 27 e Figura 28 – Controlador de carga C40 - 12 ... 48 V DC – 40A carga, marca Xantrex série C.

Para manter o consumo de corrente elétrica da carga nos períodos em que não possui irradiância solar ou sem ocorrência de vento, foi instalado um banco de baterias, composto por quatro unidades. As baterias são do tipo automotivas de chumbo-ácido, da marca MAXXICARGO 100Ah (Figura 29), e foram associadas em série para operar na tensão do sistema em 48V (Figura 30). A profundidade de descarga adotada foi de 30%.



Figura 29 – Bateria de chumbo-ácido 100 Ah, MAXXICARGO.



Figura 30 – Banco de baterias de chumbo-ácido 100 Ah, associadas em série, com quatro unidades.

A carga instalada no sistema para simular o consumo de energia fornecida pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico foi constituído por quatro lâmpadas incandescentes de 60W de potência cada. As lâmpadas instaladas operam em corrente contínua, totalizam potência instalada de 240 W e encontram-se sempre ligadas, exceto quando a tensão do banco de baterias for igual ou inferior a 47,3 V. A carga encontra-se representada na Figura 31.



Figura 31 – Carga instalada, composta por quatro lâmpadas incandescentes de 60 W cada.

3.4 Sistema de Aquisição de Dados Elétricos

Para coletar e armazenar os dados elétricos coletados no sistema híbrido eólico-fotovoltaico foi utilizado um datalogger FieldLogger da Novus (Figura 32). As principais especificações técnicas do datalogger FieldLogger encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4: Especificações técnicas do datalogger FieldLogger, da Novus instalado para a coleta de dados

DATALOGGER FIELDLOGGER ESPECIFICAÇÕES	
Entradas analógicas	8
Impedância de entrada dos canais analógicos	Termopares / Pt100 / Pt 1000 / mV: > 2 MΩ mA: 15Ω + 1,5 V V: 1,1 MΩ
Entradas / Saídas digitais	8
Entradas digitais	Nível lógico “0”: de 0 a 0,8 Vcc Nível lógico “1”: de 2 a 30 Vcc Máxima tensão de entrada: 30 Vcc Corrente de entrada @ 30 Vcc (típica): 3 mA
Saídas digitais	Máxima tensão na saída: 30 Vcc; Máxima corrente na saída: 200 mA
Saídas a relé	2 (Corrente máxima: 3 A @ 250 Vca; 3 A @ 30 Vcc)
Memória interna	2 MB
Proteção	IP20
Peso	400 g
Alimentação	100 a 240 Vca ±10 %, 50/60 Hz
Consumo máximo:	20 VA
Altitude de funcionamento	< 2000 m



Figura 32 – Datalogger FieldLogger instalado para a coleta de dados do sistema híbrido eólico-fotovoltaico.

Para impedir que ocorra descarga acentuada ou total das baterias, visando protegê-las de sub-cargas e prolongar a vida útil das mesmas, foi instalado um contator da marca SIEMENS, que irá desligar a alimentação de corrente elétrica da carga toda vez que o relé do datalogger registrar a tensão do banco de baterias menor ou igual a 47,2 V, (*Setpoint* $\leq 4,328$). O relé foi programado com Histerese de 0,070, que faz o contator enviar corrente elétrica à carga quando a tensão do banco de baterias for igual ou superior a 48 V. O contator está representado nas Figuras 33 e 34, sendo apresentado suas características na Tabela 5.

Tabela 5: Características do contator SIEMENS

CONTATOR SIEMENS ESPECIFICAÇÕES	
Tipo	Contatores 3RT10, tripolares
I_c em 400 V / 690 V	7 A / 18 A, respectivamente
Tensão de comando nominal U_s em CA	220 V, 60 Hz
Terminais de ligação por parafuso ou mola	3RT10 15-1AN11
Peso	0,20 kg

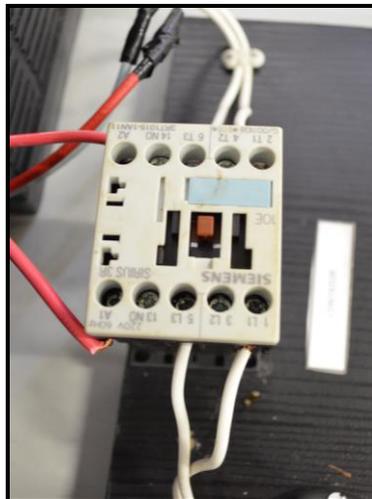


Figura 33 – Contator SIEMENS – Vista superior;



Figura 34 – Contator SIEMENS – Vista lateral.

3.4.1 Equipamentos para medição de dados elétricos

Para a medição dos valores da tensão elétrica (V) do sistema eólico-fotovoltaico e do banco de baterias foram utilizados os divisores de tensão confeccionados através da associação em série de duas resistências de 1 k Ω ($\pm 5\%$) e de 10 k Ω ($\pm 5\%$), permitindo que os valores lidos pudessem ser registrados no datalogger, nos canais 6 e 7, respectivamente. O divisor de tensão encontra-se representado na Figura 35.

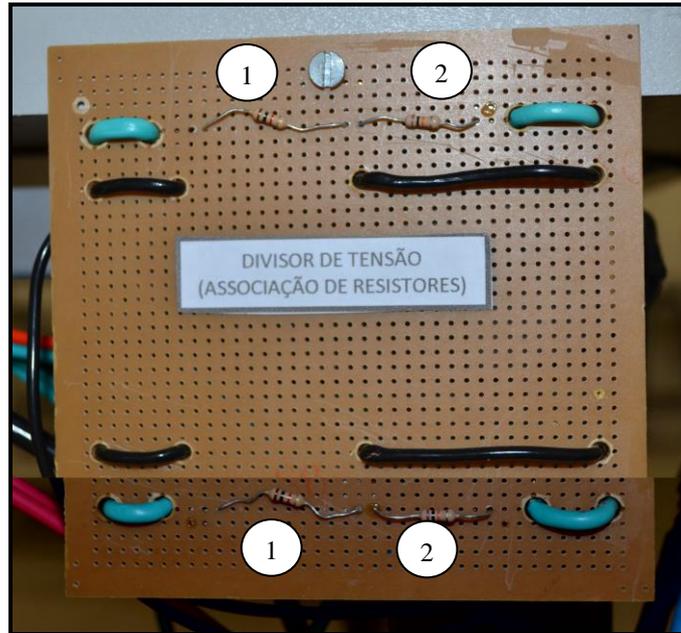


Figura 35 – Divisor de tensão. 1 – Resistor de 1 k Ω (\pm 5%); 2 – Resistor de 10 k Ω (\pm 5%).

Para a medição das correntes elétricas do aerogerador, painéis fotovoltaicos, sistema híbrido, bateria e da carga (lâmpadas instaladas) foi instalado um dispositivo eletrônico, com o objetivo principal de proporcionar um isolamento galvânico para os canais, evitando possíveis interferências entre eles, além de converter os dados de corrente elétrica em valores proporcionais de tensão elétrica, dentro das faixas suportadas pelo datalogger. O dispositivo eletrônico está representado na Figura 36.

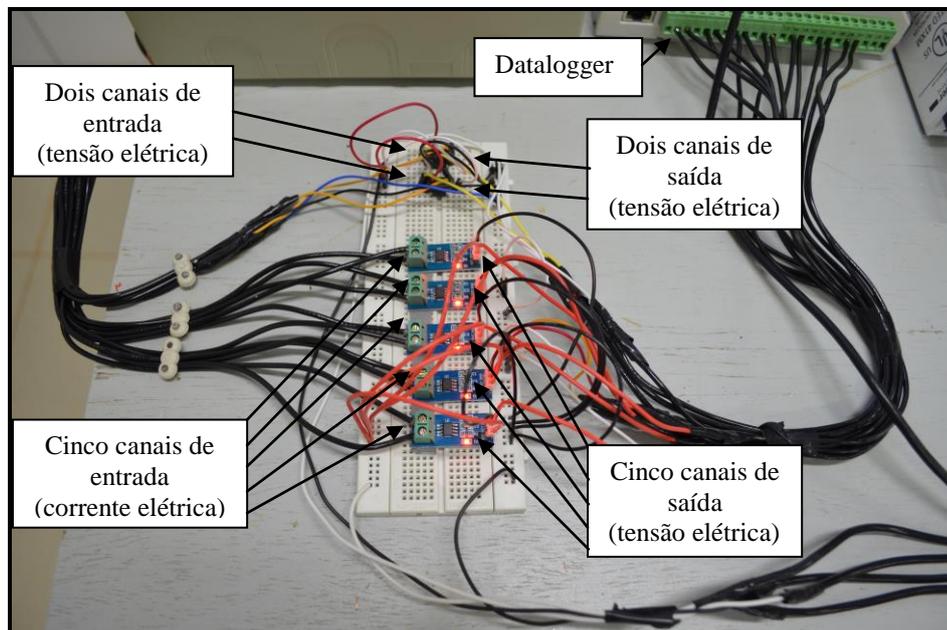


Figura 36 – Dispositivo eletrônico.

Os canais encontram-se dispostos na seguinte ordem, do canal inferior para o superior, mantendo-se nesta sequencia a entrada no datalogger:

Canal 1: corrente elétrica do Sistema Híbrido (Isistema);

Canal 2: corrente elétrica das Baterias (Ibateria);

Canal 3: corrente elétrica da Carga (Icarga);

Canal 4: corrente elétrica do Sistema Eólico (Ieólico);

Canal 5: corrente elétrica do Sistema Solar (Isolar).

Canal 6: tensão elétrica do Sistema Híbrido (Vsistema).

Canal 7: tensão elétrica da Bateria (Vbateria).

Para o correto funcionamento do dispositivo eletrônico apresentado na Figura 36, utilizou-se uma fonte de alimentação universal – LUCCAS NULLE LM 4501 (DC/AC/3fases) com gerador de função de potência 50 W. A Figura 37 apresenta a vista frontal do equipamento e suas características encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6: Características da fonte de alimentação universal – LUCCAS NULLE

FONTE DE ALIMENTAÇÃO UNIVERSAL – LUCCAS NULLE LM 4501 ESPECIFICAÇÕES	
Tensões fixas DC:	+15 V, - 15V, 5V nominal de 3A
Tensão ajustável DC:	0 15V / 3A
Tensões fixas AC:	6V e 12V nominal em 1A; 24V e 42V nominal em 0.5A
Gerador de função:	0 ... 200 kHz, 0,2 ... 20Vss / 1A, 2 200mVss, 5V TTL-nível, senoidal, triangular, quadrado
168 x 230 x 236 (AxLxP)	168 x 230 x 236 (AxLxP)



Figura 37 – Fonte de alimentação.

Para realizar as calibrações necessárias, fez-se indispensável a utilização de dois Volt-ampérimetros Digitais modelo ET-2082A (Figura 38), cujas características encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7: Especificações técnicas do Volt-ampérimetro Digital modelo ET-2082A

ET-2082A ESPECIFICAÇÕES	
Dimensões	190 (A) x 94,5 (L) x 39,5 (P) mm
Peso	450 g
Fabricante	Minipa Eletrônica
Precisão	+/- 1%
Escalas de resistência	200Ω e 2000MΩ
Escalas de tensão contínua	200mV, 2V, 20V, 200V e 1000V
Escalas de tensão alternada	200mV, 2V, 20V, 200V e 750V
Escalas de corrente alternada	2mA, 20mA, 200mA e 20 ^a



Figura 38 – Volt-ampérimetro Digital modelo ET-2082A.

As Figuras 39, 40 e 41 representam a montagem do experimento. As Figuras 39 e 40 apresentam a vista interna do laboratório, frontal e lateral, enquanto que a Figura 41 apresenta a vista externa, local onde foi montado o experimento.

