

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

MARLON MOREIRA MIAGUI

**ESTUDO DE UM SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO PARA O CURSO
DE ENGENHARIA DE ENERGIA – FAEN/UGD**

DOURADOS

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

MARLON MOREIRA MIAGUI

**ESTUDO DE UM SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO PARA O
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA – FAEN/UGD**

Trabalho de conclusão de curso de
graduação, apresentado para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
de Energia.

Faculdade de Engenharia
Universidade Federal da Grande
Dourados

Orientador: Prof. Dr. Omar Seye

DOURADOS

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

MARLON MOREIRA MIAGUI

**ESTUDO DE UM SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO PARA O
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA – FAEN/UFGD**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia na Universidade Federal
da Grande Dourados pela comissão formada por:

Orientador: Prof. Dr. Omar Seye
FAEN/UFGD

Prof. Me. Antonio Carlos. Caetano de Souza
FAEN/UFGD

Prof. Me. Ricardo Camparim
FACET/UFGD

Dourados, 25 de Janeiro de 2018

DEDICATÓRIA

Aos Professores da e pesquisadores da FAEN e FACET.

AGRADECIMENTOS

Aos técnicos José Carlos Venturin e Evandro Fernandes de Melo pelo auxílio no levantamento dos equipamentos eólicos e fotovoltaicos do laboratório de engenharia de Energia.

Ao professor Omar Seye pela orientação sobre metodologia científica, energia disponível no meio ambiente, topologia de sistemas de energia e outros tópicos referentes a este trabalho.

*–Mire vuestra merced –
respondió Sancho – que aquellos que allí se parecen
no son gigantes, sino molinos de viento, y lo que en
ellos parecen brazos son las aspas, que, volteadas del
viento, hacen andar la piedra del molino.*

El ingenioso hidalgo Don Quijote de la Mancha - CERVANTES

RESUMO

Este trabalho trata do estudo sobre a geração híbrida eólica-fotovoltaica. Um sistema híbrido é caracterizado por conter duas ou mais fontes de forma que estas possam se complementar durante um período específico, dia, mês ou ano. Os estudos sobre estes sistemas são relevantes no contexto atual por serem pertinentes ao desenvolvimento social e sustentável do Brasil, pois muitas fontes renováveis têm características intermitentes. Neste trabalho foi feito o levantamento de todos os equipamentos do laboratório do curso de Engenharia de Energia essenciais para a construção de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico, assim como a elaboração de tabelas descrevendo os componentes do sistema e suas características. A revisão de literatura para o estudo das variáveis do sistema foi realizada em trabalhos recentes sobre o tema e é utilizada como base para propor a topologia e local para o sistema. A primeira parte dos resultados mostram os níveis de complementaridade para o dia e ano típico. Para o dia típico foi constatado a complementaridade noturna do recurso eólico sobre o solar, porém com alto diferencial por metro quadrado de potência. Para o ano típico constatou-se que existe complementaridade dos recursos a partir do comportamento do recurso eólico, que é constante em comparação ao recurso solar, onde picos e vales são observáveis com grandes diferenciais de potência por metro quadrado. Ainda para o ano típico foram calculados os índices de complementaridade de amplitude e de tempo e energia, confirmando os resultados. Na segunda parte dos resultados é estabelecida a topologia de geradores em paralelo em um barramento de corrente alternada para o sistema, e feita a sua descrição em tabelas contendo os subsistemas. Ao final são feitas as estimativas de geração de energia baseadas nas variáveis de eficiência fotovoltaica dos módulos e curva de potência do aerogerador em função da velocidade do vento, e também é exposto que é possível a instalação do sistema atrás do prédio de laboratórios do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal da Grande Dourados.

Palavras-chave: Energia, sistemas, complementaridade, Dourados.

ABSTRACT

This work deals with the study on wind-photovoltaic hybrid generation. A hybrid system is characterized by containing two or more sources so that they can complement each other during a specific period, day, month or year. The studies on these systems are relevant in the current context because they are pertinent to the social and sustainable development of Brazil, since many renewable sources have intermittent characteristics. In this work, all the equipment of the laboratory of the course of Energy Engineering essential for the construction of a hybrid wind-photovoltaic system, as well as the elaboration of tables describing the components of the system and its characteristics, were made. The literature review for the study of system variables was carried out in recent works on the topic and is used as a basis to propose the topology and location for the system. The first part of the results show the levels of complementarity for the typical day and year. For the typical day was observed the nocturnal complementarity of the wind resource on the solar, but with high differential per square meter of power. For the typical year it was observed that there is complementarity of resources from the behavior of the wind resource, which is constant in comparison to the solar resource, which have observable peaks and valleys and with great power differentials per square meter. Also for the typical year, amplitude and time and energy complementarity indexes were calculated, confirming the results. In the second part of the results the topology of generators in parallel is established in an alternating current bus for the system, and it is described in tables containing the subsystems. At the end, the power generation estimates based on the photovoltaic efficiency variables of the wind turbine modules and power curve are made as a function of the wind speed, and it is also verified that it is possible to install the system behind the laboratory building of the course. Engineering of the Federal University of Grande Dourados.

Key words: Energy, systems, complementarity, Dourados.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Módulos fotovoltaicos.	18
Figura 2 - Aerogerador.....	18
Figura 3 - Tubos e ancora da torre de sustentação do aerogerador.	19
Figura 4 - Peças da torre de sustentação.....	19
Figura 5 - Curva de potência do aerogerador.	21
Figura 6 - Movimento de translação e rotação do planeta Terra.....	23
Figura 7 - Ângulos zenital, altura solar e azimutal do sol.....	24
Figura 8 - Ângulos azimutal, de superfície inclinada e de incidência.....	25
Figura 9 - Estruturas cristalinas.....	26
Figura 10 - Célula fotovoltaica.	27
Figura 11 - Módulo fotovoltaico.	29
Figura 12 - Deslocamento de massas de ar no planeta.	30
Figura 13 - Aerogeradores com eixo horizontal e vertical.....	33
Figura 14 - Componentes de um aerogerador de eixo horizontal.....	34
Figura 15 - Comportamento da radiação no campus II da UFGD.....	39
Figura 16 - Frequência da velocidade dos ventos no campus II da UFGD.....	40
Figura 17 - Direção dos ventos no campus II da UFGD	41
Figura 18 - Velocidade do vento na região de Dourados.....	42
Figura 19 - Gráfico da complementaridade de recursos em um dia típico.	44
Figura 20 - Complementaridade anual.....	46
Figura 21 - Topologia: sistema em paralelo em um barra AC.	48
Figura 22 - Local para instalação do aerogerador e módulos fotovoltaicos.....	53
Figura 23 - Sistema Híbrido da Universidade Federal da Grande Dourados.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ferramental para elaboração do trabalho.....	17
Tabela 2 - Equipamentos no prédio de laboratórios	20
Tabela 3 - Parâmetros técnicos dos módulos fotovoltaicos.	20
Tabela 4 - Parâmetros técnicos do aerogerador.	21
Tabela 5 - Velocidade média mensal.	42
Tabela 6 - Complementaridade de recursos em um dia típico.	44
Tabela 7 - Irradiação no plano inclinado na latitude.	45
Tabela 8 - Energia mensal total disponível eólica e solar no plano inclinado. ..	46
Tabela 9 - Índice de complementaridade.....	47
Tabela 10 - Elementos do aerogerador.....	49
Tabela 11 - Elementos da nacela.	49
Tabela 12 - Elementos da torre.	50
Tabela 13 - Subsistema fotovoltaico.....	50
Tabela 14 - Velocidade do vento para diversas alturas no campus de UFGD. ..	51
Tabela 15 - Energia produzida pelos geradores.	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTE HÍBRIDA.....	13
1.2 JUSTIFICATIVA	14
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	14
1.4 OBJETIVOS.....	15
1.4.1 <i>Objetivos específicos</i>	16
2 MATERIAIS E MÉTODOS	17
2.1 FERRAMENTAS	17
2.2 PROGRAMAS	17
2.3 EQUIPAMENTOS DO CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA.....	18
2.3.1 <i>Parâmetros técnicos</i>	20
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
3.1 RECURSO SOLAR	22
3.2 ENERGIA FOTOVOLTAICA	23
3.2.1 <i>Aproveitamento fotovoltaico</i>	23
3.2.2 <i>Célula fotovoltaica</i>	26
3.3 ENERGIA EÓLICA	29
3.3.1 <i>Potência do vento</i>	29
3.3.2 <i>Aerogeradores</i>	32
3.4 SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA	34
3.4.2 <i>Índice de complementaridade</i>	35
3.4.3 <i>Topologias dos sistemas híbridos</i>	37
3.5 SISTEMAS E INSTALAÇÕES	38
3.6 RADIAÇÃO SOLAR E VELOCIDADE DO VENTO LOCAL.....	39
3.6.1 <i>Radiação incidente na região de Dourados</i>	39
3.6.2 <i>Velocidade e direção do vento na região de Dourados</i>	40
4 MÉTODOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 COMPLEMENTARIDADE E ENERGIA DISPONÍVEL LOCAL	43
4.1.1 <i>Complementaridade horária</i>	43
4.1.2 <i>Complementaridade anual</i>	45

4.2 INSTALAÇÃO E PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	48
4.2.1 Topologia do sistema	48
4.2.3 Estimativa de produção de energia do sistema.....	50
4.2.4 Localização e sombreamento.....	52
5 CONCLUSÃO E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
ANEXO A	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTE HÍBRIDA

Segundo o Ministério de Minas e Energia, MME (2008 b) a energia elétrica é uma das formas de energia mais utilizadas pela sociedade moderna. Porém condições econômicas não favoráveis e isolamento geográfico são fatores que impedem a universalização do acesso a esse precioso bem. O avanço nas pesquisas e desenvolvimento de tecnologias de conversão e transmissão de energia é objetivo de programas governamentais que visam o desenvolvimento social do país, principalmente as alternativas baseadas em fontes renováveis.

Moreira Junior (2015) afirma que os sistemas onde mais de uma fonte primária de energia podem ser aproveitadas e combinadas são denominados sistemas híbridos de conversão de energia. MME (2008) complementa que os sistemas híbridos são tipicamente usados como suprimento de energia elétrica para locais distantes da rede de energia convencional. Tipicamente são usados motogeradores diesel em pequenas redes para atender demandas básicas de energia elétrica em comunidades afastadas e isoladas ou pequenas aplicações, porém os custos para gerar eletricidade com combustível fóssil diesel, vem aumentando a cada dia. Com o desenvolvimento de tecnologias para conversão de fontes renováveis do tipo biomassa, eólica, solar fotovoltaica e mini centrais hidrelétricas, a geração híbrida como complementaridade de recursos é cada dia mais estudada como alternativa para geração de eletricidade local.

A Empresa de Pesquisa Energética, EPE (2017), comenta como exemplo alguns leilões de compra de energia especificamente por fontes híbridas eólico-fotovoltaica presentes no nordeste brasileiro, fazendo com que a rede de transmissão não fique ociosa quando uma das fontes não está disponível.

Segundo MME (2008), nas últimas décadas, inúmeros sistemas híbridos têm sido instalados no Brasil e no mundo, porém ainda não existe uma base de dados consolidada sobre o tema. No Brasil o primeiro sistema híbrido foi o de Fernando de Noronha, em Pernambuco, implantado em 1986 com uma potência eólica de 75kW e

diesel-elétrica de 50kW. Em 2002 esse sistema foi ampliado para 225kW na potência diesel-elétrica.

