

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

LUCAS AMORIM LEITE

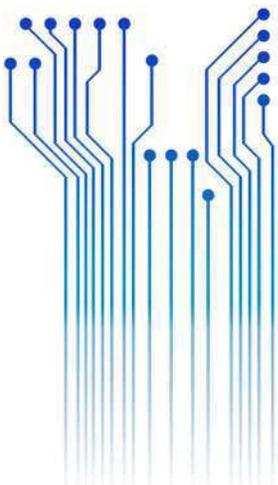


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2016

LUCAS AMORIM LEITE

SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Geração de Energia

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.
Orientador

Campina Grande
2016

LUCAS AMORIM LEITE

SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Geração de Energia

Aprovado em / /

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.

Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico esse trabalho à minha mãe Maria Nazaré Amorim e minha avó Hosana Dantas Amorim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que é a base de todas as minhas conquistas, Ele é minha bandeira, o meu guia e minha luz, e a Ele toda honra e toda glória.

Agradeço a minha mãe Maria Nazaré Amorim mulher batalhadora que dedicou sua vida para garantir meus estudos. Obrigado minha mãe por todo esforço e por ter tornado esse sonho possível.

Agradeço à minha avó Hosana Dantas por ser a base da minha vida, por ter me ensinado a sempre seguir em frente independente das barreiras a serem vencidas. Agradeço também a minha querida esposa por estar sempre do meu lado nos momentos bons e difíceis.

Agradeço ao meu orientador Célio Anésio, que se dispôs do seu tempo para me ajudar no desenvolvimento desse projeto.

Agradeço ao professor Leimar de Oliveira, que se dispôs de seu tempo para avaliar esse relatório de estágio.

Agradeço a todos que compõem o Setor de Projetos da Pró-Reitoria de Infraestrutura da UEPB, pela oportunidade, acolhimento e pelo ótimo ambiente de trabalho.

Finalmente agradeço a todos os amigos que me deram apoio e sempre acreditaram nesse sonho.

*“Um pessimista vê dificuldade em toda oportunidade;
Um otimista vê oportunidade em toda dificuldade.”*

Winston Churchill.

RESUMO

Existe locais isolados, pequenos consumidores, onde o fornecimento de energia elétrica convencional é muito complicado e oneroso devido as distancias entre a geração e o consumo, e as dificuldades de acesso à região. A forma tradicional de fornecimento de energia elétrica para essas localidades é por meio de grupo gerador a diesel, sistema que pode ter um custo elevado devido as condições de acesso à região e ao custo de manutenção. Uma alternativa de fornecimento de energia elétrica em regiões isoladas, é o uso de sistemas híbridos quando estes locais apresentarem recursos para implantação deste sistema, que pode utilizar duas ou mais fontes de energia, sendo estas renováveis ou não. Em regiões onde os recursos eólico e solar são significativos para geração de energia, a implantação de um sistema híbrido fotovoltaico-eólico é bastante vantajosa devido a complementariedade ao longo do ano das fontes envolvidas, o que diminui o custo de implantação do sistema.

Palavras-chave: Sistema híbrido fotovoltaico-eólico, Energia solar fotovoltaica, Energia eólica.

ABSTRACT

There is isolated places, small consumers, where the supply of conventional electricity is very complicated and expensive because of the distances between generation and consumption, and the difficulties of access to the region. The traditional way of providing power to these locations is through diesel generator set, a system that can have a high cost because of the conditions of access to the region and the cost of maintenance. An alternative supply of electricity in remote areas is the use of hybrid systems when these sites present resources to implement this system, you can use two or more energy sources, which are renewable or not. In areas where wind and solar resources are significant for power generation, the implementation of a photovoltaic-wind hybrid system is very advantageous due to the complementarities just the year of the involved sources, which reduces the cost of system deployment.