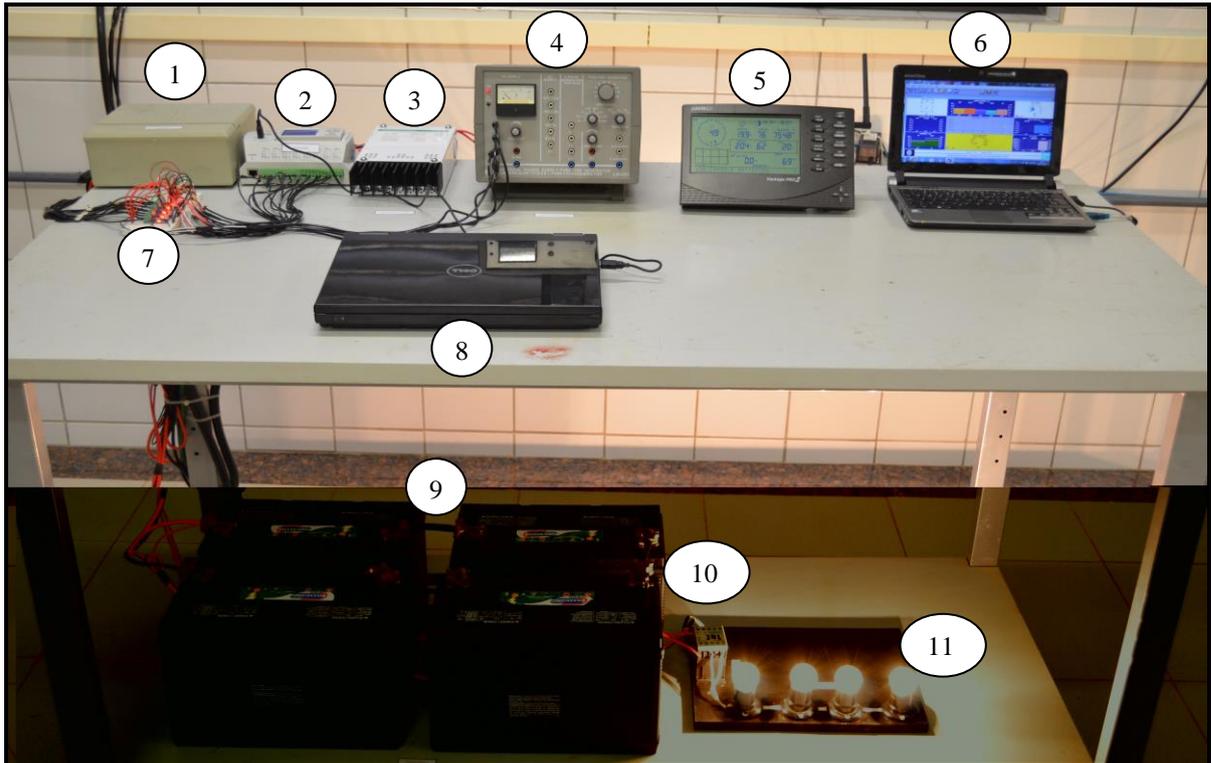


Figura 39 – Vista frontal dos equipamentos dispostos no laboratório. 1 – Proteção do controlador de carga; 2 – Datalogger FieldLogger; 3 – Controlador de carga; 4 – Fonte de alimentação; 5 – Console Vantage Pro2 da estação meteorológica; 6 – Computador conectado ao Console Vantage Pro2; 7 – Dispositivo eletrônico; 8 – Notebook; 9 – Banco de baterias; 10 – Contator da marca SIEMENS, e 11 – Carga instalada.

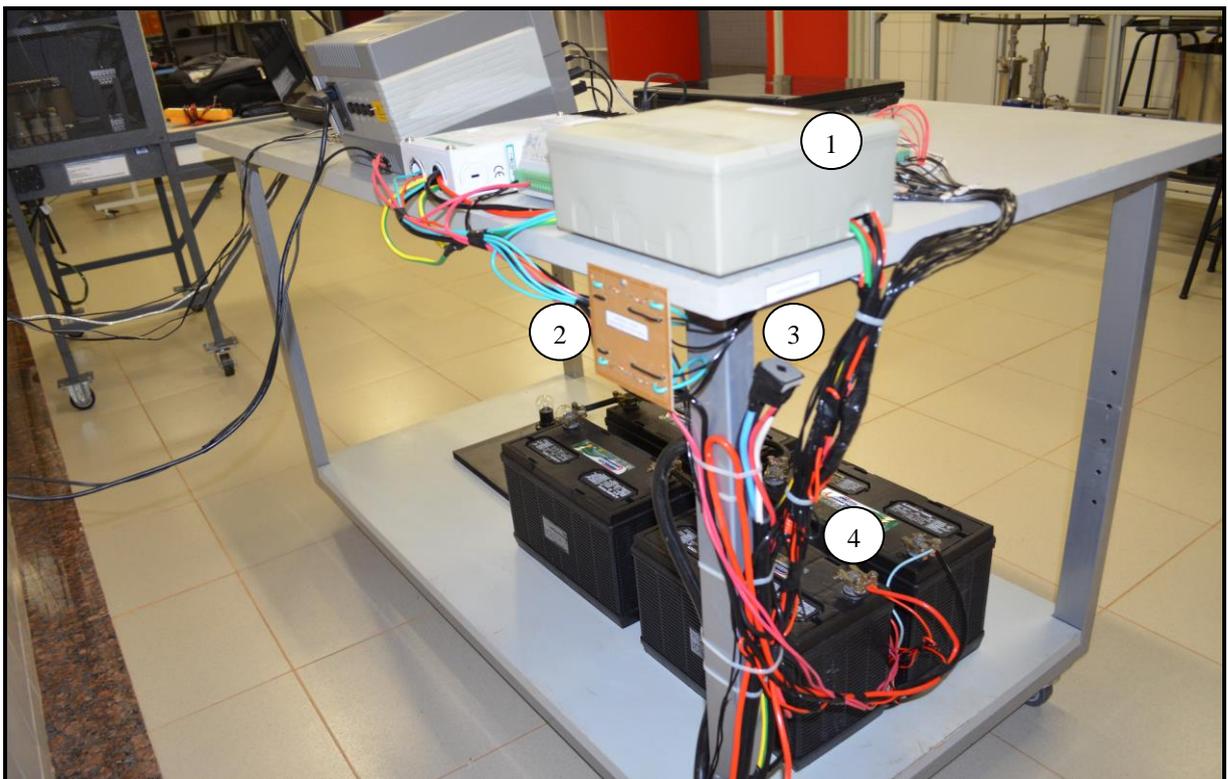


Figura 40 – Vista lateral dos equipamentos dispostos no laboratório. 1 – Proteção do controlador de carga; 2 – Divisor de tensão; 3 – Ponte retificadora, e 4 – Banco de baterias.

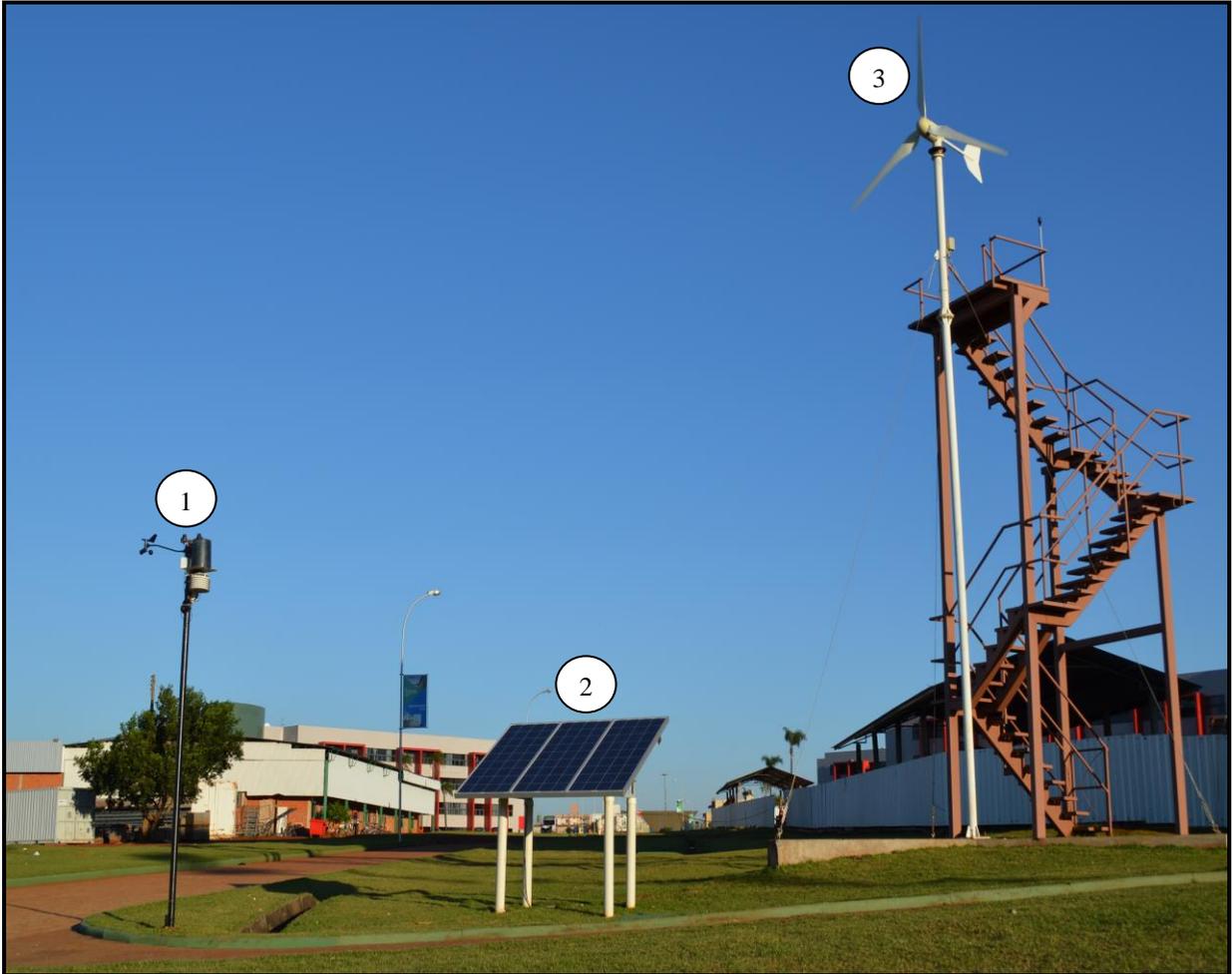


Figura 41 – Vista externa dos equipamentos que constituem o sistema híbrido eólico-fotovoltaico. 1 – Estação meteorológica; 2 – Painéis fotovoltaicos do sistema; 3 – Aerogerador do sistema.

3.5 Coleta dos Dados Meteorológicos e Elétricos

A coleta dos dados meteorológicos foi feita através das informações recebidas pelo Console Vantage Pro2 (receptor) da estação meteorológica localizado no interior do laboratório e foram transferidos para o computador através de um cabo USB. Os dados meteorológicos foram registrados a cada minuto, porém, apenas a irradiância solar (em Wm^{-2}), a velocidade do vento (em ms^{-1}), a pressão (mmHg) e a temperatura (K) foram utilizadas no presente estudo.

O sistema de aquisição dos dados elétricos foi programado para efetuar leituras a cada segundo, registrando apenas a média das variáveis a cada minuto. Os dados coletados foram armazenados no próprio datalogger e, semanalmente, transferidos ao computador. A Tabela 8 apresenta os dados coletados pelo datalogger, da data (coluna A) e hora (coluna B) e das grandezas: Ibateria (corrente elétrica da bateria – coluna C), I carga (corrente elétrica da carga – coluna D), Ieolico (corrente elétrica do aerogerador – coluna E), Isistema (corrente elétrica do sistema híbrido – coluna F), Isolar (corrente elétrica dos painéis fotovoltaicos – coluna G), Vbateria (tensão da bateria – coluna H), e Vsistema (tensão do sistema híbrido – coluna I) – todos os canais em ordem alfabética. Já as colunas J, K, L, M, N, O e P apresentam os valores reais obtidos em cada canal, após a correção dos mesmos, na ordem de entrada no datalogger.