1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo o Projeto Pedagógico do curso de Engenharia de Energia, FAEN (2017), a disciplina de energia solar prevê em sua ementa os conceitos de tecnologias de conversão de energia radiante do sol que chega a nosso planeta. Essa energia é abordada em três formas básicas: solar fotovoltaica, solar térmica e eólica. A disciplina “Novas Tecnologias de Conversão de Energia” também estuda tópicos de geração de energia híbrida de forma mais geral, observando as inter-relações de fonte de energia no ambiente. Visando a aplicação de resultados na prática de ensino, pesquisa e extensão, o curso de engenharia de energia adquiriu equipamentos para instalação de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico para geração de eletricidade.

Para elaboração da topologia de uma instalação que visa a geração energética de eletricidade, é necessário o conhecimento dos fundamentos básicos de estruturação de sistemas de energia, assim como tecnologias de conversão de energia fotovoltaica, eólica e suas respectivas fontes. Outro parâmetro a ser estudado é sobre a complementaridade dos recursos naturais existentes para geração de eletricidade e o local para instalação, considerando as variáveis de segurança e proximidade ao prédio de laboratórios do curso de Engenharia de Energia.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso é a elaboração de um estudo para a futura instalação de um sistema de geração híbrida eólica -fotovoltaica, para uso no ensino, pesquisa e extensão da Universidade Federal da Grande Dourados.

Na introdução, é discutida a importância da geração híbrida e suas características e também são descritas a justificativa para a realização do trabalho, objetivos gerais e específicos. Posteriormente é feita a descrição dos materiais e métodos utilizados para a elaboração do trabalho.

Na revisão bibliográfica, é apresentado o estudo necessário para a topologia de instalação do gerador híbrido do laboratório de Engenharia de Energia. A primeira parte desta revisão fundamenta a energia solar e sua relação com planeta Terra, na segunda parte apresentam-se as bases teóricas da conversão de energia fotovoltaica e eólica. A terceira parte apresenta-se o estado da arte da geração de energia híbrida, abordando aspectos de complementaridade de fontes, dados sobre radiação e velocidade do vento local, índice de complementaridade de fontes híbridas e topologia de sistemas híbridos. Na quarta parte é realizado um estudo sobre sistemas na engenharia e documentação de máquinas e equipamentos para uma instalação geradora de energia.

Nos resultados e discussão são calculados os índices de complementaridades, estimativas de velocidades a diversas alturas, estimativas de produção de energia e a listagem de componentes e subcomponentes do sistema em tabelas. A topologia do sistema é definida também neste tópico é discutida a proposta de instalação sugerida.

Na conclusão são avaliados os resultados obtidos considerando a finalidade do trabalho de conclusão de curso.

1.4 OBJETIVOS

O presente trabalho tem a finalidade de realizar o estudo na forma de revisão de literatura em livros, publicações científicas e documentais sobre as variáveis ambientais para produção de energia elétrica em um sistema híbrido eólico fotovoltaico.

A sugestão de variáveis importantes para instalação de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico será apresentada nos resultados do trabalho, assim como a

pesquisa de campo catalogando os equipamentos já adquiridos para a instalação do sistema.

1.4.1 Objetivos específicos

-Elaborar a revisão de literatura, estudando assim as variáveis necessárias para instalação de um sistema híbrido eólico fotovoltaico;

-Elaborar tabelas com os equipamentos eólico e fotovoltaico já adquirido pelo curso para o sistema híbrido, sistematizando os sistemas e subsistemas;

-Pesquisar características ambientais e nível de complementaridade energética durante o dia típico do local onde será instalado o sistema híbrido do curso de Engenharia de Energia;

-Pesquisar características ambientais e nível de complementaridade energética para o ano típico na região de Dourados;

-Pesquisar sobre topologia de sistema de geração híbrida de eólica-fotovoltaica;

-Apresentar resultados calculados em forma de tabelas e gráficos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho tem como base os equipamentos existentes no prédio de laboratórios de Engenharia de Energia e sua aplicação no ensino, pesquisa e extensão. Para isso será pesquisada a metodologia de engenharia em sua documentação.

2.1 FERRAMENTAS

Na tabela 1 é organizada a lista de equipamentos selecionados para a realização do trabalho:

Tabela 1 – Ferramental para elaboração do trabalho.

Nome	Função	Erro
Trena Wirvin 5m	Medição	$\pm 0,5\text{mm}$
Computador portátil Acer Aspire E15 Start	Redação e cálculos	----
Bússola Náutica	Norte magnético	$\pm 1^\circ$
Smartphone Samsung J3	Fotografia e anotações	----
Caderno capa dura brochura 96 folhas	Anotações	----
Lápis, borracha, marcadores de texto e caneta	Anotações	----

FONTE: Elaborado pelo AUTOR (2017).

2.2 PROGRAMAS

Para elaboração da lista de equipamentos do prédio de laboratórios de Engenharia de Energia, redação, desenhos e planilha de cálculo de gráficos será usado o pacote de aplicações Microsoft Office 2010, versão estudante.

Na elaboração da representação do sistema para o local será usado o SketchUp 2018, em sua versão avaliação.

2.3 EQUIPAMENTOS DO CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

Os equipamentos do sistema híbrido do curso de Engenharia de Energia, que foram vistoriados junto aos técnicos José Carlos Venturin e Evandro Fernandes de Melo. Sendo dois módulos fotovoltaicos e um aerogerador, que estão guardados no fundo do Laboratório RAVA, conforme a Figura 1 e Figura 2.

Figura 1 – Módulos fotovoltaicos.



FONTE: O Autor (2017).

Figura 2 – Aerogerador.



FONTE: O Autor (2017).

Os elementos da torre de sustentação do aerogerador, mostrados na Figura 3 e na Figura 4, foram conferidos de acordo com a relação de peças de seu respectivo manual.

Figura 3 – Tubos e ancora da torre de sustentação do aerogerador.



FONTE: O Autor (2017).

Figura 4 – Peças da torre de sustentação.



FONTE: O Autor (2017).

Ainda nessa vistoria foram anotados os dados de placa do aerogerador e dos módulos fotovoltaicos. A Tabela 2 contém a relação dos equipamentos do curso de Engenharia de Energia.

Tabela 2 - Equipamentos no prédio de laboratórios.

Descrição	País de origem	Fabricante	Unidade	Designação	Quantidade
Módulo Fotovoltaico	Coréia do Sul	Woori	Peça	FV1	2
Aerogerador	China	Hummer	Conjunto	EOL1	1

FONTE: O Autor (2017).

2.3.1 Parâmetros técnicos

Os parâmetros técnicos dos módulos fotovoltaicos foram avaliados com base nos dados de placa dos módulos, pois se constatou que o fabricante não existe mais, e que somente existe um documento no site de homologação da Coréia do Sul sobre os módulos fotovoltaicos. A Tabela 3 contém os dados de placa dos módulos fotovoltaicos vistos no laboratório.

Tabela 3 - Parâmetros técnicos dos módulos fotovoltaicos.

Potência Máxima (W)	250
Tensão em Potência Máxima (VDC)	30,5
Corrente em Potência Máxima (A)	8,2
Tensão em Circuito Aberto (VDC)	37,5
Corrente em Curto Circuito	8,7
Eficiência do Modulo (%)	15,41
Comprimento (mm)	1640
Largura (mm)	989

FONTE: O Autor (2017)

Para o aerogerador foi consultado o manual fornecido pelo fabricante, que se encontra no acervo dos técnicos de laboratório do prédio de laboratórios de Engenharia de Energia da Universidade Federal da Grande Dourados. Também foi consultada a página do fabricante na internet para acrescentar informações sobre o produto, a Tabela 4 contém os parâmetros técnicos do aerogerador.

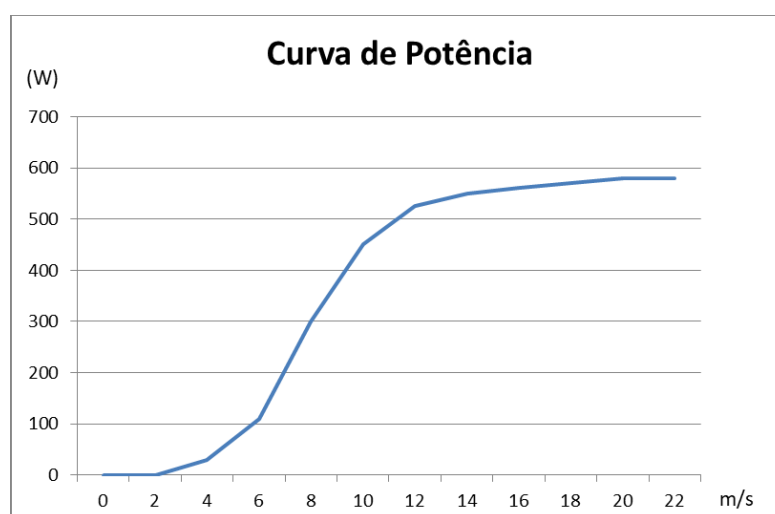
Tabela 4 - Parâmetros técnicos do Aerogerador.

Altura de Captação (m)	6
Potência Nominal (W)	500
Potência Máxima de Saída (W)	1000
Tensão de Carga (VDC)	24
Número de Pás	3
Diâmetro das Pás (m)	2,7
Material das Pás	Fibra de vidro e plástico reforçado
Velocidade Inicial de Trabalho (m/s)	3
Velocidade Nominal de Trabalho (m/s)	7

FONTE: Elaborado pelo Autor (2017).

De acordo com o manual do aerogerador, a curva de geração de energia elétrica para velocidades de até 22 m/s do aerogerador é de aproximadamente 680W, conforme mostra a Figura 5.

Figura 5 – Curva de potência do aerogerador.



FONTE: Elaborado pelo Autor (2017).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

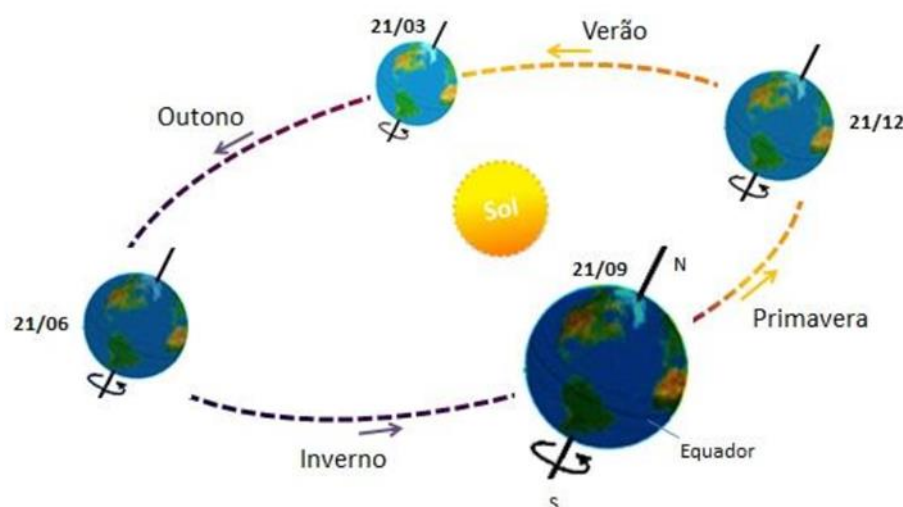
3.1 RECURSO SOLAR

Segundo Lopes (2012b), as principais formas de energia encontradas no planeta estão na forma hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis, oceânica e radiação solar, sendo somente esta última uma forma direta de energia proveniente do sol e as restantes são formas indiretas.

De acordo com o caderno do curso de Introdução à Astronomia e Astrofísica do INPE (2003) o sol emite uma energia da ordem de $3,9 \times 10^{26}W$, proveniente de reações nucleares no seu interior. Segundo o CEPEL (2014) o Sol é composto de gases incandescentes a altas temperaturas devido à fusão nuclear de hidrogênio e hélio dentro de seu núcleo, que ocupa 15% do volume e 40% de sua massa. A energia do núcleo é transferida para a superfície da estrela por processos convectivos e radioativos. O INPE (2003) complementa que a energia proveniente destas reações chega à superfície desta estrela depois de 10^7 anos, em média e irradia ondas eletromagnéticas a uma temperatura de 5.800K, a radiação emitida pela superfície do Sol viaja até a Terra por uma unidade astronômica (UA=149 597 870 700 m), propagando-se no vácuo a velocidade da luz.