Tabela 8: Dados elétricos coletados através do datalogger e valores reais de corrente e tensão elétrica

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
DATE	TIME	Ibateria	I carga	Ieolico	Isistema	Isolar	Vbateria	Vsistema	sistema (A)	Ibateria (A)	I carga (A)	Ieólico (A)	Isolar (A)	Vsistema (V)	Vbateria (V)
23/07/2013	16:00:00	2,775	2,776	2,440	2,745	3,329	4,600	4,551	3,921	4,476	6,137	0,882	4,781	49,648	50,046
23/07/2013	16:01:00	2,774	2,776	2,440	2,743	3,325	4,596	4,547	3,889	4,460	6,137	0,882	4,758	49,605	50,002
23/07/2013	16:02:00	2,772	2,775	2,440	2,741	3,320	4,593	4,544	3,857	4,429	6,123	0,882	4,730	49,572	49,969
23/07/2013	16:03:00	2,770	2,775	2,440	2,739	3,316	4,590	4,541	3,825	4,397	6,123	0,882	4,708	49,539	49,937
23/07/2013	16:04:00	2,769	2,775	2,440	2,738	3,311	4,587	4,538	3,810	4,381	6,123	0,882	4,680	49,506	49,904
23/07/2013	16:05:00	2,769	2,775	2,440	2,738	3,310	4,585	4,536	3,810	4,381	6,123	0,882	4,674	49,485	49,882
23/07/2013	16:06:00	2,769	2,774	2,439	2,738	3,313	4,584	4,535	3,810	4,381	6,110	0,876	4,691	49,474	49,872
23/07/2013	16:07:00	2,772	2,774	2,439	2,741	3,318	4,585	4,535	3,857	4,429	6,110	0,876	4,719	49,474	49,872
23/07/2013	16:08:00	2,769	2,774	2,439	2,738	3,311	4,582	4,533	3,810	4,381	6,110	0,876	4,680	49,452	49,850
23/07/2013	16:09:00	2,765	2,774	2,439	2,733	3,300	4,577	4,530	3,730	4,317	6,110	0,876	4,618	49,419	49,795
23/07/2013	16:10:00	2,758	2,773	2,439	2,727	3,282	4,570	4,523	3,635	4,206	6,096	0,876	4,517	49,343	49,719
23/07/2013	16:11:00	2,754	2,773	2,439	2,722	3,270	4,564	4,518	3,556	4,143	6,096	0,876	4,449	49,288	49,654
23/07/2013	16:12:00	2,751	2,773	2,439	2,719	3,260	4,560	4,514	3,508	4,095	6,096	0,876	4,393	49,245	49,610
23/07/2013	16:13:00	2,749	2,772	2,439	2,718	3,255	4,557	4,511	3,492	4,063	6,082	0,876	4,365	49,212	49,578
23/07/2013	16:14:00	2,747	2,773	2,439	2,715	3,251	4,554	4,509	3,444	4,032	6,096	0,876	4,343	49,190	49,545
23/07/2013	16:15:00	2,746	2,772	2,439	2,714	3,246	4,551	4,505	3,429	4,016	6,082	0,876	4,315	49,146	49,513
23/07/2013	16:16:00	2,744	2,772	2,439	2,711	3,238	4,548	4,503	3,381	3,984	6,082	0,876	4,270	49,125	49,480
23/07/2013	16:17:00	2,741	2,772	2,439	2,709	3,233	4,545	4,500	3,349	3,937	6,082	0,876	4,242	49,092	49,447
23/07/2013	16:18:00	2,740	2,772	2,439	2,707	3,227	4,542	4,497	3,317	3,921	6,082	0,876	4,208	49,059	49,415
23/07/2013	16:19:00	2,736	2,772	2,439	2,704	3,220	4,539	4,495	3,270	3,857	6,082	0,876	4,169	49,037	49,382
23/07/2013	16:20:00	2,735	2,772	2,439	2,703	3,216	4,537	4,493	3,254	3,841	6,082	0,876	4,146	49,016	49,360
23/07/2013	16:21:00	2,734	2,772	2,439	2,702	3,212	4,535	4,491	3,238	3,825	6,082	0,876	4,124	48,994	49,338
23/07/2013	16:22:00	2,735	2,772	2,439	2,702	3,215	4,534	4,490	3,238	3,841	6,082	0,876	4,140	48,983	49,328
23/07/2013	16:23:00	2,737	2,772	2,438	2,705	3,219	4,535	4,490	3,286	3,873	6,082	0,871	4,163	48,983	49,338
23/07/2013	16:24:00	2,695	2,771	2,439	2,664	3,115	4,516	4,477	2,635	3,206	6,068	0,876	3,579	48,841	49,132
23/07/2013	16:25:00	2,567	2,770	2,439	2,529	2,745	4,450	4,430	0,492	1,175	6,055	0,876	1,500	48,328	48,414
23/07/2013	16:26:00	2,655	2,770	2,439	2,620	2,993	4,485	4,453	1,937	2,571	6,055	0,876	2,893	48,579	48,795
23/07/2013	16:27:00	2,727	2,771	2,439	2,693	3,188	4,520	4,477	3,095	3,714	6,068	0,876	3,989	48,841	49,175
23/07/2013	16:28:00	2,725	2,771	2,439	2,692	3,184	4,519	4,477	3,079	3,683	6,068	0,876	3,966	48,841	49,164
23/07/2013	16:29:00	2,592	2,770	2,439	2,557	2,824	4,466	4,442	0,937	1,571	6,055	0,876	1,944	48,459	48,588
23/07/2013	16:30:00	2,703	2,770	2,441	2,669	3,123	4,496	4,457	2,714	3,333	6,055	0,888	3,624	48,623	48,914

Para ser possível definir as equações de correção dos valores de tensão elétrica (V) coletados pelo datalogger para os valores reais de corrente elétrica (A), foi utilizada uma Fonte de Alimentação DC Regulada MPL-1303M, representada na Figura 42, cujas especificações encontram-se na Tabela 9. As equações para correção dos dados registrados no datalogger, para os canais de corrente elétrica (Canais de entrada 1 a 5) foram obtidas a partir

da comparação desses valores com os valores reais de tensão e corrente elétrica gerados, com os Volt-ampérimetros apresentados na Figura 38.

Tabela 9: Especificações da Fonte de Alimentação DC Regulada MPL-1303M

FONTE DE ALIMENTAÇÃO DC REGULADA MPL-1303M ESPECIFICAÇÕES	
Dimensões	140 (A) x 160 (L) x 260 (P) mm
Peso	5 kg
Fabricante	Minipa Eletrônica
Saída variável	1 x 0~32V 1 x 0~3A
Consumo mínimo	160W



Figura 42 – Fonte de Alimentação DC Regulada MPL-1303M.

Para os canais de tensão V_{sistema} (tensão elétrica do sistema híbrido eólico-fotovoltaico) e V_{bateria} (tensão elétrica do banco de baterias), canais de entrada 6 e 7 do datalogger, respectivamente, foram realizadas medições com os dois Volt-ampérimetros, ambos na função voltímetro. As medidas foram realizadas nos extremos do resistor de menor resistência, localizado no divisor de tensão, simultaneamente com a medida da tensão de entrada no datalogger (Figura 43).



Figura 43 – Calibração dos canais de tensão do sistema e da bateria.

Foi determinado, como fatores, os valores 10,90932 para o canal 6 – V_{sistema} e 10,87949 para o canal 7 – V_{bateria} . Estes valores constituem os múltiplos que foram empregados aos valores lidos no datalogger, convertendo-os nos reais valores de tensão.

Na Tabela 10 encontra-se a apresentação dos dados lidos e a sua equivalência, como valor real, após a aplicação dos valores às equações de correção.

Tabela 10: Equações de correção dos valores coletados e valores reais

Canal	Grandeza	Equação de Correção	Valor lido	Valor Real	Und Medida
1.	I_{sistema}	$= (\text{valor lido} - 2,4714) / 0,0668$	2,745	4,10	A
2.	I_{bateria}	$= (\text{valor lido} - 2,4771) / 0,0625$	2,775	4,77	A
3.	I_{carga}	$= (\text{valor lido} - 2,4871) / 0,0632$	2,776	4,57	A
4.	I_{eolico}	$= (\text{valor lido} - 2,4043) / 0,1821$	2,440	0,20	A
5.	I_{solar}	$= (\text{valor lido} - 2,5043) / 0,1843$	3,329	4,47	A
6.	V_{sistema}	$= (\text{valor lido} \times 10,90932)$	4,551	49,65	V
7.	V_{bateria}	$= (\text{valor lido} \times 10,87949)$	4,600	50,05	V

3.6 Análise dos dados coletados

Os dados elétricos de corrente elétrica (I_{solar} , $I_{\text{eólico}}$, $I_{\text{híbrido}}$, I_{carga} e I_{bateria}) e de tensão elétrica (V_{sistema} e V_{bateria}), e os dados da estação meteorológica (velocidade do vento [ms^{-1}], irradiância solar [Wm^{-2}], pressão atmosférica [mmHg] e

temperatura [K]) foram registrados a cada minuto pelo datalogger e console da estação meteorológica, respectivamente, pelo período de 25 (vinte e cinco) dias. Foi realizada a média horária das grandezas elétricas e meteorológicas, das produções de energia pelo sistema solar, eólico e híbrido, bem como o consumo da energia pela carga instalada. Foram analisadas as correlações entre as grandezas:

- a) Velocidade média diária do vento (ms^{-1}) x período considerado;
- b) Velocidade média horária do vento (ms^{-1}) x horas do dia;
- c) Ocorrência da velocidade do vento (ms^{-1}) x percentual de ocorrência;
- d) Energia diária do aerogerador disponível/produzida (kWh) x período considerado;
- e) Irradiância solar média diária (Wm^{-2}) x período considerado;
- f) Irradiância solar média horária (Wm^{-2}) x horas do dia;
- g) Ocorrência da irradiância solar média horária (Wm^{-2}) x percentual de ocorrência;
- h) Energia diária dos painéis fotovoltaicos disponível/produzida (kWh) x período considerado;
- i) Disponibilidade de energia solar e energia eólica x (kWh) x período considerado;
- j) Energia total disponível (sistema híbrido) x energia consumida (kWh);
- k) Energia elétrica diária produzida (solar e eólica) x energia diária consumida (kWh);
- l) Energia elétrica diária produzida x energia elétrica diária consumida x energia da bateria (kWh);

Todos os resultados estão apresentados em forma gráfica, avaliando-se assim a eficiência do sistema solar fotovoltaico, do sistema eólico e do sistema híbrido.

Para realizar a avaliação do Coeficiente de Potência (C_p) do sistema eólico, foi utilizado a Equação 7:

$$C_p = \frac{PEA}{PED} \quad (7)$$

Onde:

PEA= Potência Elétrica do Aerogerador; e

PED= Potência Eólica Disponível.

$$PEA = I_E \cdot U \quad (8)$$

I_E – Corrente Elétrica do Sistema Eólico; e
 U – Tensão do Sistema.

$$PED = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (9)$$

ρ - Densidade absoluta da massa de ar ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

A – Área do rotor do aerogerador (m^2); e

v – Velocidade do vento (ms^{-1}).

A eficiência do Sistema Solar (ES) foi determinada através da Equação 10:

$$ES = \frac{PES}{PSD} \quad (10)$$

Onde:

PES = Potência Elétrica Solar (J); e

PSD = Potência Solar Disponível (J).

$$PES = I_S \cdot U \quad (11)$$

I_S – Corrente Elétrica do Sistema Solar.

$$PSD = I_r \cdot A \quad (12)$$

I_r = Irradiância solar (Wm^{-2}); e

A = Área (m^2).

A Eficiência do Sistema Híbrido (ESH) foi determinada através da Equação 13:

$$ESH = \frac{EDD}{ECC} \quad (13)$$

Onde:

EDD = Energia Disponível Diária (Energia Solar + Energia Eólica) (J); e

ECC = Energia Consumida pela Carga (J).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Velocidade do vento – média diária

Os valores da velocidade média diária do vento (ms^{-1}) são representados na Figura 44. Observa-se que a maior média diária da velocidade do vento ocorreu no 25º dia (20/09/13) e a menor média ocorreu no 12º dia (29/08/13). O período considerado apresentou grande amplitude nas medidas analisadas.

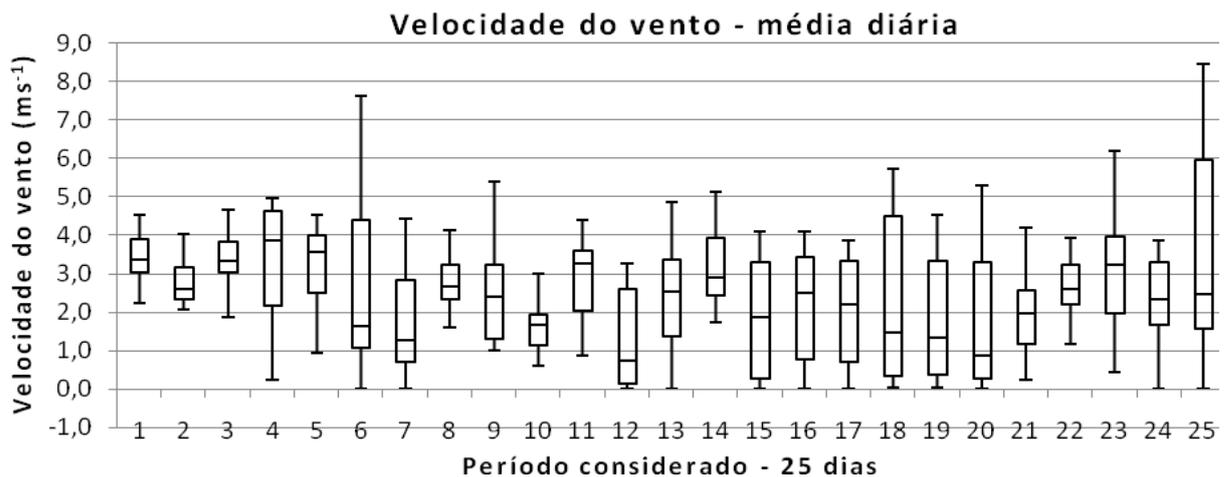


Figura 44 – Velocidade média diária do vento (ms^{-1}).

4.2 Velocidade do vento – média horária

A Figura 45 apresenta a velocidade do vento média horária, para o período considerado. Verifica-se que a maior média ocorre no intervalo de 8:00 hs à 16:00 hs, com valor máximo atingido às 11:00 hs. A menor incidência do vento ocorre no período das 18:00 hs às 22:00 hs, com valor mínimo atingido às 19:00 hs.

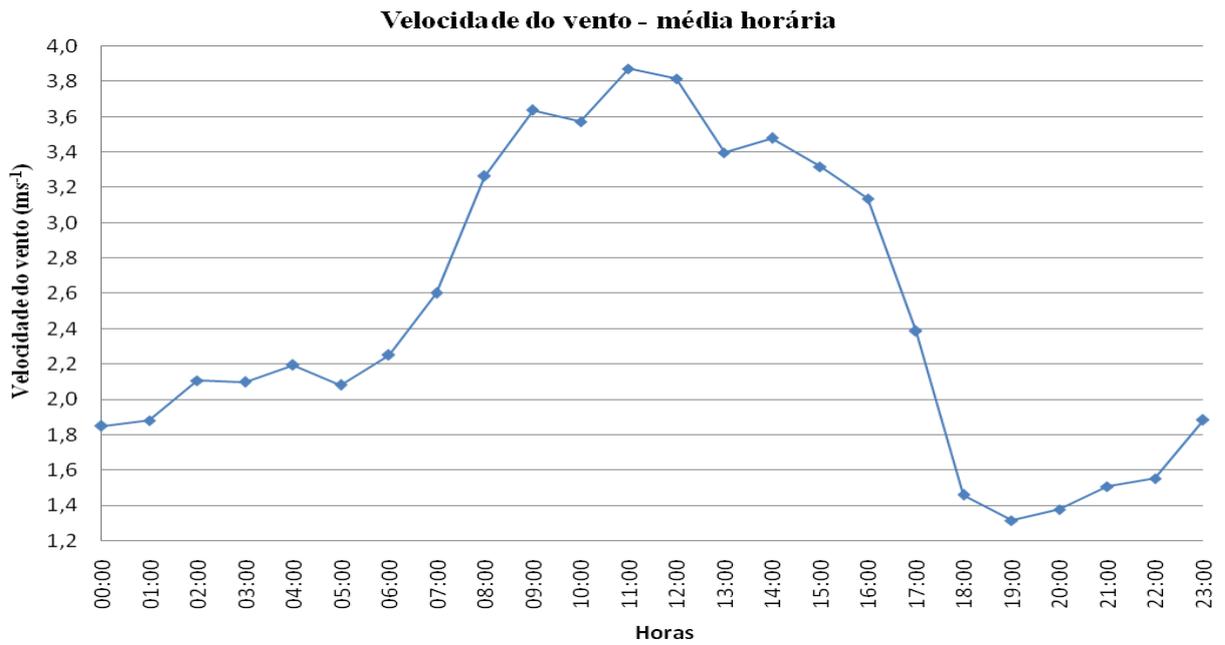


Figura 45 – Velocidade média horária do vento (ms⁻¹).

4.3 Velocidade do vento – frequência de ocorrência

Na Figura 46 são representados os valores da frequência de ocorrência do vento durante o período observado. Verifica-se que o maior percentual de ocorrência possui média de 4,0 m/s.

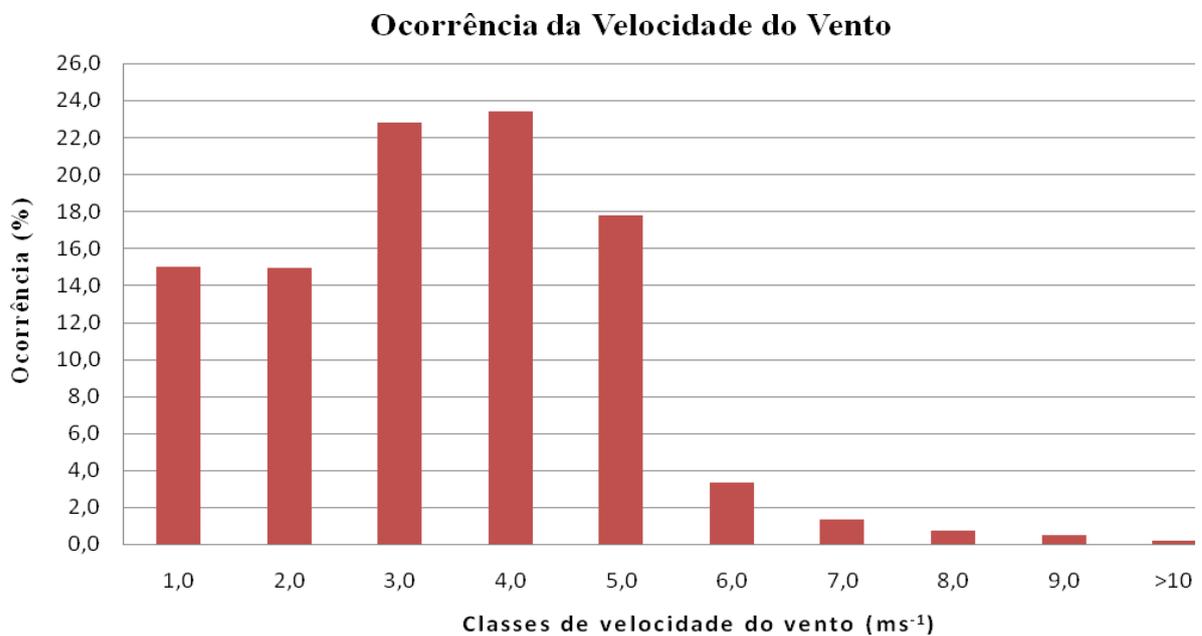


Figura 46 – Velocidade do vento – frequência de ocorrência.

4.4 Energia do aerogerador

Na Figura 47 estão representadas a energia eólica diária disponível e a energia elétrica produzida pelo aerogerador. Verifica-se que a maior disponibilidade e produção ocorreram no 25º dia (20/09/13) e a menor disponibilidade e produção ocorreram no 12º dia (29/08/13).

Energia do aerogerador - média diária (kWh)

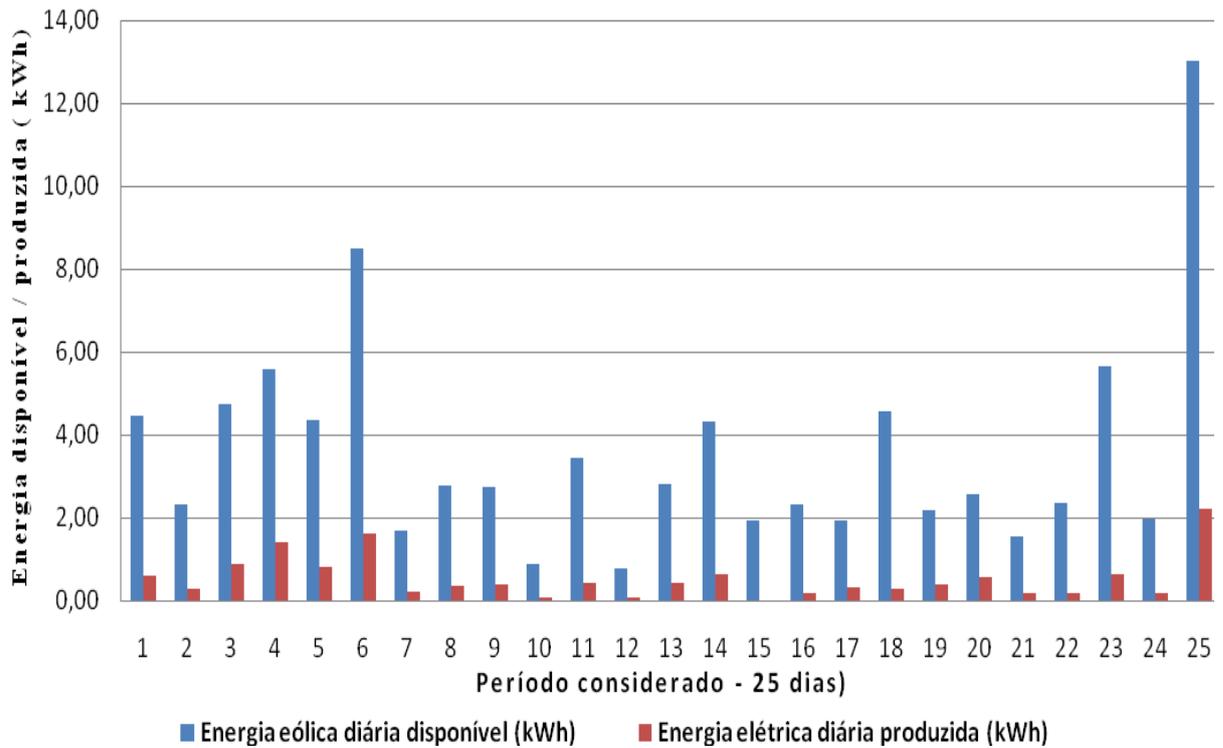


Figura 47 – Energia do aerogerador.

4.5 Irradiância solar – média diária

Os valores da irradiância solar média diária (Wm^{-2}) são representados na Figura 48. Observa-se que a maior média diária da irradiância solar ocorreu no 17º dia (12/09/13) e a menor média ocorreu no 21º dia (16/09/13).

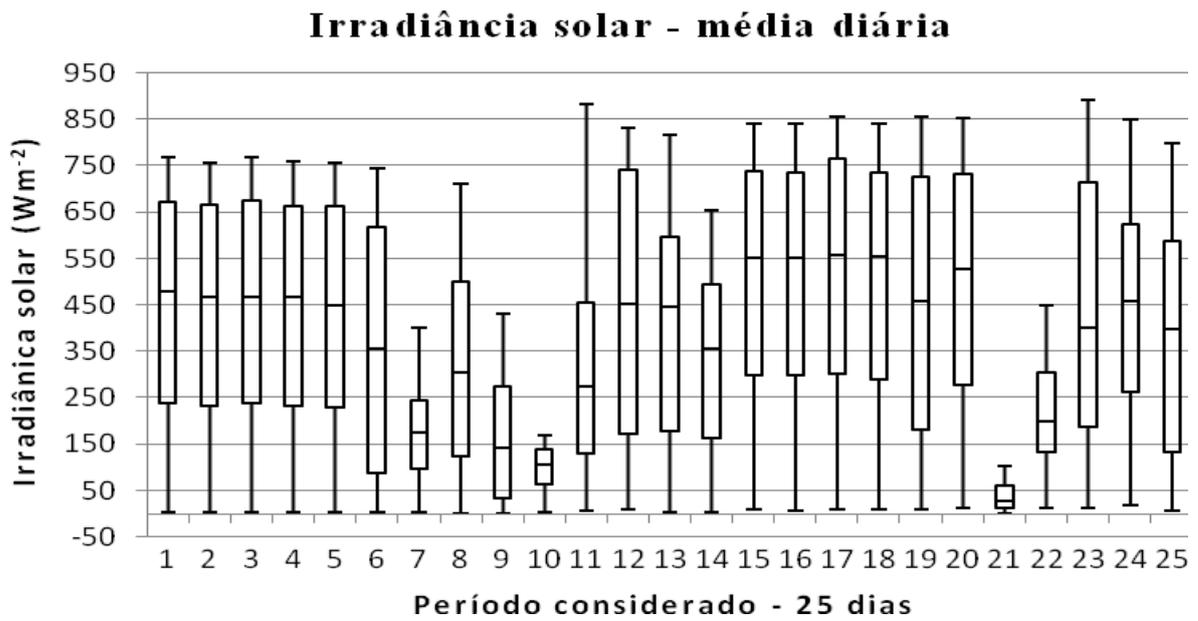


Figura 48– Irradiância solar – média diária.