Cometta (2004) observa que a Terra tem uma trajetória elíptica, com excentricidade de 0,017 na translação ao redor do Sol. Durante a trajetória na órbita do sol a terra faz a rotação em torno de seu próprio eixo, que é traçado entre o polo sul e norte terrestre com uma inclinação de $23,5^\circ$ em relação ao eixo orbital. E segundo Villalva (2012) a translação em torno do Sol e inclinação no decorrer da trajetória ocasionam as estações do ano nas localizações geográficas do planeta, como mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Movimento de translação e rotação do planeta Terra.



FONTE: CEPEL (2014).

Villalva (2012) estabelece que, em média, a radiação solar incidente no planeta gira em torno de $1,367 \text{ kW/m}^2$, usualmente esse valor é chamado de recurso solar. Palz (2002) completa que a distribuição deste recurso não é uniforme no globo terrestre, sendo maior na região da linha do Equador, além de que o mesmo sofre perdas até a chegada à superfície. Dependendo de fatores como localização geográfica, posição no movimento de translação e rotação, o recurso solar pode variar, somando-se ainda os fatores atmosféricos, que podem modificar o padrão esperado de radiação solar local.

3.2 ENERGIA FOTOVOLTAICA

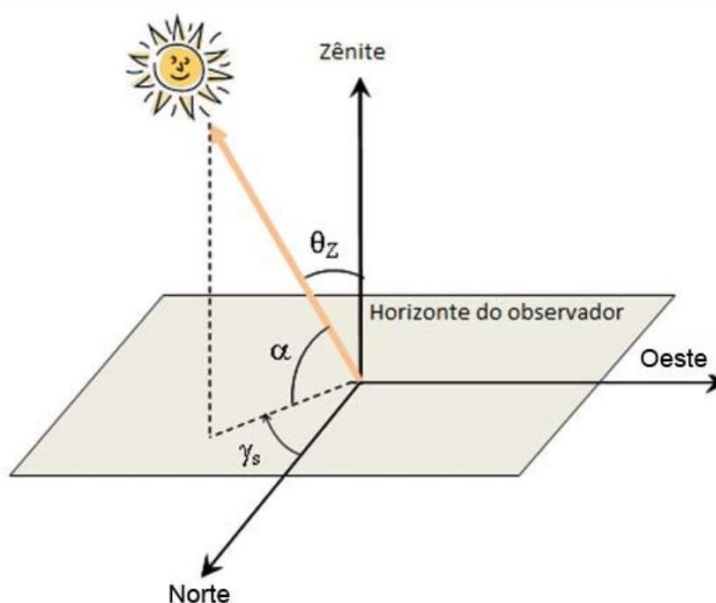
3.2.1 Aproveitamento fotovoltaico

Segundo o programa europeu ALTENER (2004), que visa promover as fontes de energia renováveis, a irradiação do Sol é absorvida pela atmosfera do planeta terra e decai de 1367 W/m^2 para 1000 W/m^2 ao nível do mar, e varia de acordo com a latitude. Além da atmosfera, partículas de pó e poluição também interferem na perda e energia da irradiação solar no planeta. A radiação que atinge a superfície terrestre

tem composição direta e difusa. A direta é recebida diretamente do Sol e produz sombra, por outro lado a radiação difusa não segue um caminho específico. A reflexão da radiação recebida na superfície do planeta é denominada de albedo, quanto maior a reflexibilidade local maior será a contribuição do albedo com a radiação difusa.

Para o correto aproveitamento fotovoltaico, o “Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos”, (CEPEL 2014), apresenta as relações geométricas essenciais sobre a geometria celeste aparente entre os raios solares e o observador no plano terrestre. Estas relações são usadas para calcular os pontos máximos de mínimos de incidência solar durante o ano típico e dimensionar o sistema. Outra aplicação para a geometria celestial é na análise de sombreamento caso exista obstáculos próximos ao sistema de conversão fotovoltaico. A Figura 7 e a Figura 8 mostram os principais ângulos usados.

Figura 7 - Ângulos zenital, de altura solar e azimutal do sol.



FONTE: CEPEL (2014)

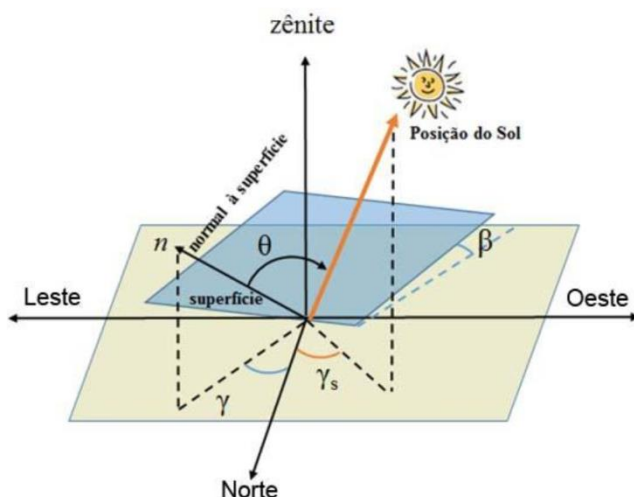
onde:

θ_z é ângulo zenital, formado entre a vertical local e os raios do sol;

α é ângulo de altura solar, formado pelos raios do sol e sua projeção sobre o plano horizontal;

γ_s é o ângulo azimutal do Sol, formado pela projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção norte-sul a partir do horizonte do observador, sendo negativo quando o sentido é oeste e positivo para o sentido leste;

Figura 8 - Ângulos azimutal, de superfície inclinada e de incidência.



FONTE: CEPEL (2014).

onde:

γ é o ângulo azimutal de superfície, projeção entre a normal da superfície horizontal e a direção norte-sul;

β é o ângulo de superfície inclinada de captação, formado entre o plano horizontal e a superfície de captação;

θ é o ângulo de incidência, formado pela normal da superfície de captação e os raios solares.

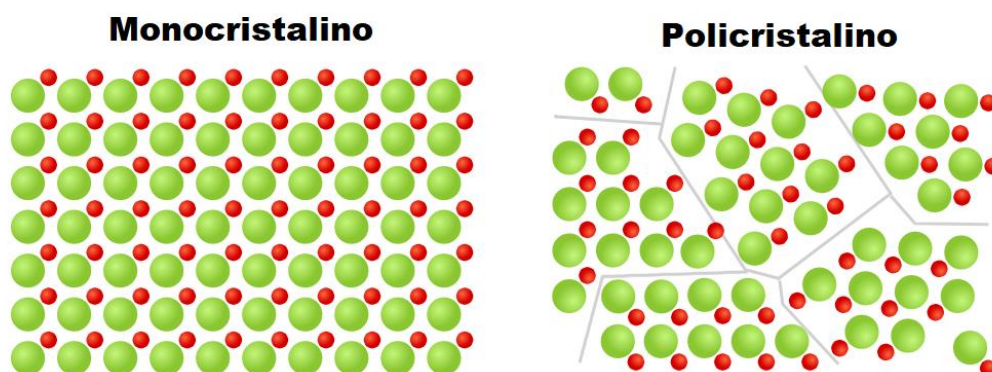
O movimento aparente do Sol para o observador no hemisfério sul do planeta pode ser descrito como nascente ao leste e poente ao oeste, com declinação máxima de $23,5^\circ$ no pico do inverno. E para captação máxima da radiação, é recomendada por vários autores a inclinação igual à latitude local.

3.2.2 Célula fotovoltaica

Segundo Lopez (2012 b) o efeito fotovoltaico consiste na conversão direta de luz em eletricidade. O primeiro relato sobre o fenômeno foi do cientista Edmond Becquerel em 1839, quando o mesmo iluminou uma solução ácida e constatou uma diferença de potencial entre eletrodos imersos em uma solução. O primeiro desenvolvimento na tecnologia para aproveitamento fotovoltaico foi nos setores de telecomunicações, passando depois pelo período de aperfeiçoamento para aplicações espaciais e finalmente chegando aos primeiros estudos de aplicações comerciais na crise energética de 1973.

Segundo Villalva (2012), o silício é um semimetal com quatro elétrons de valência derivado do mineral quartzo. Dentre os produtores mundiais de quartzo, o Brasil é um dos principais, porém não o purifica para obtenção de silício. Dependendo da qualidade do mineral o produto final terá maior ou menor pureza, esta pureza está diretamente relacionada com a eficiência da célula de conversão fotovoltaica. As células fotovoltaicas de silício mais puro têm estruturas cristalinas única com organização molecular homogênea e maior eficiência, já as de silício multicristalino, ou policristalino, os cristais são aglomerados de forma que o tamanho e orientações não são homogêneos. A Figura 9 mostra a diferença estrutural entre os arranjos.

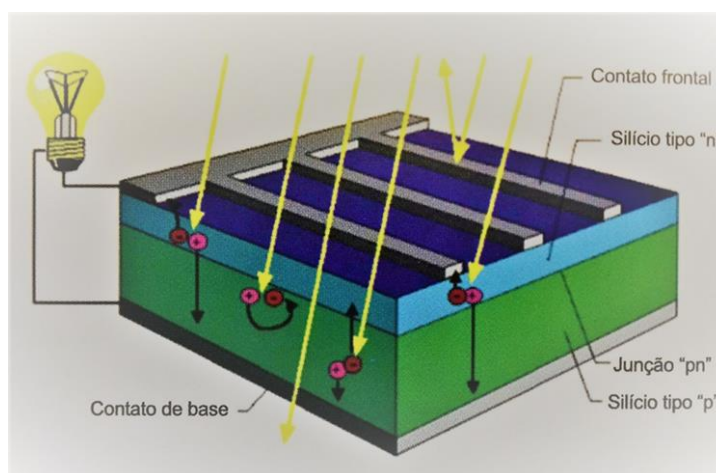
Figura 9 - Estruturas cristalinas.



FONTE: Adaptado de Wegener (2018).

De acordo com MME (2008), a adição de determinados átomos de outras substâncias nas placas de silício na ordem de uma parte para dez milhões alteram a estrutura da banda de valência, modificando assim propriedades elétricas do material. Com esse processo de dopagem de material semiconductor é possível à fabricação de dispositivo tipo “N” e Tipo “P”. A dopagem do tipo N introduz elementos com cinco elétrons de valência, enquanto nos de tipo P são introduzidos elementos com três elétrons de valência, fazendo com que um material tenha mais elétrons que outros. Porém vale observar que a carga de cada material ainda é neutra, já que o número de prótons e elétrons são os mesmos em cada dispositivo. Lopez (2012b) acrescenta que a união de duas placas com dopagens P e N recebe o nome de junção semicondutora, a energia luminosa incidente sobre uma junção tem a capacidade de movimentar elétrons através da mesma, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Célula fotovoltaica.



FONTE: Lopez (2012).