4.6 Irradiância solar – média horária

A Figura 49 apresenta a irradiância solar média horária, para o período considerado. Verifica-se que a maior média ocorre às 12:00 hs.

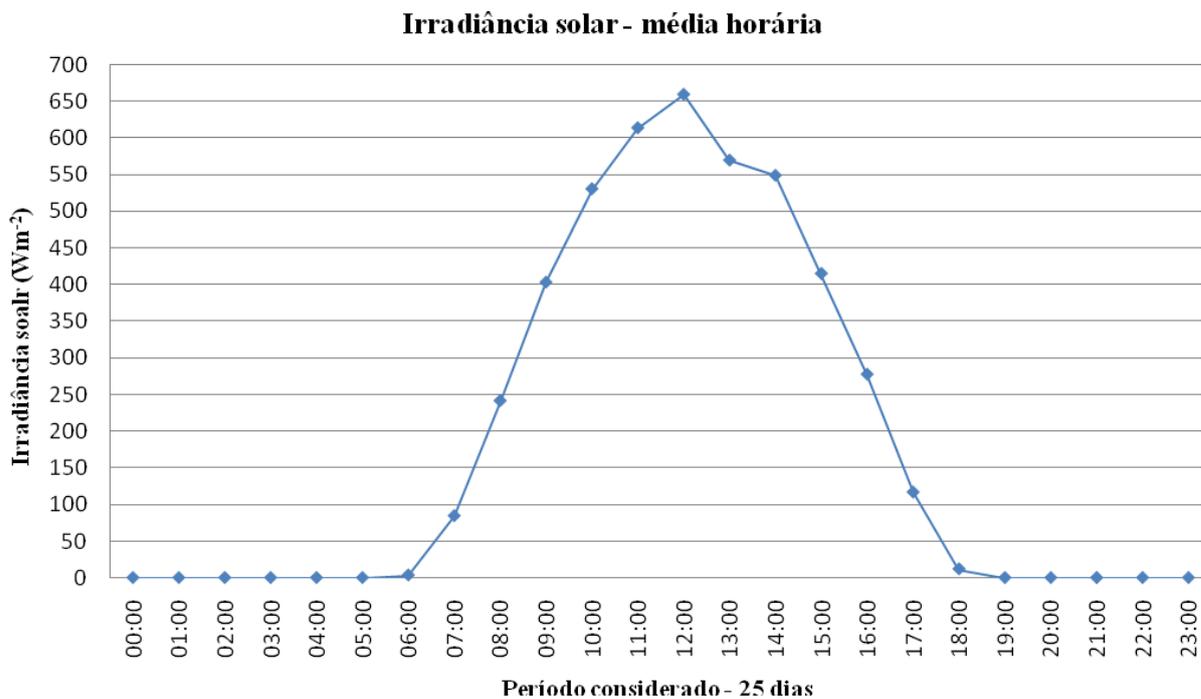


Figura 49– Irradiância solar – média horária.

4.7 Irradiância solar – frequência de ocorrência

Na Figura 50 são representados os valores da frequência de ocorrência da irradiância solar para o período observado. Verifica-se que o maior percentual de ocorrência possui média de 100 Wm^{-2} .

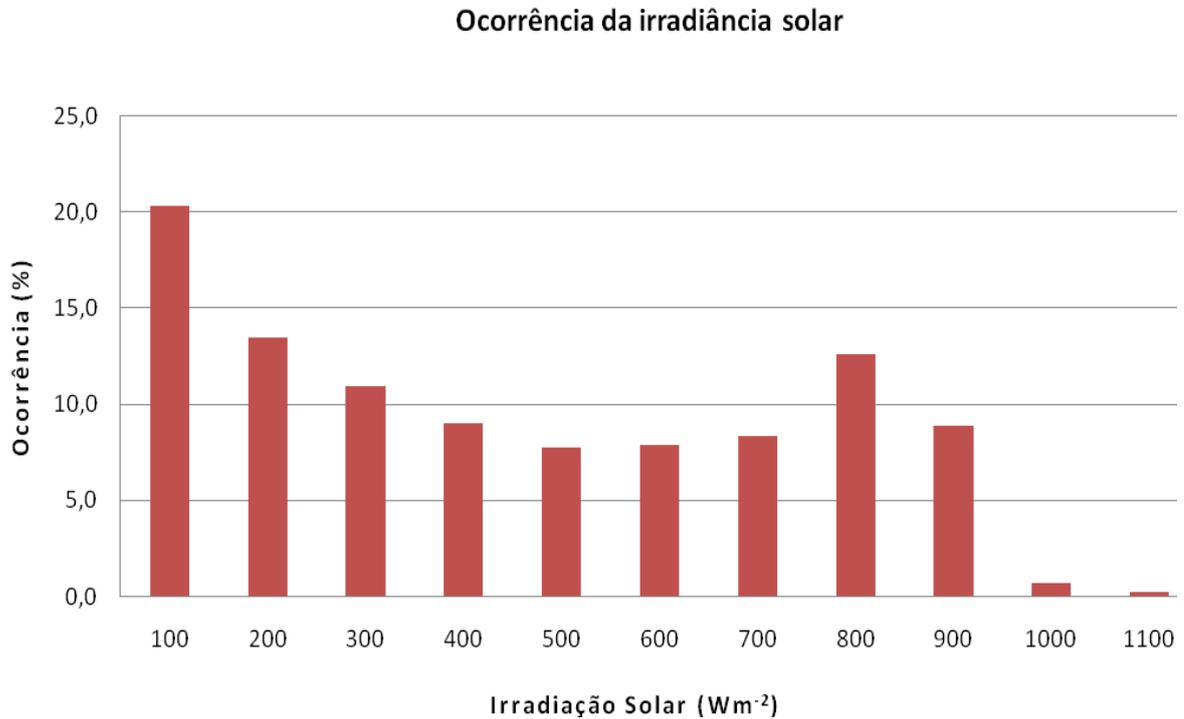


Figura 50– Irradiância solar – frequência de ocorrência.

4.8 Energia dos painéis fotovoltaicos

Na Figura 51 estão representadas a energia solar fotovoltaica diária disponível e a energia elétrica produzida pelos painéis. Verifica-se que a maior disponibilidade ocorreu no 17º dia (12/09/13), a maior produção ocorreu no 1º dia (16/08/13) e a menor disponibilidade e produção ocorreram no 21º dia (16/09/13).

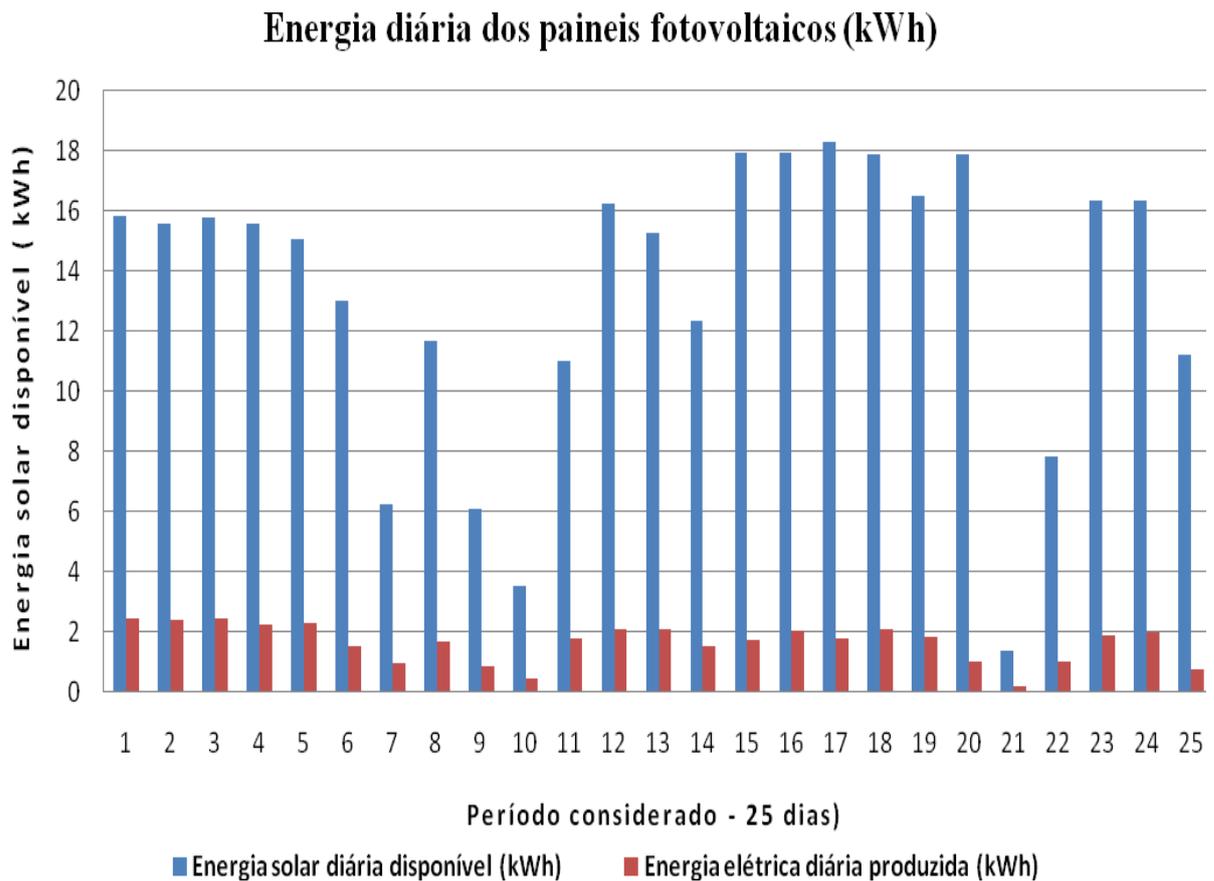


Figura 51– Energia dos painéis fotovoltaicos.

4.9 Disponibilidade de Energia

Na Figura 52 estão representadas as disponibilidades diárias de energia do sistema solar fotovoltaico, sistema eólica e sistema híbrido: eólico-fotovoltaico. Verifica-se que a maior disponibilidade de energia no sistema híbrido é proporcionada pela energia solar fotovoltaica, sempre apresentando-se com valor superior à disponibilidade eólica, com exceção ao 21º e 25º dias, (16/09/13 e 20/09/13, respectivamente).

A diferença mais significativa de disponibilidade ocorreu no 17º dia (12/09/13), onde a disponibilidade de energia solar superou a disponibilidade eólica em 16,35 kWh.

Verifica-se que, analisando isoladamente a curva de disponibilidade de energia do sistema híbrido com relação a cada um dos sistemas de geração eólico e fotovoltaico, a disponibilidade de energia do sistema híbrido dependeu fundamentalmente, em termos da disponibilidade de energia, da energia disponível pelo sistema fotovoltaico, e que a

disponibilidade de energia do sistema eólico apresentou maior representatividade no 6º e 25º dias (22/08/13 e 20/09/13).

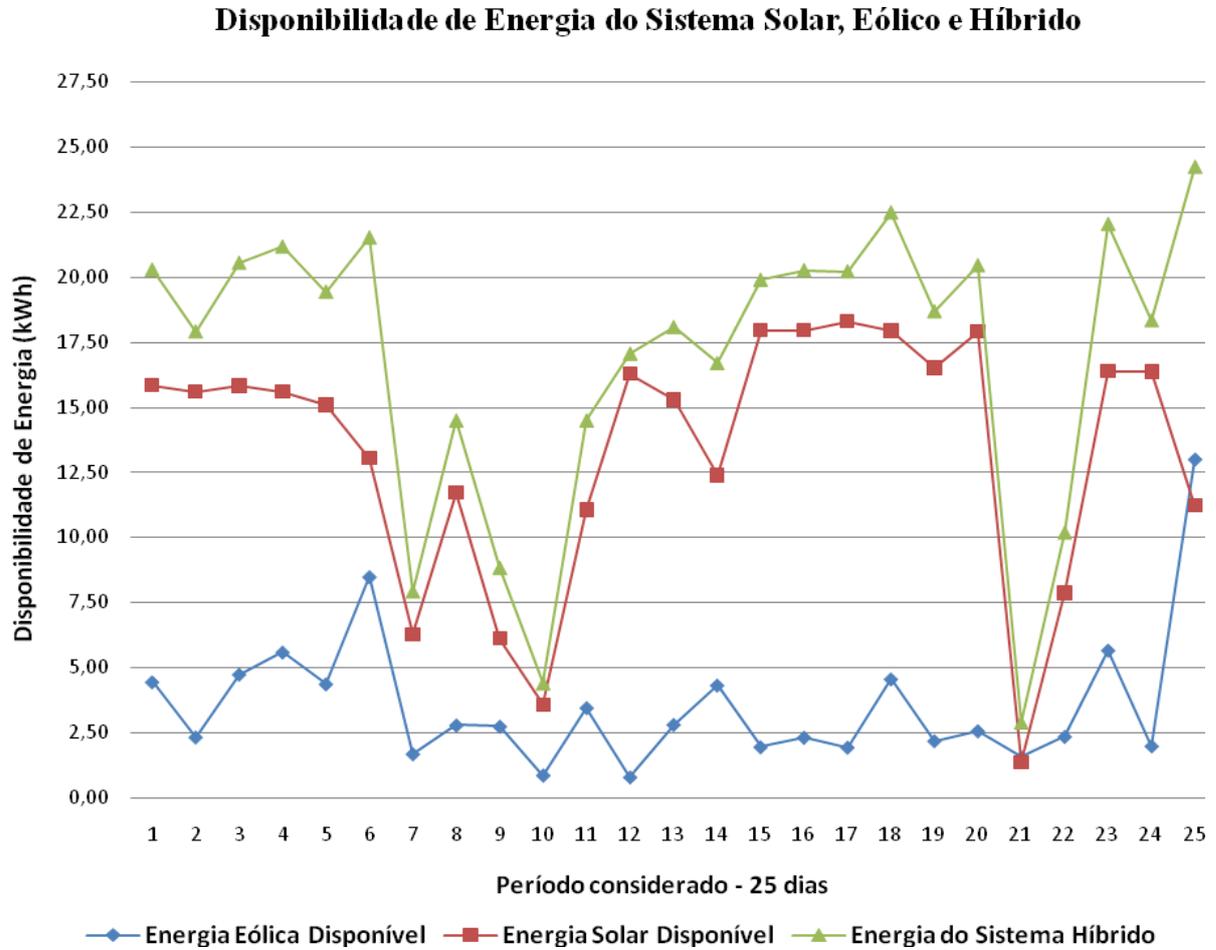


Figura 52– Disponibilidade de Energia.

4.10 Disponibilidade de Energia do Sistema Híbrido x Consumo de Energia

Na Figura 53 estão representadas a disponibilidade diária de energia do sistema híbrido e o consumo de energia elétrica pela carga. Verifica-se que o maior consumo de energia elétrica pela carga ocorreu no 4º dia (19/08/13) e o menor consumo ocorreu no 21º dia (16/09/13).

Já a maior disponibilidade de energia ocorreu no 25º dia (20/09/13) e a menor disponibilidade ocorreu no 21º dia (16/09/13).

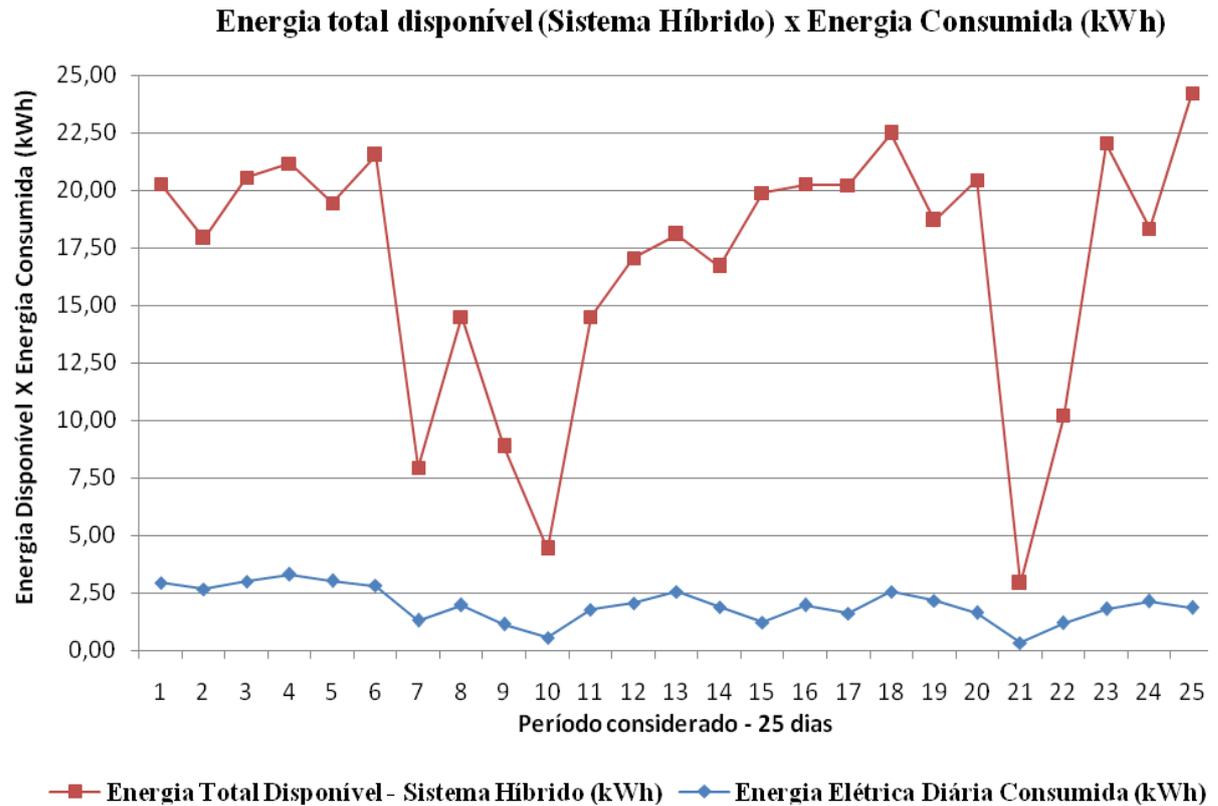


Figura 53– Disponibilidade de Energia do Sistema Híbrido x Consumo de Energia.

4.11 Energia elétrica fornecida pelos Sistemas Eólico e Solar x Consumo de Energia

Na Figura 54 estão representadas as produções diárias de energia elétrica pelos sistemas eólico e solar e o consumo de energia elétrica pela carga. Verifica-se que a maior produção de energia elétrica foi proporcionada pelo sistema solar, que sempre se manteve com valores absolutos superiores ao fornecimento de energia elétrica pelo sistema eólico, com exceção ao 6º e 25º dias (22/08/13 e 20/09/13).

Observa-se ainda que no 21º dia (16/09/13) a produção atingiu o mesmo índice para os dois sistemas e no 2º dia (17/08/13) a produção do sistema solar apresentou maior diferença.

A produção máxima do sistema solar ocorreu no 4º dia (19/08/13) e o sistema eólico apresentou produção máxima no 25º dia (20/09/13).

O maior consumo energético pela carga ocorreu no 4º dia (19/08/13) e o menor consumo ocorreu no 21º dia (16/09/13).

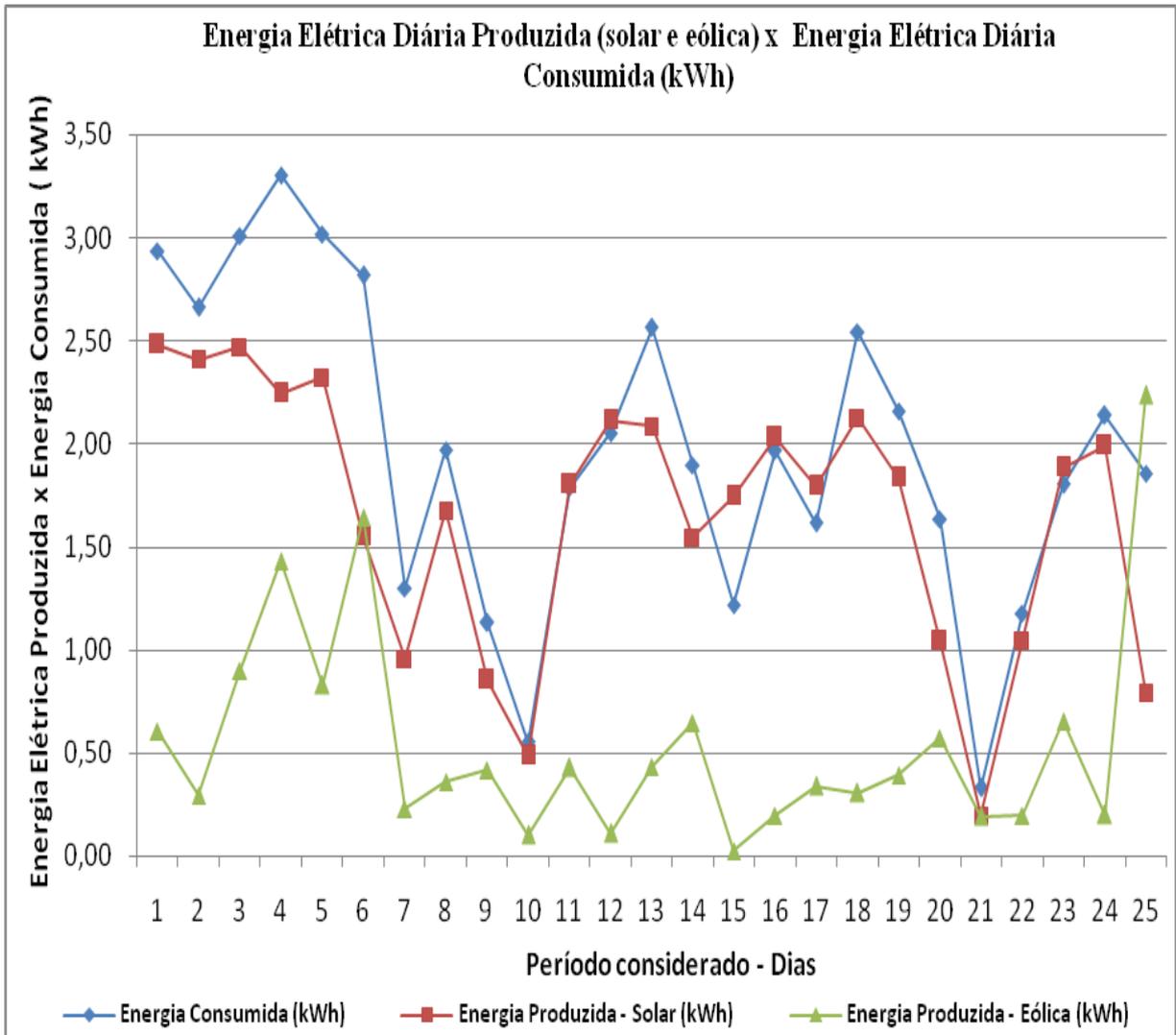


Figura 54– Energia elétrica fornecida pelos Sistemas Eólico e Solar x Consumo de Energia.

4.12 Energia elétrica diária do Sistema Híbrido x Bateria x Consumo de Energia

Na Figura 55 estão representadas as produções diárias de energia elétrica pelo sistema híbrido, o fluxo de energia na bateria e o consumo de energia elétrica pela carga.