De acordo com MME (2008) em 1954 foram introduzidas as primeiras células comerciais produzidas por silício, com eficiência de 6% e atualmente segundo o INMETRO (2017) existe no mercado células com eficiência máxima de 20,1%. MME (2008) propõe a equação 3.1 para definir quão efetiva é o processo de conversão de energia solar em energia elétrica.

$$\eta = \frac{P_{MP}}{AG} \quad (3.1)$$

onde:

η é eficiência de conversão fotovoltaica;

P_{MP} é a potência elétrica da célula;

A é a área da célula;

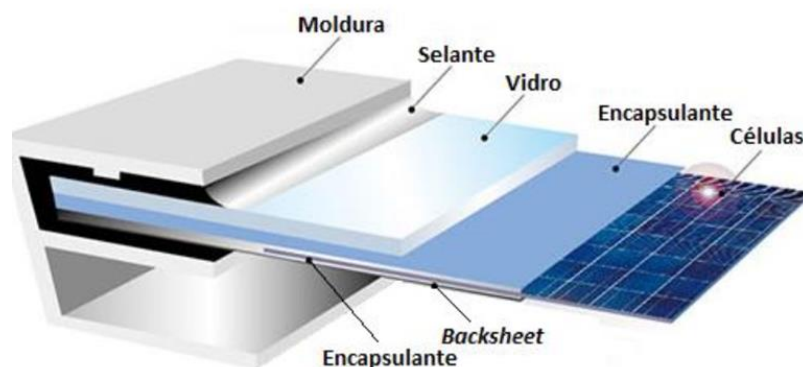
G é a radiação solar incidente.

3.2.3 Módulos Fotovoltaicos

De acordo com MME (2008), a tensão e corrente de saída de uma célula fotovoltaica é baixa. Tipicamente a tensão em uma célula fotovoltaica é de 0,6V e a corrente de 3A, assim deve-se agrupar várias células para se alcançar tensões e correntes úteis na prática. Para elevar a tensão de um conjunto de células é necessária uma conexão em série, e para elevar a corrente é necessária uma conexão em paralelo.

EPE (2016) complementa que uma célula fotovoltaica de silício é rígida e quebradiça, por isso necessita de encapsulamento com diversos componentes para formar o módulo fotovoltaico de uso comercial. O primeiro componente de um módulo é a moldura, geralmente de alumínio, esta é montada para estruturar e fixar o módulo. O segundo elemento é uma camada de vidro que protege as células e condutores do ambiente e permite entrada de luz para conversão de energia. Um encapsulante envolve as células garantindo assim uma melhor condução elétrica e protegendo as células da umidade. Por fim o módulo é adesivado com um selante que une as camadas internas com a moldura, protege contra vibrações e ainda impede a entrada de fluidos, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Módulo fotovoltaico.



FONTE: EPE (2016).

3.3 ENERGIA EÓLICA

3.3.1 Potência do vento

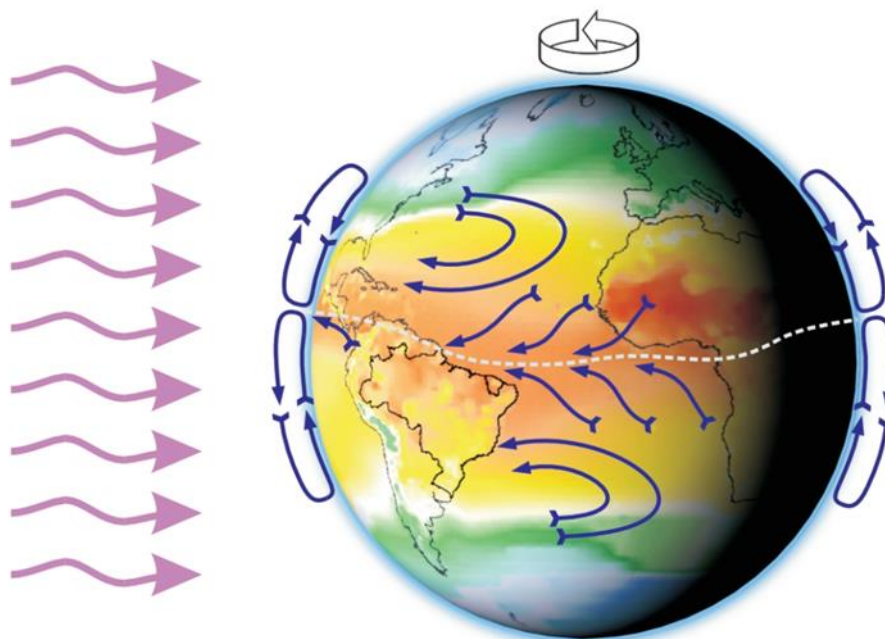
Segundo Lopez (2012) a incidência da radiação solar no planeta gera uma diferença de temperatura ocasionando ventos. Pinto (2013) complementa que somente cerca de 3% a 5% da radiação incidente é convertida em energia cinética do ar, ocasionando os ventos.

O aquecimento proveniente radiação solar incidente no planeta é mais intenso nas regiões mais próximas ao Equador aos pólos. Segundo o MME (2008), o ar aquecido na região do Equador tem menor densidade e sobe para a atmosfera, fazendo com que seja criada uma corrente de ar frio proveniente dos pólos para preencher o volume deslocado.

Custódio (2009) complementa que a rotação da Terra é outro fator que influencia nos ventos com circulação global. O momento angular das moléculas dos gases que o ar é composto é alterado pela influência da rotação tangencial do planeta, esse fenômeno é denominado de força de Coriolis, ou efeito Coriolis.

Considerando que a terra gira em torno de seu eixo, a velocidade angular será igual para todas as localizações geográficas, porém, a velocidade tangencial muda para as diversas localizações. No Equador essa velocidade chega a 1.600km/h e decai em direção aos pólos, como mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Deslocamento de massas de ar no planeta.



FONTE: CEPEL (2011).

Segundo Fadigas (2011), para o estudo do recurso eólico a escala de variações temporais do vento pode ser dividida em interanuais, sazonais, diárias e de curta duração. As variações interanuais são influenciadas pelos fenômenos periódicos de gradientes térmicos terra-mar e terra-terra regionais. As variações sazonais são fenômenos com periodicidade anual de aquecimento de regiões do planeta com relação às estações, as variações diárias de vento são ocasionadas por aquecimento desigual em uma região ao longo do dia. A variação de velocidade dos ventos são rajadas de curta duração associadas a turbulências, estas devem ser observadas para projeto de implantação de aerogeradores e construção de parques eólicos.

Segundo MME (2008) a velocidade do vento, além de fatores como circulação global e variação de velocidade em relação à latitude também sofrem com obstáculos naturais e artificiais. O vento, quando encontra um obstáculo sofre atrito

e perde energia cinética, observa-se que a velocidade do vento é nula na superfície do solo e aumenta progressivamente à medida que a altura aumenta. Este fenômeno é denominado perfil vertical do vento, tipicamente é usada uma função logarítmica ou exponencial para expressar a variação de velocidade do vento em função da altura e da rugosidade do terreno.

Lopez (2012 a) indica o uso da equação 3.2 para determinar a velocidade do vento para uma altura qualquer a partir de uma altura de medição típica, geralmente a 10m. O coeficiente “ α ” indicado na equação varia de 0,1 (solo suave) até 0,4 (Cidades).

$$\frac{V}{V_o} = \left(\frac{H}{H_o}\right)^\alpha \quad (3.2)$$

onde:

H_o é a altura de referência;

H é a altura a ser determinada;

α é o coeficiente de rugosidade;

V_o é a velocidade do vento na altura de referência;

V é a velocidade na altura determinada.

A principal característica do vento a ser analisada quando se visa ao aproveitamento eólico para geração de eletricidade é a velocidade. A potência contida no vento é proporcional ao cubo de sua velocidade, tornando evidente a importância deste parâmetro em projetos de sistemas eólicos. Isto faz com que estudos detalhados das características do vento sejam fundamentais para a elaboração de projetos confiáveis e precisos de sistemas eólicos (MME, 2008).

Segundo Pinto (2013), a potência eólica está diretamente relacionada com a energia cinética do vento. Para calcular esta potência, variáveis como área de secção transversal, densidade do ar e coeficiente de desempenho são fundamentais, como mostrado na equação 3.3. O coeficiente de desempenho tem o limite teórico limitado pela lei de *Lanchester-Betz-Joukowsky*, que estima o potencial máximo a ser extraído pelo rotor em 59%.

$$P_{ext} = \left(\frac{1}{2}\right) C_p \rho A v^3 \quad (3.3)$$

onde:

P_{ext} é a potência máxima extraída;

C_p é o limite de Betz, com valor máximo de 0,593;

ρ é a densidade do ar;

v é a velocidade do vento.

3.3.2 Aero geradores

Segundo Tomasquin (2014), para que a energia cinética das partículas do vento possa ser convertida em potência de eixo mecânica é necessário um aerogerador com tecnologia de conversão confiável e que resista a intempéries do ambiente onde se é instalado. Pinto (2013) complementa que os aerogerador dividem-se em dois modos de aproveitamento distintos, configuração de rotor com eixo vertical e horizontal.

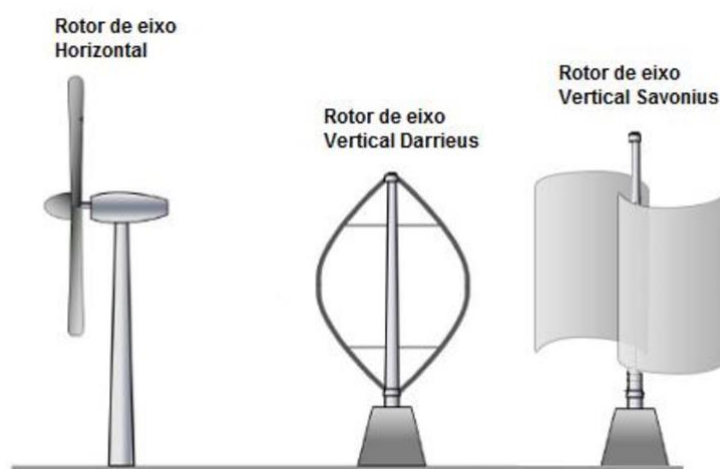
Oliveira (2012) considera que as principais forças que agem em uma turbina eólica são as de arrasto e sustentação nas pás. Descritas pela teoria dos aerofólios, os coeficientes destas forças são características do ângulo de ataque, perfil das pás e rugosidade. Ainda existem forças internas e de equilíbrio na estrutura de sustentação do aerogerador, portanto o projeto de estabilidade mecânica de uma aerogerador deve ser minuciosamente analisado.

Sobre os aerogeradores de eixo horizontais Custódio (2009) considera que existe a necessidade de manterem-se perpendiculares à direção do vento, necessitando assim de um sistema de controle de direção. Porém o aproveitamento de energia nessas máquinas é maior e mais difundido, atualmente a maioria do aerogeradores presentes no mercado são deste tipo.

Com base nos estudos da EPE (2016) os aerogeradores de eixo vertical não necessitam de mecanismos para acompanhar a direção do vento e podem tanto

trabalhar com forças de arrasto, que transfere quantidade de movimento, ou com forças de sustentação, proveniente da diferença de pressão no perfil aerodinâmico da pá. Os mais conhecidos são os rotores Darrieus e Savonius, essas máquinas têm maior tolerância a turbulências do vento, assim a configuração vertical adequa-se a pequenas aplicações com alturas entre dez e vinte metros. Os tipos de rotores são exemplificados na Figura 13.

Figura 13 – Aero geradores com eixo horizontal e vertical.