Verifica-se que a predominância de carga da bateria ocorre no 3º, 6º, 10º, 11º, 15º, 17º, 23º e 25º dias, enquanto que descargas mais significativas na bateria ocorrem no 7º, 13º e 18º dias.

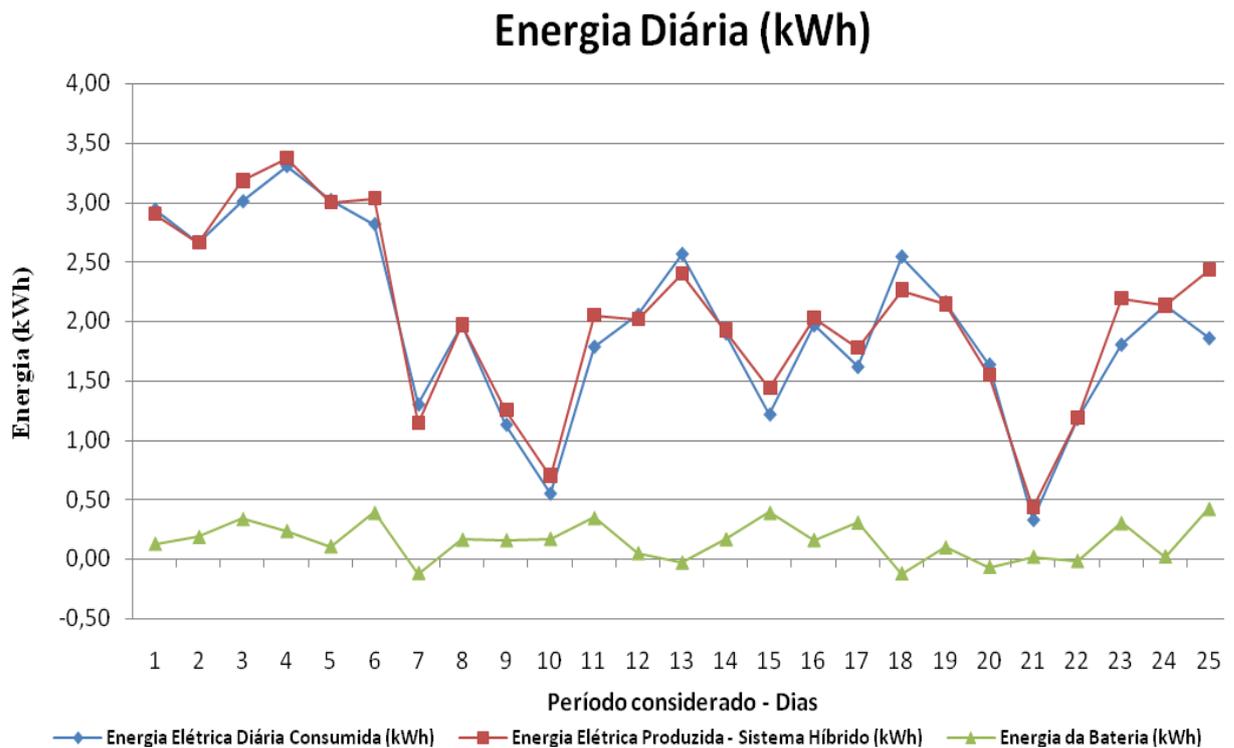


Figura 55– Energia elétrica diária do Sistema Híbrido x Bateria x Consumo de Energia.

4.13 Eficiências dos sistemas

As eficiências dos sistemas avaliados apresentaram os seguintes valores médios para o período:

- A eficiência média do sistema solar fotovoltaico foi de 12,5%;
- A eficiência média do sistema eólico foi de 18,7%;
- A eficiência média do sistema híbrido foi de 11,9%;
- O banco de baterias apresentou eficiência média de 64,7%;
- O controlador de cargas apresentou eficiência média de 80,73 %.

Vários trabalhos foram desenvolvidos calculando-se a eficiência dos sistemas de geração fotovoltaica e sistema de geração eólica, quando integrando um sistema híbrido: eólico-fotovoltaico. Os resultados encontrados variam de 8%, 8,6% e 9,3%, para geração fotovoltaica; 9,46%, 20% e 24,6%, para a geração eólica (GARCÍA, 2004; SIQUEIRA, 2005; ENGIN, 2013).

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou a eficiência de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico de pequeno porte em Cascavel, no estado do Paraná. As conclusões apresentadas na avaliação deste experimento estão condicionadas à forma de execução do experimento, sendo um reflexo dos resultados dele obtidos.

Os valores da velocidade média do vento, energia eólica disponível e energia elétrica produzida pelo aerogerador, dependeram do dia e horário de ocorrência. Para o período considerado, a velocidade média do vento foi de $2,5 \text{ m.s}^{-1}$.

A influência da temperatura externa e pressão atmosférica, com médias de 290,3 K e 759,5 mmHg, respectivamente, foram determinantes na definição da densidade absoluta da massa de ar, cujo valor médio encontrado foi $\rho = 1,2157 \text{ kg.m}^{-3}$.

O coeficiente de potência do aerogerador obteve índice médio de 0,187, com eficiência de 18,7% na conversão de potência eólica em energia elétrica. Em função da predominância dos ventos nos horários diurnos, o aerogerador apresentou melhor desempenho nesse período.

O sistema fotovoltaico apresentou rendimento médio de 12,5% na conversão de energia solar fotovoltaica em energia elétrica.

A energia elétrica produzida pelo sistema fotovoltaico foi mais estável que a energia elétrica produzida pelo sistema eólico.

Mesmo com potência pico instalada de apenas 420 W, a energia elétrica produzida pelo sistema fotovoltaico contribuiu 75,2% de toda energia produzida pelo sistema híbrido. Já o sistema eólico, com potência instalada de 2000 W, contribuiu com apenas 24,8 % da energia produzida.

O banco de baterias apresentou eficiência média de 64,7%.

A eficiência média do sistema híbrido foi de 11,9%.

O controlador de cargas apresentou eficiência média de 80,73 %.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMÊNDOLA, C. A. M. **Contribuição ao estudo de aerogeradores de velocidade e passo variáveis com gerador duplamente alimentado e sistema de controle difuso**. 2007. 216p. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18133/tde-06122007-142431/pt-br.php>>. Acesso em 06 out. 2013.
- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. ANEEL, 2002. 199p. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/livro_atlas.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2013.
- BANCO MUNDIAL. **Estudo de baixo carbono para o Brasil – Relatório de Síntese Técnica – ENERGIA**. Washington, USA, Banco Mundial, 2010. 222p.
- BARBOSA, C. F. O; PINHO, J. T. **Avaliação econômica de sistemas híbridos fotovoltaico-eólico-diesel para geração de eletricidade na Amazônia**. In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR E III CONFERÊNCIA REGIONAL LATINO-AMERICANA DA ISES, 2008 – Florianópolis. Disponível em: <http://www.ufpa.br/gedae/IICBENS_01.pdf>. Acesso em: 09 jul. 2013.
- BOLAÑOS, J. R. M, **Controlador supervisor inteligente para sistemas híbridos eólico-diesel-bateria de pequeno porte**. 2007. 132p. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-02042008-095246/pt-br.php> >. Acesso em 09 jul. 2013.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional – BEN**. Brasília: MME, 2013. Disponível em: < https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2013_Web.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2013.
- CANEPPELE, F. L.; SERAPHIM, O. J. Aplicação da teoria Fuzzi no controle de sistemas de geração de energias alternativas. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 25, n.3, p.24-41, 2010. Disponível em: < <http://energia.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/64>>. Acesso em 09 jul. 2013.
- CASTRO, R. M. G. **Introdução à energia fotovoltaica**. Maio de 2008 (edição 2.2), 63p. Universidade Técnica de Lisboa.
- CGEE, Energia solar fotovoltaica no Brasil: subsídios para tomada de decisão: Série Documentos Técnicos 02-10, Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010. Disponível em: www.cgee.org.br/atividades/redirect.php?idProduto=6392. Acesso em 03 mar. 2013

CUSTÓDIO, R. S. **Energia eólica para produção de energia elétrica**. Rio de Janeiro: Eletronbás, 2009. 280p.

ENGIN, M. **Sizing and Simulation of PV-Wind Hybrid Power System**. Hindawi Publishing Corporation, International Journal of Photoenergy, Volume 2013, Article ID 217526, 10 pages. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/217526>. Acesso em 05 dez. 2013.

DALMAZ, A.; PASSOS, J. C.; COLLE, S. Energia eólica para geração de eletricidade e a importância da previsão. **Revista ABCM – Engenharia**, Florianópolis, v. XIII, n.1, p.27-32, 2008. Disponível em: < http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/downloads/abcm_engenharia_vol13_num01_ago2008.pdf>. Acesso em 06 out. 2013.

DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION, **Betz' Law: The Ideal Braking of the Wind**. Disponível em: < http://www.windpowerwiki.dk/index.php?title=Betz'_law >. Acesso em: 20 out. 2013.

DUTRA, R. M. **Propostas de políticas específicas para energia eólica no Brasil após a primeira fase do PROINFA**. 2007. 436p. Tese de Doutorado em Ciências – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/tese/200704_dutra_r_m_dr.pdf>. Acesso em 15 mai. 2013.

ESTEVES, F. da S. **Centrais fotovoltaicas em habitações unifamiliares**. 2012, 231p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Universidade do Porto, Portugal, 2012. Disponível em: “<http://paginas.fe.up.pt/~ee06269/wordpress/wp-content/uploads/2012/02/tese-final.pdf>”. Acesso em 14 abr. 2013.

FADIGAS, E. A. F. A. **PEA – 2420 – Energia Solar Fotovoltaica**. Núcleo de Energias Renováveis – Grupo de Energia PEA – EPUSP – PPT de 2011. Disponível em: <<http://disciplinas.stoa.usp.br/mod/resource/view.php?id=30758>> Acesso em 10 jul. 2013.

FALCÃO, V. D. **Fabricação de células solares de CdS/CdTe**. 2005, 120p. Dissertação de Mestrado em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://www.ime.eb.br/arquivos/teses/se4/cm/dissertacaofinal_viviennedenise.pdf>. Acesso em 12 jul. 2013.

FREITAS, S. S. A. **Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos**. 2008. 104p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Industrial – Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2008. Disponível em: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/2098/1/Susana_Freitas_MEI_2008.pdf>. Acesso em 24 jun. 2013.

GABRIEL FILHO, L. R. A. **Análise e modelagem geométrica da potência gerada por um sistema híbrido solar fotovoltaico eólico.** 2007. 156p. Tese de Doutorado em Energia na Agricultura – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2007.

GALDINO, M. A. Análise de custos históricos de sistemas fotovoltaicos no Brasil. In: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR E V CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DA ISES, 2012 – São Paulo. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/artigo/IV-CBENS/Artigo_custos_historicos_IVCBENS.pdf> Acesso em 03 mar. 2013

GARCÍA, F. H. **Análise experimental e simulação de sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos.** 2004. 209p. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/4569/000412920.pdf?sequence=1>>. Acesso em 18 jul. 2013.

GOLDEMBERG, J. *Energia no Brasil.* Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979.

GOMES, N. M. P. **Integração de dados LIDAR com imagens de muito alta resolução espacial para determinação de áreas urbanas com potencial solar.** 2011, 156p. Dissertação de Mestrado em Gestão do Território, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2011. Disponível em: <http://run.unl.pt/bitstream/10362/7179/1/TeseMestrado_Nuno_Gomes_17856.pdf>. Acesso em 09 jul. 2013.

HAUSCHILD, L. **Avaliação de estratégias de operação de Sistemas Híbridos Fotovoltaico-Eólico-Diesel.** 2006, 117p. Dissertação de Mestrado em Energia, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006. Disponível em: <http://lsf.iee.usp.br/lsf/pdf/mestrado/Mestrado_Luciano_Hauschild.pdf>. Acesso em 09 jul. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (InPE). **Reações de Fusão.** Disponível em: “http://www.plasma.inpe.br/LAP_Portal/LAP_Sitio/Texto/Reacoes_de_Fusao.htm.” Acesso em: 14 abr. 2013.

KELMAN, R. Inserção da energia solar no Brasil. Relatório Final, maio/2012. São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www.cogen.com.br/Solar/Biblioteca_Virtual/Relatorio_Final_GT_COGEN_SOLAR.pdf>. Acesso: 04 mar. 2013

LUIZ, M. A.; **Energia Solar e Preservação do meio ambiente.** São Paulo: Editora LF, 1ª ed. 2013. 255p.

MACÊDO, W. N. **Estudo de sistemas de geração de eletricidade utilizando as energias solar fotovoltaica e eólica.** 2002. 170p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.

MARINHO, M. J. N. Oferta de energia através da complementaridade sazonal hidro-eólica no estado de Pernambuco. In: 11º CONGRESSO MUNDIAL DA ÁGUA, 2012, Porto-Portugal. Disponível em: <http://www.poli.br/index.php?option=com_content&view=article&id=584%3Aartigo&catid=36%3Acatnoticias&Itemid=82>. Acesso em 15 mai. 2013.

MARINHO, M. J. N.; AQUINO, R. R. B. Oferta de energia através da complementaridade sazonal hidro-eólica. **PCH Notícias & SHP NEWS**, Itajubá, v. JAN/FEV/MAR, n.40, p.36-42, 2009. Disponível em: <<http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/artigos/pch-shp-40-pag36a42.pdf>>. Acesso em 15 mai. 2013.

MARTINS, F. R., GUARNIERI, R. A., PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São José dos Campos, v. 30, n. 01, p. 1304/01-13, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v30n1/a05v30n1.pdf>> Acesso em 06 out. 2013.

MELO, G. M. **Um estudo da viabilidade de pequenos aerogeradores na produção de energia elétrica.** 2009, 85p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

MELO, M. S. M. **Energia eólica: aspectos técnicos e econômicos** . 2012. 154p. Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MONTEZANO, B. E. M. **Estratégias para identificação de sítios eólicos promissores usando sistema de informação geográfica e algoritmos evolutivos.** 2012. 215p. Dissertação de Mestrado em Ciências – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/marcelo_melo.pdf>. Acesso em 09 jul. 2013.

MOURA, R. G. **Estudos das radiações solar e terrestre acima e dentro de uma floresta tropical úmida.** 2007, 147p. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007. Disponível em: <<http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/08.15.18.26/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em 10 jul. 2013.

NOGUEIRA, C. E. C. **Dimensionamento de sistemas integrados de energia em ambientes rurais.** 2004, 144p. Tese de Doutorado em Energia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2004. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/88061/208617.pdf?sequence=1>>. Acesso em 15 jun. 2013.

PERES, J. C.; OLIVEIRA, B. F. Modelagem e simulação virtual de pá para aerogerador de pequeno porte. **Design & Tecnologia**, Porto Alegre, v. 1, n. 02, p. 69-76, 2010. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/67704/000764766.pdf?sequence=1>> Acesso em 25 set. 2013.

PINHO, J. T. **Sistemas híbridos: Soluções energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. 396p. Disponível em: “http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Solucoes_Energeticas_para_a_Amazonia_Hibrido.pdf” Acesso em: 05 mai. 2013.

PINTO, M. **Fundamentos de Energia Eólica**. Rio de Janeiro: Copyright, 2013
PIRES, J. C. P, **Estudo de rotor para turbina eólica de eixo horizontal de pequeno porte com aplicação de modelagem e simulação virtual**. 2010. 102p. Dissertação de Mestrado em Design – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RAPOSO, J. L. O. **Manutenção centrada em confiabilidade aplicada a sistemas elétricos: uma proposta para uso de análise de risco no diagrama de decisão**. 2013. 278p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004. Disponível em: <<http://www.ppgee.eng.ufba.br/teses/b08dc9a653c9c09df6071b9758a69fd7.pdf>>. Acesso em 06 out. 2013.

SALAMONI, I. T. **Um programa residencial de telhados solares para o Brasil: diretrizes de políticas públicas para a inserção da geração fotovoltaica conectada à rede elétrica**. 2009. 200p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em: <<http://www.fotovoltaica.ufsc.br/downloads>>. Acesso em 10 mar. 2013.

SANSON, D. M. **Projeto básico de um sistema aerogerador**. 2006. 130p. Projeto de graduação em Engenharia Elétrica – Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006. Disponível em: <http://www2.ele.ufes.br/~projgrad/documentos/PG2006_1/diegomoulinsonson.pdf>. Acesso em 06 out. 2013.

SANTOS, I. P. **Desenvolvimento de ferramenta de apoio à decisão em projetos de integração solar fotovoltaica à arquitetura**. 2013. 278p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: <http://fotovoltaica.ufsc.br/Teses/Tese_IsisPortolanDosSantos.pdf>. Acesso em 20 mai. 2013.

SILVA, E. R. P.; PÉTRIS, G. C.; PEREIRA, L. F. C. A. **Tutorial de Célula Solar**. Niterói, Universidade Federal Fluminense. 2008

SIQUEIRA, J. A. C. **Desempenho de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico de pequeno porte para energização rural**. 2005. 190p. Tese de Doutorado em Agronomia –

Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2005.
Disponível em: < <http://acervodigital.unesp.br/handle/123456789/50849>>. Acesso em 30 mai. 2011.

UNSW, ARC Photovoltaics Centre of Excellence, University of New South Wales, Sydney, Australia. 2010/11, Annual Report, 124p.

VILLALVA, M.G.; GAZOLI, J.R. Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e Aplicações – Sistemas Isolados e Conectados à rede. 1 ed. São Paulo: Érica, 2013

MÉDIAS DIÁRIAS

APÊNDICE A

DIA	Data	Temperatura -T (K)	Pressão - P _{atm} (mmHg)	Velocidade do Vento (ms ⁻¹)	Irradiância Solar (Wm ⁻²)	$\rho = 1,2929 \cdot 273 P_{atm} / 760 T$ (kg.m ⁻³)
1	16/08/13	285,9	763,8	3,38	220,02	1,2408
2	17/08/13	287,7	763,2	2,63	216,50	1,2323
3	18/08/13	288,6	762,7	3,44	219,56	1,2277
4	19/08/13	290,5	761,3	3,21	216,44	1,2174
5	20/08/13	292,5	760,5	3,20	209,34	1,2075
6	22/08/13	295,9	755,2	2,87	181,04	1,1858
7	23/08/13	294,1	755,4	1,78	86,98	1,1929
8	24/08/13	290,2	758,2	2,68	162,70	1,2134
9	25/08/13	284,0	760,2	2,41	84,85	1,2432
10	26/08/13	280,9	761,7	1,68	49,38	1,2593
11	27/08/13	278,3	766,5	2,85	153,40	1,2793
12	29/08/13	288,1	764,0	1,19	226,04	1,2319
13	30/08/13	293,1	760,2	2,36	212,17	1,2050
14	31/08/13	293,9	757,6	3,18	171,94	1,1972
15	10/09/13	291,2	758,3	1,78	249,28	1,2094
16	11/09/13	295,6	760,1	2,20	249,28	1,1946
17	12/09/13	295,7	757,9	2,04	253,97	1,1907
18	13/09/13	296,5	756,6	2,30	248,93	1,1854
19	14/09/13	295,4	757,1	1,86	229,32	1,1906
20	15/09/13	296,0	757,0	1,81	248,46	1,1878
21	16/09/13	289,2	753,6	2,01	18,95	1,2101
22	17/09/13	283,2	758,6	2,65	109,12	1,2442
23	18/09/13	284,1	762,8	3,22	227,46	1,2473
24	19/09/13	290,8	761,3	2,30	227,25	1,2162
25	20/09/13	296,2	753,9	3,52	190,28	1,1824
Média do Período		290,3	759,5	2,50	186,51	1,2157

APÊNDICE B

DIA	Data	PED = $\frac{1}{2}\rho Av^3$ (W)	PEA = $I_E U$ (W)	CP = PEA/PED	PSD = Irrad.*A (Wm ⁻²)	PES = I _s .U (W)	ES = PES/PSD
1	16/08/13	185,22	25,14	0,274	660,06	103,37	0,163
2	17/08/13	96,90	12,15	0,233	649,51	100,40	0,161
3	18/08/13	197,39	37,47	0,337	658,69	102,91	0,160
4	19/08/13	232,80	59,66	0,327	649,31	93,47	0,149
5	20/08/13	181,88	34,50	0,291	628,01	96,77	0,158
6	22/08/13	353,59	68,51	0,166	543,12	64,56	0,127
7	23/08/13	70,01	9,49	0,195	260,93	39,87	0,145
8	24/08/13	115,98	14,96	0,228	488,09	69,87	0,148
9	25/08/13	114,03	17,39	0,192	254,54	35,57	0,138
10	26/08/13	35,85	4,23	0,142	148,15	20,23	0,152
11	27/08/13	143,82	17,77	0,207	460,19	75,10	0,157
12	29/08/13	32,81	4,50	0,139	678,11	87,98	0,130
13	30/08/13	117,00	18,07	0,225	636,50	86,86	0,132
14	31/08/13	179,89	26,86	0,248	515,82	64,37	0,112
15	10/09/13	81,13	0,87	0,000	747,84	72,63	0,050
16	11/09/13	96,38	8,08	0,093	747,85	84,65	0,092
17	12/09/13	80,48	13,99	0,179	761,90	74,79	0,098
18	13/09/13	189,83	12,76	0,073	746,79	88,62	0,116
19	14/09/13	90,83	16,24	0,152	687,95	76,44	0,109
20	15/09/13	106,77	23,75	0,141	745,39	43,40	0,058
21	16/09/13	64,63	7,96	0,134	56,85	8,05	0,133
22	17/09/13	97,68	8,15	0,146	327,37	43,55	0,125
23	18/09/13	236,05	27,20	0,107	682,39	81,95	0,106
24	19/09/13	82,59	8,21	0,197	681,75	82,92	0,116
25	20/09/13	542,02	93,18	0,245	590,44	41,74	0,099
Média do Período		149,02	22,84	0,187	560,30	69,60	0,125

PED – Potência Eólica Disponível

PEA – Potência Elétrica do Aerogerador

CP – Coeficiente de Potência

PES – Potência Elétrica Solar

PSD – Potência Solar Disponível

ES – Eficiência Solar

APÊNDICE C

DIA	Data	ECC (kWh)	EDD (kWh)	ES = EDD/ECC	EBC (kWh)	EBD (kWh)
1	16/08/13	2,94	20,29	0,145	0,43	0,30
2	17/08/13	2,66	17,91	0,149	0,41	0,22
3	18/08/13	3,01	20,55	0,146	0,65	0,31
4	19/08/13	3,30	21,17	0,156	0,49	0,25
5	20/08/13	3,02	19,44	0,155	0,35	0,24
6	22/08/13	2,81	21,52	0,131	0,93	0,54
7	23/08/13	1,30	7,94	0,164	0,04	0,16
8	24/08/13	1,97	14,50	0,136	0,26	0,10
9	25/08/13	1,13	8,85	0,128	0,17	0,01
10	26/08/13	0,55	4,42	0,125	0,19	0,01
11	27/08/13	1,78	14,50	0,123	0,48	0,14
12	29/08/13	2,05	17,06	0,120	0,53	0,48
13	30/08/13	2,56	18,08	0,142	0,34	0,37
14	31/08/13	1,90	16,70	0,114	0,29	0,13
15	10/09/13	1,22	19,90	0,061	0,68	0,29
16	11/09/13	1,97	20,26	0,097	0,53	0,37
17	12/09/13	1,61	20,22	0,080	0,66	0,35
18	13/09/13	2,54	22,48	0,113	0,31	0,43
19	14/09/13	2,16	18,69	0,116	0,51	0,42
20	15/09/13	1,63	20,45	0,080	0,43	0,49
21	16/09/13	0,33	2,92	0,113	0,06	0,04
22	17/09/13	1,18	10,20	0,115	0,07	0,09
23	18/09/13	1,80	22,04	0,082	0,71	0,40
24	19/09/13	2,14	18,34	0,116	0,38	0,36
25	20/09/13	1,86	24,23	0,077	0,87	0,44
Para o Período		$\Sigma= 49,42$	$\Sigma= 422,66$	$\bar{X}= 0,119$	$\Sigma= 10,77$	$\Sigma= 3,13$

ECC – Energia Consumida pela Carga

EDD – Energia Disponível Diária (Solar + Eólica)

ESH – Eficiência do Sistema Híbrido

EBC – Energia da Bateria em Carga

EBD – Energia da Bateria em Descarga