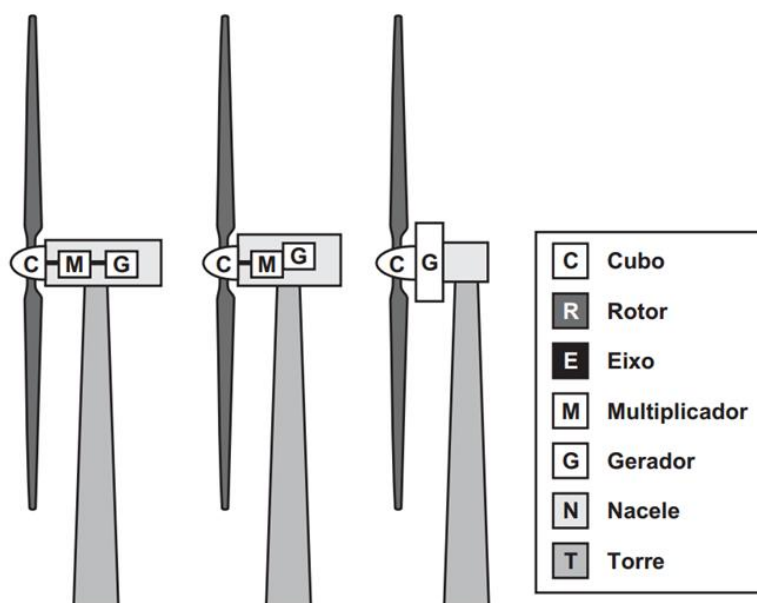
FONTE: EPE (2016)

CEPEL (2011) complementa que a configuração de aerogeradores de eixo horizontal é diferenciada pela caixa multiplicadora e pelo tipo de gerador elétrico usado. Segundo Custódio (2009) o multiplicador consiste em uma caixa de transmissão mecânica que adapta a baixa velocidade de rotação da turbina à alta velocidade de rotação exigida pelo gerador, componentes como mancais, eixos, engrenagens de transmissão e acoplamentos constituem um multiplicador típico.

Fadigas (2011) observa que os geradores elétricos usados em aerogeradores podem ser de ímãs permanentes ou usarem enrolamento para gerar um campo eletromagnético. Um gerador de ímãs permanentes pode ser usado em turbinas de grande ou pequeno porte e contam com a vantagem de operar de forma assíncrona, podendo assim operar em diferentes regimes de potencia. Seus ímãs são fixados em um rotor cilíndrico ligado ao eixo de rotação e a armadura estacionária, que retira a potência diretamente, sem a necessidade de escovas, comutador ou anéis

deslizantes. Outro tipo de configuração para o gerador é com rotor bobinado, uma corrente contínua percorre as bobinas do rotor e gera os campos magnéticos para geração de eletricidade. A Figura 14 mostra as principais configurações de aerogeradores de eixo horizontal.

Figura 14 - Componentes de um aerogerador de eixo horizontal.



FONTE: CRESESB (2008).

García (2004) define que os pequenos aerogeradores dependem da velocidade do vento, que pode variar, para gerar a frequência e a tensão alternada. Portanto é comum o emprego de retificadores para conversão da corrente alternada em contínua, e posteriormente um inversor para gerar uma frequência e tensão adequada a carga e ao sistema híbrido quando for o caso.

3.4 SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA

3.4.1 Complementaridade de recursos

Segundo Ortiz (2014) a complementaridade energética explora a forma como a combinação de duas ou mais fontes de energia próximas ou dispersas, contribuem para geração de energia de forma intermitente, observando a sazonalidade de cada

uma. O estudo de complementaridade energética consiste na investigação de quanto, onde e em que período acontece a sazonalidade para cada recurso, observando correlações de acordo com o período de interesse.

Para Pianezzola (2006), o conhecimento da complementaridade auxilia na identificação de potenciais locais para utilização de sistemas de geração híbridos, observando que a sazonalidade pode ocasionar a inviabilidade técnico-econômica na transmissão da energia.

Gabriel Filho (2007) propõe em sua tese de doutorado que é possível elaborar um modelo matemático do sistema híbrido aplicando técnicas de geometria, álgebra linear e cálculo de várias variáveis, tendo como resultado um gráfico com curvas em duas ou dimensões para visualização do comportamento das fontes de energia no decorrer de um período em estudo.

3.4.2 Índice de complementaridade

Pianezzola (2006) adaptou o estudo de complementaridade solar-hídrica feito por Beluco (2003) para realizar os mapas de complementaridade solar e eólico do estado do Rio Grande do Sul. A determinação do índice de complementaridade de amplitude, equações 3.4 a 3.6, avalia a relação de valores máximos e mínimos de duas fontes de energia, quanto mais o índice adimensional se aproximar de 1 mais os valores de pico de vale das funções se aproximaram e se complementam. Observa-se ainda que as unidades para as fórmulas possam assumir diversas dimensões como, por exemplo, Joules, Watt por metro quadrado, etc.

$$i_a = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{(\delta_e - \delta_s)^2}{(1 - \delta_s)^2} \right] \{ 1 - \tanh[2^8(\delta_e - \delta_s)] \} + \frac{1}{2} \left[\frac{(1 - \delta_s)^2}{(1 - \delta_s)^2 + (\delta_e - \delta_s)^2} \right] \{ 1 + \tanh[(2^8)(\delta_e - \delta_s)] \} \quad (3.4)$$

$$\delta_e = 1 + \frac{E_{em\acute{a}x} - E_{em\grave{i}n}}{E_{em\acute{a}x}} \quad (3.5)$$

$$\delta_s = 1 + \frac{E_{sm\acute{a}x} - E_{sm\acute{i}n}}{E_{sm\acute{a}x}} \quad (3.6)$$

onde:

i_a é o índice de complementaridade de amplitude;

$E_{em\acute{a}x}$ é o valor de pico do período eólico;

$E_{em\acute{i}n}$ é o valor de vale do período eólico;

$E_{sm\acute{a}x}$ é o valor de pico do período solar;

$E_{sm\acute{i}n}$ é o valor de vale de período solar.

O índice de complementaridade de tempo e energia, equações 3.7 a 3.9, propõe a relação dos períodos em que as fontes se complementam em uma dada região de estudo, valores menores e iguais a zero indicam que não existe complementaridade entre os recursos para o local.

$$i_{et} = \frac{E_{s1} - E_{s2}}{E_{sA}} \cdot \frac{E_{e2} - E_{e1}}{2E_{eA}} \quad (3.7)$$

$$E_e = \frac{E_{em\acute{a}x} - E_{em\acute{i}n}}{E_{em\acute{e}d}} \quad (3.8)$$

$$E_s = \frac{E_{sm\acute{a}x} - E_{sm\acute{i}n}}{E_{sm\acute{e}d}} \quad (3.9)$$

onde:

i_{et} é o índice que determina a complementaridade do sistema em relação ao tempo;

E_{s1} é a quantidade de energia solar para um primeiro período;

E_{s2} é a quantidade de energia solar para um segundo período;

E_{sA} é a quantidade de energia solar para a soma dos períodos;

E_{e1} é a quantidade de energia eólica para um primeiro período;

E_{e2} é a quantidade de energia eólica para um segundo período;

E_{eA} é a quantidade de energia solar para a soma dos períodos.

3.4.3 Topologias dos sistemas híbridos

O estudo de Souza (2014) baseia-se nos índices de complementaridade usando dados meteorológicos como irradiação e velocidade do vento para estabelecer a topologia do sistema.

Gracia (2004) sugere que as topologias para sistemas híbridos podem ser das mais variadas, dependendo do recurso local e da aplicação final da eletricidade gerada. A utilização de sistemas com várias fontes de energia requer a otimização do uso e gerenciamento delas, outro fator a ser observado é a qualidade exigida da energia elétrica final.

Segundo MME (2008) os sistemas de geração híbrida são classificados tipicamente por três grupos distintos quanto ao acoplamento, são eles: geradores em paralelo no barramento de corrente alternada (CA), geradores em paralelo no barramento de corrente contínua (CC) ou acoplamento dos geradores de forma mista usando dois barramentos, corrente contínua e alternada.

Costa (2016) completa que, para aplicações em sistemas isolados da rede elétrica ou que necessitem de geração de energia fora da rede, como por exemplo os sistemas No-Break para hospitais e edifícios comerciais as configurações de geradores acoplados em barramento de forma mista ou em corrente contínua são mais eficazes, pois possibilitam também o uso de banco de baterias e motogeradores diesel. Nas aplicações de geração distribuída ou suprimento de carga na rede local, o uso de acoplamento de geradores no barramento de corrente alternada é mais eficaz, pois permite que potência das fontes geradoras seja inferior a potência máxima solicitada pela carga.

Segundo MME (2008), os equipamentos tipicamente usados nos sistemas híbridos de geração de energia com acoplamento em paralelo de geradores AC são: inversores e dispositivos de proteção. Inversores são equipamentos eletrônicos que recebem corrente contínua e fornecem corrente alternada com parâmetros de

amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequado à carga. Os dispositivos de proteção são elementos como fusíveis, disjuntores, dispositivos de proteção contra surtos (DPS), sistemas de aterramento e sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.

3.5 SISTEMAS E INSTALAÇÕES

Dym (2010) explica que, na engenharia, o termo função é usado para denominar ações que um sistema ou equipamento deve executar, as funções envolvem o fluxo ou transformação de energia, matéria e informações. Para expressar claramente uma função é usado normalmente o verbo-objeto, como por exemplo: apoiar prateleira, misturar fluidos, acender luz são exemplos de verbos-objetos. Outro tipo de função usada na engenharia é a árvore de função meio, que descreve por meio de representação gráfica as funções e subfunções de um sistema ou instalação.

Para Pahl (2005), do ponto de vista metodológico, elaborar um sistema é uma tarefa de otimização com objetivos determinados e condições prefixadas, assim a análise e descrição de cada etapa do processo é fator determinante do resultado final. Dym (2010) completa que o engenheiro tem a missão de encontrar soluções para problemas técnicos, considerando seus conhecimentos em ciências naturais e observando as restrições econômicas, ambientais e humanas. Assim, um projeto deve prever todos os requisitos e funções do sistema, e ainda zelar pela segurança dos usuários.

Segundo Pahl (2005), as estruturas técnicas são base para solução de problemas e são divididas em grupos específicos com a denominação: instalação, equipamento, máquina aparelho, conjunto mecânico, elemento de máquina ou componente avulso. Uma instalação entende-se como um conjunto de elementos, sendo eles equipamentos, máquinas, aparelhos e outras estruturas dentro de um sistema.

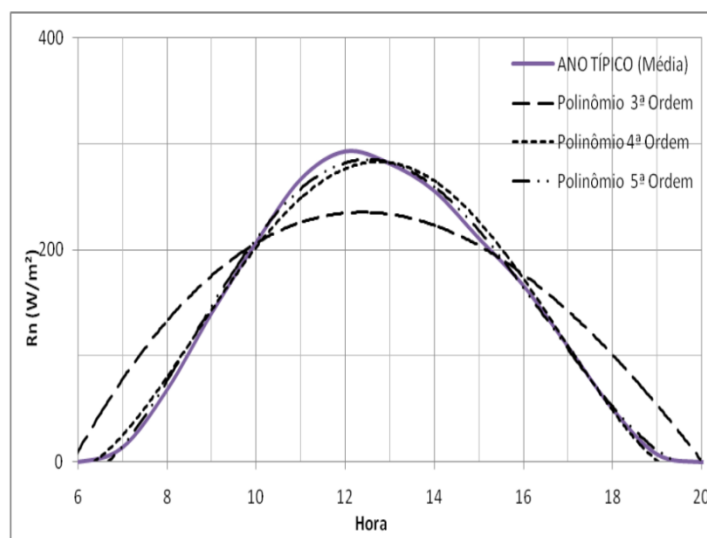
3.6 RADIAÇÃO SOLAR E VELOCIDADE DO VENTO LOCAL

3.6.1 Radiação incidente na região de Dourados

Silva e Vieira (2016 b) usando uma estação meteorológica semiautomática no campus da UFGD estudou a radiação líquida no plano horizontal com um piranômetro. Este estudo foi realizado nos anos de 2008 a 2010 e 2011 para modelagem do comportamento diário padrão da intensidade da radiação, desenvolvendo assim uma função polinomial, mostrada na equação 3.10, capaz de representar o comportamento típico da intensidade da irradiação no primeiro semestre do ano, conforme mostrado na Figura 15.

$$y = 0,1095X^4 - 5,8545X^3 + 105,68X^2 - 732,48X + 1694,9 \quad (3.10)$$

Figura 15 – Comportamento da radiação no campus II da UFGD.

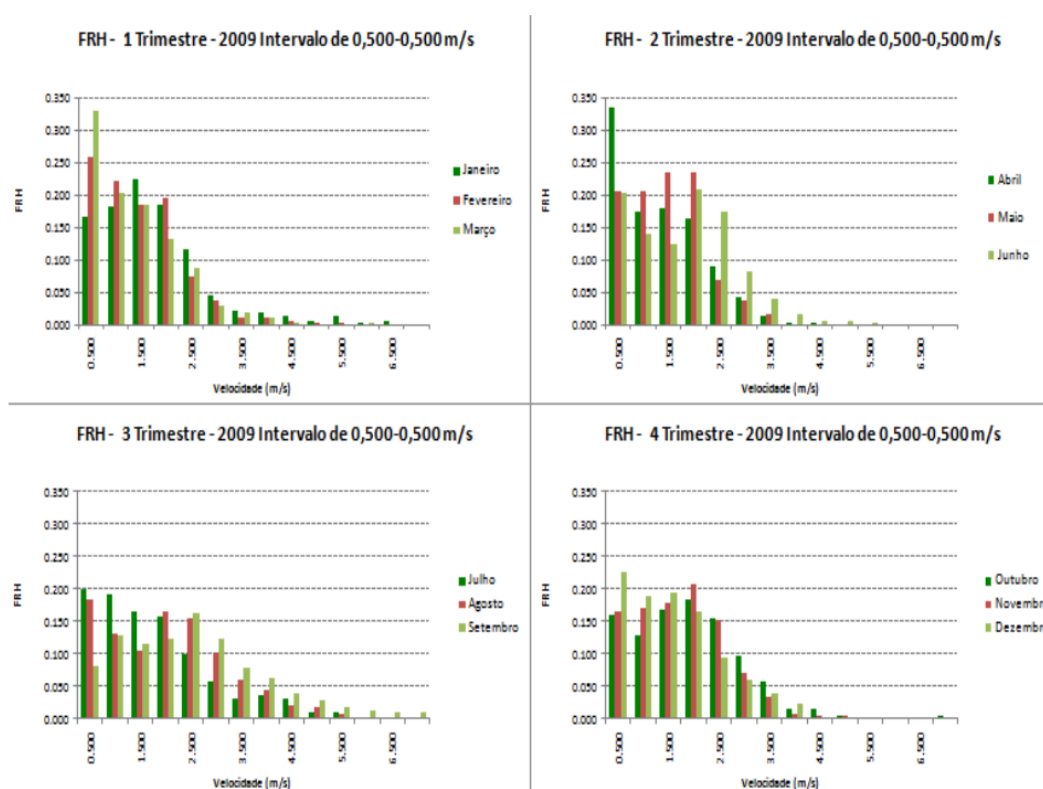


FONTE: Silva e Vieira (2016b).

3.6.2 Velocidade e direção do vento na região de Dourados.

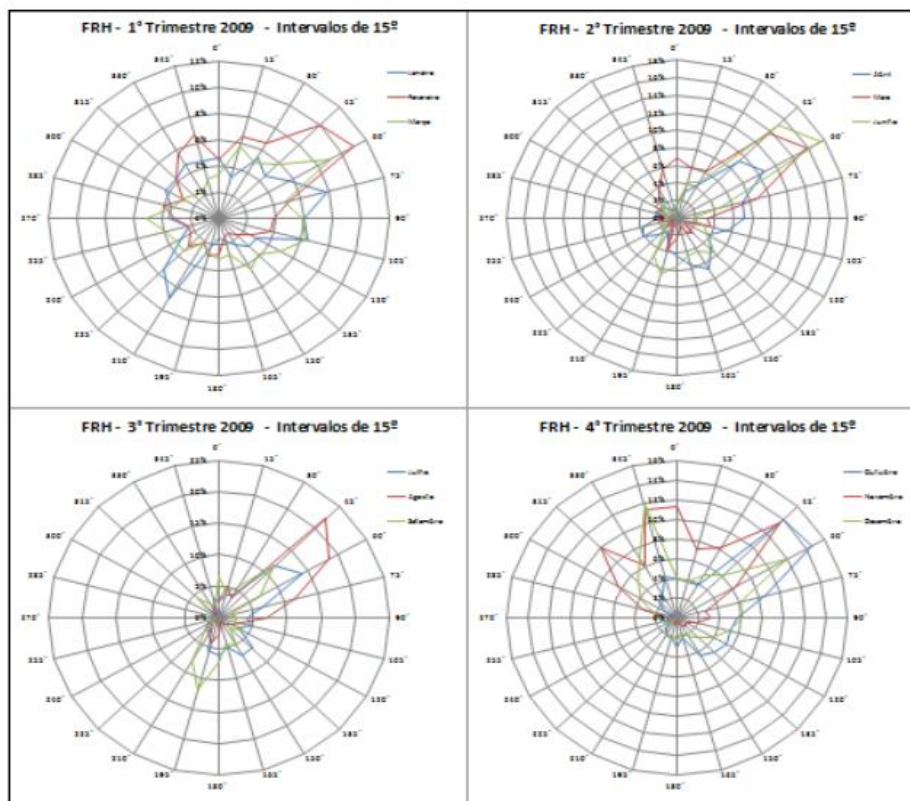
Silva e Vieira (2016a) realizaram um estudo das velocidades e direção dos ventos na Universidade Federal da Grande Dourados. A velocidade da memória do sistema de aquisição de dados disponibilizava os dados como velocidade média horária, como mostrado na Figura 16. A direção dos ventos predominante foi estabelecida considerando apenas médias diárias para estabelecer as médias mensais e trimestrais, como mostrado na Figura 17.

Figura 16 – Frequência da velocidade dos ventos na unidade II da UFGD.



Fonte: Silva e Vieira. (2016a).

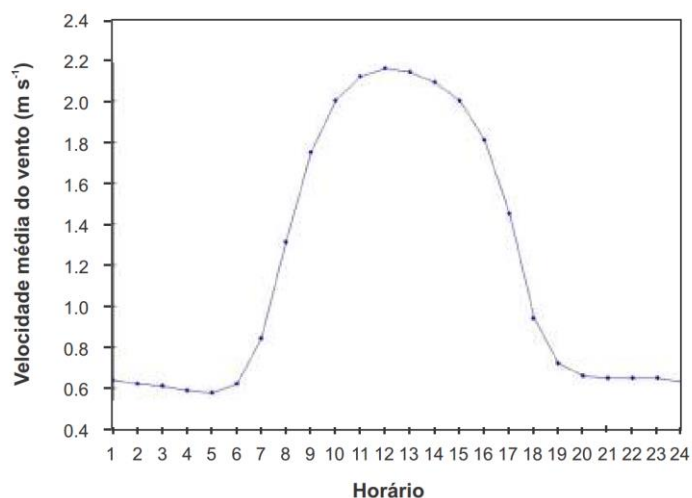
Figura 17 – Direção dos ventos na unidade II da UFGD.



FONTE: Silva e Vieira (2016a).

Segundo EMBRAPA (2017), a direção predominante do vento na região de Dourados é nordeste e leste na grande maioria dos meses do ano típico. Com relação à velocidade do vento média anual, concluiu-se que estas têm um perfil de crescimento e decréscimo durante o período diurno, chegando ao pico ao meio-dia e posteriormente decrescendo até o por do sol como mostra a Figura 18. A velocidade máxima do vento medida na região no período de 2009 até 2015 foi de 18,6 m/s, e a média de ocorrências de ventos fortes a essa velocidade foi na média de 36 ocorrências por ano.

Figura 18 – Velocidade do vento na região de Dourados.



FONTE: EMPRAPA (2017).

EMBRAPA (2008) documentou os dados sobre a velocidade média mensal dos ventos para a região de Dourados, Mato Grosso do Sul, em uma estação meteorológica automática a dez metros de altura. Estes dados são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Velocidade média mensal.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2,33	2,28	2,01	2,34	2,30	2,45	2,82	2,84	3,32	3,24	2,95	2,65
*Dados em m/s, medidos a 10m de altura.											

FONTE: Adaptado de EMBRAPA (2008).

4 MÉTODOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 COMPLEMENTARIDADE E ENERGIA DISPONÍVEL LOCAL

4.1.1 Complementaridade horária.

Para estabelecer uma complementaridade, é necessária primeiramente à conversão de cada recurso em unidade de energia coerente. Neste caso optou-se por usar o Watt por metro quadrado (W/m^2).

Usando a velocidade média do vento para as horas de um dia típico medido no campus II da UFGD e a equação 3.2, que calcula a potência máxima a ser extraída do vento, foram estimados os valores de potência para as 24 horas.

Para o recurso fotovoltaico foi usada a radiação global no plano horizontal também medida no campus II da UFGD e a equação 3.1, que calcula a eficiência de conversão de energia luminosa em eletricidade. A eficiência usada foi a máxima do mercado brasileiro atualmente, que é de 21,1%.

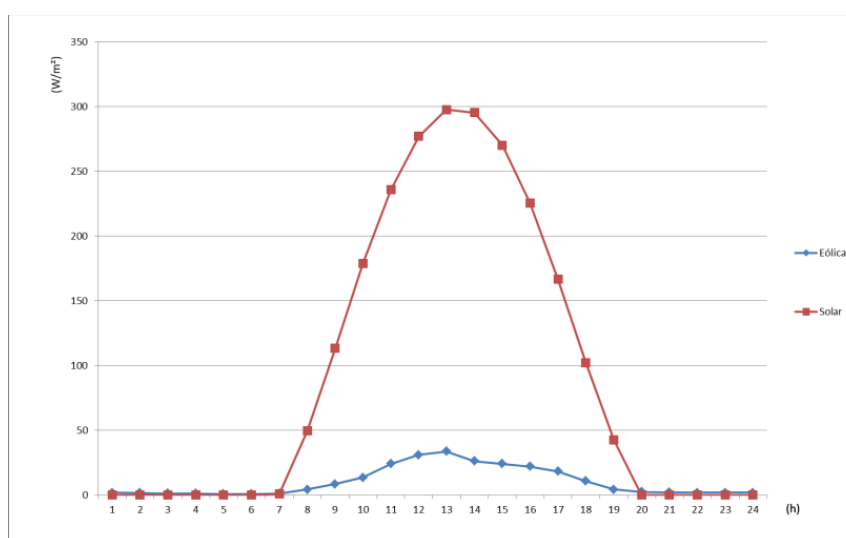
A Tabela 6 mostra a forma como ocorre a complementaridade dos dois recursos estudados, o comportamento das curvas eólica e fotovoltaica está representado na Figura 19.

Tabela 6 – Complementaridade de recursos em um dia típico.

Hora	Eólica (W/m ²)	Solar (W/m ²)	Solar – Eólica (W/m ²)	Eólica – Solar (W/m ²)
1	1,68	0,00	-1,68	1,68
2	1,51	0,00	-1,51	1,51
3	1,20	0,00	-1,20	1,20
4	1,06	0,00	-1,60	1,60
5	0,82	0,00	-0,82	0,82
6	0,82	0,00	-0,82	0,82
7	1,06	0,68	-0,38	0,38
8	4,20	49,50	45,59	-45,39
9	8,47	113,45	104,69	-104,69
10	13,45	178,60	165,15	-165,15
11	24,07	235,75	211,68	-211,68
12	31,02	277,08	246,05	-246,05
13	33,61	297,67	264,06	-264,06
14	26,26	295,26	269,00	-269,00
15	24,07	270,20	246,13	-246,13
16	22,01	225,46	203,45	-203,45
17	18,25	166,65	148,40	-148,40
18	10,77	102,01	91,24	-91,24
19	4,2	42,39	38,19	-38,19
20	2,51	0,00	-2,51	2,51
21	2,07	0,00	-2,07	2,07
22	1,68	0,00	-1,68	1,68
23	1,68	0,00	-1,68	1,68
24	1,68	0,00	-1,68	1,68

Fonte: O Autor (2017).

Figura 19 – Gráfico da complementaridade de recursos em um dia típico.



FONTE: O Autor (2017).

Com base no gráfico, é observado que o período onde não existe irradiação solar. A velocidade do vento apesar de constante é muito baixa na região de Dourados, especificamente na UFGD, onde os dados empíricos foram coletados e trabalhados estatisticamente.

Observando o comportamento de pico dos dois recursos durante as 24 horas, observa-se um resultado sugestivo de não complementaridade, pois existe um aumento e posterior decaimento da irradiação e da velocidade do vento simultaneamente.

4.1.2 Complementaridade anual.

Com base nos dados da velocidade média do vento mensal medida pela EMBRAPA para a região de Dourados e aplicando a equação 3.1 para obter a potência por metro quadrado, foi elaborada a tabela de potência média diária para cada mês do ano, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Potência média diária.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
107	115	71	112	107	124	189	200	309	297	224	157
*Dados em Wh/m ² dia											

FONTE: Adaptado de EMBRAPA (2008).

Usando a Tabela 7 e consultando o “Atlas Brasileiro de Energia Solar” para o acumulado médio mensal de potência por radiação no plano inclinado igual à latitude local (anexo A), foi elaborada a Tabela 8, ela mostra as respectivas potências eólica e fotovoltaica, além de suas diferenças.

Tabela 8 – Energia mensal total disponível eólica e solar no plano inclinado.

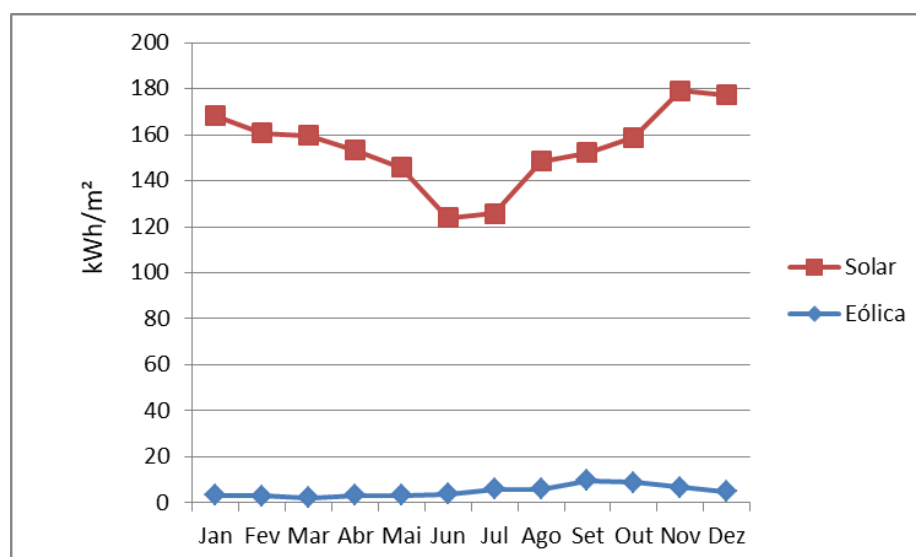
Mês	Eólica (Wh/m ²)	Solar (Wh/m ²)	Eólica - Solar (Wh/m ²)
Janeiro	3 308	165 000	-161 692
Fevereiro	3 100	157 000	-154 400
Março	2 124	157 000	-155 376
Abril	3 351	150 000	-146 649
Mai	3 182	142 000	-139 318
Junho	3 846	120 000	-116 154
Julho	5 865	120 000	-114 135
Agosto	5 990	142 500	-136 510
Setembro	9 570	142 500	-132 930
Outubro	8 895	150 000	-141 105
Novembro	6 714	172 500	-165 786
Dezembro	4 867	172 500	-167 633

FONTE: O Autor (2017)

A partir da diferença de energia por metro quadrado entre a fonte eólica e solar da Tabela 8 pode-se observar que a energia cinética possível de ser extraída dos ventos é muito menor que a energia radiante do Sol o local em estudo.

Usando os dados da Tabela 8 foram plotadas as curvas de potência eólica e fotovoltaica para observação do comportamento anual típico, conforme a Figura 20.

Figura 20 – Complementaridade anual.



FONTE: O Autor (2017)

O comportamento dos recursos ao longo do ano demonstra uma grande diferença quando realizado o cálculo da quantidade de energia disponível por metro quadrado na região de Dourados.

Observando o comportamento de vales e picos das duas funções pode-se sugerir que o comportamento da potência do vento não sofre influência considerável no decorrer do ano, diferente da radiação líquida, que têm picos e vales observáveis.

4.1.3 Índice de complementaridade anual.

Usando a formulação para o índice de complementaridade de amplitude, equação 3.4 e 3.5, e equações 3.6 e 3.7 para o índice de complementaridade de tempo e energia, foi calculada a tabela 9 com resultados para o ano típico. Sendo que os valores são considerados em uma faixa que vai de 0 até 1, ou seja, de 0% até 100% de complementaridade.

Tabela 9 – Índice de complementaridade.

Período	E_e	E_s	i_{et}	i_a	$i_{et} \times i_a$
Jan — Fev	0,032	0,025	0,000	0,292	0,000
Fev — Mar	0,187	0,000	0,000	0,292	0,000
Mar — Abr	-0,224	0,023	0,000	0,292	0,000
Abr — Mai	0,026	0,027	0,000	0,292	0,000
Mai — Jun	-0,094	0,084	0,000	0,292	0,000
Jun — Jul	-0,208	0,000	0,000	0,292	0,000
Jul — Ago	-0,011	-0,084	0,000	0,292	0,000
Ago — Set	-0,230	-0,002	0,000	0,292	0,000
Set — Out	0,037	-0,026	0,000	0,292	0,000
Out — Nov	0,140	-0,070	0,000	0,292	0,000
Nov — Dez	0,159	0,000	0,000	0,292	0,000
Dez — Jan	1,000	1,000	0,500	0,292	0,146

FONTE: O Autor (2017)

A amplitude demonstra-se constante no decorrer do ano e com valores muito baixos, sugerindo a não complementaridade entre picos e vales dos recursos no local estudado.

Os resultados observados no índice de complementaridade no tempo (i_{et}) sugerem que somente no intervalo de Dezembro à Janeiro existe uma pequena complementaridade com relação ao tempo, uma hipótese sobre este fenômeno é que o nível de irradiação direta na superfície inclinada à latitude atinge os valores máximos de acordo com a geometria celestial aparente da Terra. O produto da complementaridade de amplitude e tempo comporta-se da mesma maneira.

4.2 INSTALAÇÃO E PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

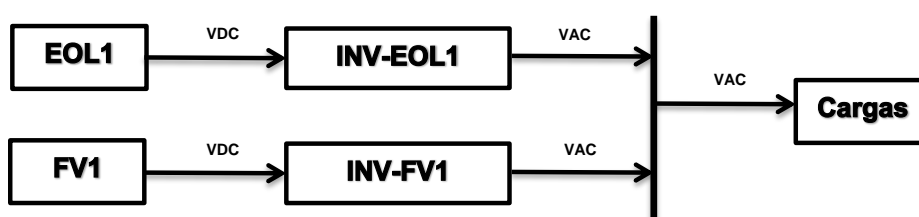
Para definir a topologia do sistema e registrar os elementos principais da instalação, foram elaboradas tabelas contendo descrições de peças e conjuntos.

4.2.1 Topologia do sistema

Conforme observado na Tabela 9, a complementaridade entre energia eólica e fotovoltaica na região de Dourados ocorre somente nos meses de janeiro e dezembro, ou seja, somente em 1/6 do ano típico. Observando que um dos campos de estudo dentro do curso de engenharia de energia da UFGD é a geração distribuída, optou-se pela topologia com geradores AC em paralelo.

A Figura 21 representa a topologia do sistema, e seus respectivos blocos de subsistemas eólico e fotovoltaico de geração e inversão de tensão, designados por: FV1, EOL1, INV-FV1 e INV-EOL1 respectivamente.

Figura 21 – Topologia: sistema em paralelo em um barramento AC.



A topologia apresentada adequa-se à produção de energia de forma distribuída ou suprimento de carga da rede e ainda pode ser usada para o ensino, pesquisa e extensão. Para isso será necessário uma conexão de um sistema de aquisição de dados após as fontes de conversão.

4.2.1 Elementos do sistema híbrido

Os equipamentos do aerogerador dentro do prédio de laboratórios de Engenharia de Energia foram subdivididos para conferência e listados em tabelas, que descreve a função, quantidade, designação dentro da instalação e quantidade. A tabela 10 contém os principais elementos do aerogerador, os elementos da nacele estão organizados na Tabela 11 e os elementos da torre na Tabela 12.

Tabela 10 - Elementos do aerogerador.

Descrição	Designação	Função	Unidade	Quantidade
Nacele	EOL1	Conversor de energia	Conjunto	1
Torre	EOL2	Sustentação	Conjunto	1
Inversor	INV-EOL1	Conversor DC-AC	Peça	1

FONTE: O Autor (2017).

Um inversor (INV-EOL1) para conversão da saída de corrente contínua do aerogerador para corrente alternada para paralelismo com o barramento da rede elétrica do prédio dos laboratórios de engenharia de Energia da Universidade Federal da Grande Dourados foi listado na Tabela 10.

Tabela 11 - Elementos da nacele.

Descrição	Designação	Função	Unidade	Quantidade
Cone Nariz	EOL1.1	Aerodinâmica	Conjunto	1
Pás	EOL1.2	Aerodinâmica	Peça	3
Eixo Nacele	EOL1.3	União	Peça	1
Eixo da Calda	EOL1.4	União	Peça	1

FONTE: O Autor (2017)

Tabela 12 - Elementos da torre.

Descrição	Designação	Função	Unidade	Quantidade
Poste	EOL2.1	Sustentação	Peça	2
Cabo de Aço	EOL2.1	Estabilidade	Peça	3
Pedestal	EOL2.3	Fixação	Peça	1
Âncoras	EOL2.4	Fixação	Peça	3

FONTE: O Autor (2017)

Foi observado no levantamento de equipamentos que o subsistema de conversão fotovoltaica ainda não possui base de sustentação (FV0) e inversor (INV-FV1), para conexão com o barramento da rede elétrica do prédio dos laboratórios de engenharia de Energia da Universidade Federal da Grande Dourados. A Tabela 13 descreve os elementos do subsistema fotovoltaico.

Tabela 13 – Subsistema fotovoltaico

Descrição	Designação	Função	Unidade	Quantidade
Base	FV0	Sustentação	Conjunto	1
Módulo Fotovoltaico	FV1.1	Conversão	Conjunto	1
Módulo Fotovoltaico	FV1.2	Conversão	Conjunto	1
Inversor	INV-FV1	Conversor DC-AC	Peça	1

FONTE: O Autor (2017)

4.2.3 Estimativa de produção de energia do sistema

Usando a equação 3.2 para ajustar a velocidade à altura do aerogerador com $\alpha=0,10$, foi realizada a Tabela 14, com valores para as diversas alturas possíveis de instalação do aerogerador. Observa-se que a velocidades de partida e de corte da turbina são de 3,00 e 7,00 m/s, respectivamente, segundo o fabricante.

Tabela 14 – Velocidade do vento para diversas alturas no campus de UFGD.

Mês	Velocidade (m/s)					
	h=10m	h=6m	h=14m	h=18m	h=22m	h=30m
Janeiro	2,33	2,21	2,41	2,47	2,52	2,60
Fevereiro	2,28	2,17	2,36	2,42	2,47	2,54
Março	2,01	1,91	2,08	2,13	2,17	2,24
Abril	2,34	2,22	2,42	2,48	2,53	2,61
Maiο	2,30	2,19	2,38	2,44	2,49	2,57
Junho	2,45	2,33	2,53	2,60	2,65	2,73
Julho	2,82	2,68	2,92	2,99	3,05	3,15
Agosto	2,84	2,70	2,94	3,01	3,07	3,17
Setembro	3,32	3,15	3,43	3,52	3,59	3,71
Outubro	3,24	3,08	3,35	3,44	3,51	3,62
Novembro	2,95	2,80	3,05	3,13	3,19	3,29
Dezembro	2,65	2,52	2,74	2,81	2,87	2,96
*Valor abaixo da velocidade de partida da turbina.						

FONTE: O Autor (2017).

O resultado da velocidade para diversas alturas sugestiona que o aumento da altura de captação para a região de Dourados influencia pouco para pequenos aerogeradores com curva de potência semelhante ao estudado.

Para o cálculo da energia bruta fornecida pelo bloco EOL1 foram interpolados valores do gráfico da curva de potência do aerogerador, considerando que o comportamento observado é linear de 2m/s até 4m/s. Para o bloco FV1 foi usada a equação 3.1 e dados de irradiação solar na superfície inclinada na latitude local. A Tabela 15 mostra a estimativa de geração de energia elétrica do sistema híbrido para o ano típico.

Tabela 15 – Energia produzida pelos geradores.

Mês	FV1	EOL1	FV1+EOL1
Janeiro	41 432	0	41 432
Fevereiro	39 423	0	39 423
Março	39 423	0	39 423
Abril	37 665	0	37 665
Maio	35 656	0	35 656
Junho	30 132	0	30 132
Julho	30 132	0	30 132
Agosto	35 656	0	35 656
Setembro	35 782	3 240	39 022
Outubro	37 665	1 728	39 393
Novembro	43 315	0	43 315
Dezembro	43 315	0	43 315
*Acumulado mensal em Wh.			

FONTE: O Autor (2017).

Com base nos resultados da tabela acima é observável que a produção anual de energia pelo aerogerador é baixa para o local em estudo, não sendo atrativa na forma financeira.

4.2.4 Localização e sombreamento

No início deste trabalho foi proposto pelo professor orientador e pelo coordenador do curso de Engenharia de Energia que a instalação fosse realizada perto do prédio do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal da Grande Dourados como mostra a Figura 21, pois a principal função do sistema é atender as necessidades de ensino pesquisa e extensão da universidade. Com relação à orientação norte na Figura 22 observa-se que a mesma está correta, comparando com o resultado da bússola e carta de declinação magnética usadas em campo no desenvolvimento deste neste trabalho.

Figura 22 – Local para instalação do aerogerador e módulos fotovoltaicos.



FONTE: Google Maps (2017).

Observando que o recurso eólico para região de Dourados é pequeno para o aerogerador em questão. A localização proposta possivelmente pode ser adotada para finalidades de ensino, pesquisa e extensão, pois existem variações na velocidade do vento que possibilitariam a visualização de produção de energia.

Conforme visto na revisão de literatura, a direção predominante dos ventos é nordeste, assim a localização proposta para instalação recebe ventos sem obstáculos.

Para os módulos fotovoltaicos a orientação para o norte e inclinação igual à latitude local ($22^{\circ} 13' 16''$ S) é suficiente, observando que as sombras do aerogerador devem ser calculadas para o ano típico e aplicadas no distanciamento entre os geradores.

Considerando o movimento aparente do Sol no hemisfério sul do planeta, observa-se que a fixação dos módulos fotovoltaicos devem ser sempre direcionadas ao norte para maior eficiência, e sempre que possível com inclinação igual a latitude local, como sugerem a maioria dos autores. Para evitar qualquer sombra do aerogerador sobre os módulos fotovoltaicos na instalação, o aerogerador deve sempre ficar após os módulos no sentido norte – sul. A Figura 23 mostra o sistema final a ser instalado.

Figura 23 - Sistema Híbrido da Universidade Federal da Grande Dourados.



FONTE: O Autor (2018).

5 CONCLUSÃO E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho apresentou um estudo sobre um sistema híbrido a ser instalado no Campus II da UFGD, considerando que a finalidade da instalação é o ensino a pesquisa e extensão acadêmica. As variáveis para conversão fotovoltaica e eólica foram revistas para elaboração de tabelas e gráficos, estes auxiliaram na escolha de topologia para a instalação, assim como será uma das bases para a localização do sistema no campus.

Conforme a revisão de literatura feita em livros, artigos científicos e documentais observou-se que a base dos sistemas híbridos é a formulação da topologia com relação às variáveis ambientais e seu nível de complementaridade em amplitude e tempo.

Este trabalho avaliou a amplitude de recursos em um período típico do dia e do ano, usando medidas empíricas e estatísticas respectivamente. Observa-se que ainda existe uma grande gama de possibilidades a ser explorada, pois as medidas empíricas são de irradiação horizontal líquida.

Uma sugestão para um trabalho futuro é a aquisição de equipamentos pela FAEN para medição da irradiação direta no plano inclinado à latitude, já que esta é uma das principais variáveis para dimensionamento e análise de sistemas fotovoltaicos.

A avaliação da complementaridade no tempo mostrou-se uma ferramenta de grande utilidade, pois com base no comportamento das curvas é possível observar níveis de complementaridade. Porém observa-se que existe outras possíveis formas de plotagem desses dados, como por exemplo, calculado os dados somente para Wh e conseguindo assim pontos de interseção entre as curvas.

O índice de complementaridades de amplitude e tempo sugerido por formulações de outros estudiosos mostrou-se compatível com a análise geral feita neste trabalho.

Com base nas variáveis ambientais e complementaridade de amplitude e tempo para o dia típico e ano típico foi sugerida a topologia de instalação,

observando que uma grande demanda de profissionais na geração distribuída é solicitada pelo mercado e as amplitudes do sistema para o dia, a topologia de geradores ligados em paralelo ao barramento AC sugestionou-se mais adequada.

Sobre a localização dos gerados pode-se observar com base nos dados e no estudo realizado as principais variáveis a serem consideradas é a direção do vento para o aerogerador e sombreamento para os módulos fotovoltaicos.

Com relação à geração de energia pelo sistema, constatou-se neste trabalho que o bloco EOL1 não trabalha em sua capacidade plena, não produzindo uma quantidade anual considerável de energia. Porém como a finalidade da instalação é acadêmica e existem grandes variações de velocidades durante o dia e o ano, será possível a observação de produção instantânea de energia elétrica máxima em certos períodos curtos conforme visto na revisão de literatura.

Este trabalho tratou da introdução a um assunto de grande discussão atual no Brasil, a geração híbrida. Considerando que existem outros recursos ainda não muito explorados em conjunto como minicentraís hidrelétricas, pequenos produtores de biocombustíveis e biomassa, energia solar térmica para processos industriais e outros, infere-se que existe ainda muito a ser explorado no campo de geração híbrida pelos engenheiros de energia.

Finalmente afirmo que este estudo, em paralelo ao estágio supervisionado na área de energia solar e a pesquisa de desenvolvimento de metodologia de projetos de energia solar térmica, demostram o quão grande é o campo de estudo da energia proveniente do Sol.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BELUCO, Alexandre. Bases para uma metodologia de dimensionamento de aproveitamentos híbridos baseados em energias hidrelétrica e fotovoltaica. (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, 2001.

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Grupo de Trabalho de Energia Solar). *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. Rio de Janeiro-RJ, 2014.

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. *Atlas do potencial Eólico Brasileiro*. Brasília-DF, 2011.

COMETTA, Emilio. *Energia solar: utilização e empregos práticos*. São Paulo-SP: Hemus, 2004.

COSTA, Delsona. *Projeto de um sistema híbrido de geração de energia elétrica conectado à rede, incluindo o regulador eletromagnético de frequência – REF*. 2016. (Mestrado Profissional em Energia Elétrica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN.

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. *Energia Eólica: Princípios e Tecnologias*. Rio de Janeiro, 2008.

Custódio, R. dos Santos. *Energia eólica para produção de energia elétrica*. Rio de Janeiro–RJ, 2009.

DYM, Clive. *Introdução à engenharia: uma abordagem baseada em projeto*. Porto Alegre-RS: Bookman, 2010.

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *O Clima da Região de Dourados, MS*. Dourados-MS, 2008.

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *O Clima da Região de Dourados, MS*. Dourados-MS, 2017.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *Estudos de planejamento da expansão da geração - Avaliação da geração de usinas híbridas eólico-fotovoltaicas*. Brasília-DF, 2017.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2021*. Brasília-DF, 2013.

EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas. *Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica*. Rio de Janeiro-RJ, 2016.

FADIGAS, Eliane. *Energia eólica*. São Paulo-SP: Manole, 2011.

FAEN – Faculdade de Engenharia. Universidade Federal da Grande Dourados. *PPC – Projeto pedagógico do curso de Engenharia de Energia*. Dourados: UFGD, 2017.

GABRIEL FILHO, L.R. Almeida. *Análise e modelagem geométrica da potência gerada por um sistema híbrido solar fotovoltaico eólico*. (Tese de Doutorado). 2007. 156f. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita. Botucatu.

GARCÍA, Felipe H. *Análise experimental e simulação de sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos*. (Monografia de Mestrado). 2004. 185f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. *Programa brasileiro de etiquetagem*. Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/tabela_fotovoltaico_modulo.pdf>. Acesso em: 25 de Fev. de 2018.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Introdução à astronomia e astrofísica*. São José dos Campos-SP, 2003.

LOPEZ, Ricardo. *Energia eólica*. São Paulo-SP: Artliber, 2012.

LOPEZ, Ricardo. *Energia solar para produção de eletricidade*. São Paulo-SP: Artliber, 2012.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Sistemas Híbridos: Soluções energéticas para a Amazônia*. Brasília-DF, 2008.

MOREIRA JUNIOR, Orlando. Estudo da instalação de um sistema híbrido de geração de energia (eólica – fotovoltaica) para o assentamento Eldorado II. In: E ENEPEX. 2015. Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados-MS.

OLIVEIRA, Adilson. *Energia eólica*. São Paulo-SP: Senac, 2012.

ORTIZ, Elvis T. *Sistemas fotovoltaicos e eólicos: metodologia para análise da complementaridade espacial-temporal com aplicação no dimensionamento e análise de risco financeiro*. (Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica). 2014. 178f. Universidade de São Paulo. São Paulo-SP.

PAHL, Gerhard. *Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações*. São Paulo-SP: Edgard Blucher, 2005.

PALZ, Wolfgang. *Energia solar e fontes alternativas*. São Paulo-SP: Hemus, 2002.

PIANEZZOLA, Gilberto. *Mapas de complementaridade dos potenciais solar e eólico no estado do Rio Grande do Sul*. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PINTO, M. de Oliveira. *Fundamentos de energia eólica*. Rio de Janeiro – RJ, 2013.

SILVA, R. Leal; Vieira, M. Mendes. Direção predominante, velocidade do vento e suas frequências de ocorrência em Dourados-MS. *Energia na Agricultura*, Botucatu-SP, vol. 31, n.4, p.348-355, outubro-novembro, 2016.

SILVA, R. Leal; Vieira, M. Mendes. Modelos sazonais para radiação solar incidente na área rural de Dourados-MS. *Revista Agrarian*, v.9, n.32, p. 162-171, Dourados-MS, 2016.

SOUZA, Nayanne Brito de. *Estratégia de operação de sistemas híbridos solar-eólico baseada em índices de complementaridade*. 2014. 51 f.. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Energia). Universidade de Brasília. Brasília-DF.

TOBIAS, Wegener. Solid state physics, classification of solids. Disponível em: <<http://www.physics-in-a-nutshell.com/article/1/overview-and-classification>> Acesso em: 25 de Fev. de 2018.

VILLALVA, Marcelo. *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações*. São Paulo; Érica, 2012.

ANEXO A