Keywords: photovoltaic- wind system, photovoltaic solar energy, wind energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício	21
Figura 2-Corrente elétrica em função da diferença de potencial aplicada em uma célula fotovoltaica de silício.	22
Figura 3-distintos tipos de módulos fotovoltaicos.....	27
Figura 4- Seção transversal da configuração convencional de um módulo fotovoltaico.....	28
Figura 5- Possível ligação para um diodo bypass entre células.....	29
Figura 6- Diodo de bloqueio.....	30
Figura 7- Curvas I-V de duas células fotovoltaicas de silício cristalino conectadas em série.....	30
Figura 8- Curvas I-V de duas células fotovoltaicas de silício cristalino conectadas em paralelo.....	31
Figura 9- Influência da variação da irradiância solar na curva característica I-V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino na temperatura de 25 °C.....	32
Figura 10-Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V (para irradiância de 1.000 W/m ² , espectro AM1,5).....	32
Figura 11- Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no Século XX.....	35
Figura 12- Evolução dos aerogeradores desde 1985 até 2005.....	37
Figura 13- Principais forças atuantes em uma pá de aerogerador.....	40
Figura 14-Aerogerador experimental de eixo vertical.....	41
Figura 15- Aerogerador de eixo horizontal.....	42
Figura 16- Tipos de rotores com relação à sua orientação, da esquerda para a direita: contra e a favor do vento.....	42
Figura 17- Microaerogerador de eixo horizontal Air Breeze, Southwest Windpower.....	43
Figura 18- Considerações sobre o tamanho dos aerogeradores e suas principais aplicações.....	47
Figura 19- Configuração de um sistema eólico isolado.....	48
Figura 20-Configuração de um sistema híbrido solar-eólico-diesel.....	49
Figura 21- Configuração típica para mini-eólica conectada à rede.....	49
Figura 22- Diagrama de blocos de um sistema híbrido.....	52
Figura 23- Tipos de inversores classificados de acordo com o princípio de funcionamento.....	54
Figura 24- sistema híbrido.....	55
Figura 25-Planta baixa da casa solar eficiente.....	58
Figura 26- Arranjo solar com sistema de rastreamento solar.....	59
Figura 27-Painéis fixos do sistema isolado e do sistema conectado à rede.....	60
Figura 28- Gerador eólico da Casa Ecoeficiente.....	61
Figura 29- Banco de baterias.....	61
Figura 30- Controlador de carga eólico.....	62
Figura 31-Controlador de carga solar.....	62
Figura 32- Inversor da geração conectada à rede.....	63
Figura 33-Inversor da geração isolada.....	63
Figura 34- Dados dos recursos solar de Campina Grande.....	65
Figura 35-Dados dos recursos eólico de Campina Grande.....	66
Figura 36-Gráfico consumo coberto mensal do sistema solar.....	68
Figura 37- Consumo coberto mensal do sistema eólico.....	70
Figura 38- Gráfico consumo coberto mensal do sistema híbrido.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Áreas ocupadas por de módulos de diferentes tecnologias.....	26
Tabela 2-Eficiências de células fotovoltaicas coloridas.	26
Tabela 3- Classificação de aerogeradores de pequena potência.	43
Tabela 4- Avaliação de sistema solar.	67
Tabela 5- Avaliação de sistema eólico.	69
Tabela 6- Avaliação de sistema híbrido eólico e solar.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEM	Balanço Energético Nacional
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
CNP	Concelho Nacional de Petróleo
DSSC	Dye Sensitized Solar Cells
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FV	Fotovoltaico
ITA	Instituto Técnico Aeroespacial
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBR	Associação Brasileira de Normas Técnicas
PMG	Gerador de Imã Permanente
PROEOLICA	Programa Emergencial de Energia Eólica
SFI	Sistemas Fotovoltaicos Isolados
SPPM	Seguidor de Ponto de Potência Máxima
SLI	Starting Lighting Ignition
SFIE	Sistema Fotovoltaico Integrado à Edificação
GaAs	Arseneto de Gálio
CuInSe ₂	Disseleneto de Cobre-Índio
CdTe	Telureto de Cádmio
μc-Si	Silício Microcristalino
a-Si:H	Silício Amorfo Hidrogenado
p-Si	Silício Poli-Cristalino

LISTA DE SÍMBOLOS

kW	Quilo-Watt
MW	Mega-Watt
m	Metro
kVA	Quilo-Volt Ampère
V	Volt
RPM	Rotações Por Minuto
m/s	Metros por Segundo
kg	Quilo-Grama
Wp	Watt pico
W/m ²	Watt por metros quadrados
v	Velocidade
ρ	Massa Especifica do Ar
A	Área
P _{disp}	Potência Disponível
k	Parâmetro de Forma da Distribuição de Weibull
c	Parâmetro de Velocidade da Distribuição de Weibull
u _{ma}	Velocidade Média Anual
C _p	Coefficiente de Potência
€	Euro

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	viii
Lista de Ilustrações.....	ix
Lista de Tabelas.....	x
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	xi
Lista de Símbolos.....	xii
Sumário.....	xiii
1 Introdução.....	15
1.1 Objetivo.....	16
1.2 Estrutura do trabalho.....	16
2 Energia Solar Fotovoltaica.....	17
2.1 Breve Histórico.....	17
2.2 Efeito Fotovoltaico.....	19
2.3 Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos.....	21
2.4 Tipos de Células.....	23
2.4.1 Células de Silício Monocristalino.....	24
2.4.2 Células de Silício Multicristalino.....	24
2.4.3 Células de Silício Amorfo.....	24
2.4.4 Outros Tipos de Células Fotovoltaicas.....	25
2.5 Associação de Células e Módulos Fotovoltaicos.....	27
2.6 Parâmetros Externos que Afetam as Características Elétricas.....	31
3 Energia Eólica.....	33
3.1 Breve Histórico.....	33
3.1.1 Desenvolvimento dos Aerogeradores no Século XX.....	34
3.2 O Recurso Eólico.....	37
3.3 Conversão Eólica.....	38
3.4 Turbina Eólica.....	40
3.5 Pequenos Geradores Eólicos.....	43
3.5.1 Rotor.....	44
3.5.2 Sistema de Regulação de Potência e da Velocidade de Rotação.....	44
3.5.3 Sistema de Frenagem.....	45
3.5.4 Sistema de Orientação.....	46
3.5.5 Geradores Elétricos.....	46
3.5.6 Controle Eletrônico.....	46
3.6 Configurações dos Sistemas Eólicos.....	47
3.6.1 Sistemas Isolados.....	47
3.6.2 Sistemas Híbridos.....	48

3.6.3	Sistemas Interligados à Rede	49
3.7	Sistema de armazenamento e condicionamento de potencia.....	50
3.7.1	Sistema de Acumulação de Energia.....	50
3.7.2	Sistema de Condicionamento de Potência	52
3.7.3	Controladores de Cargas.....	52
3.7.4	Retificadores.....	53
3.7.5	Inversores	53
4	Sistema Híbrido Fotovoltaico-Eólico	55
4.1	Sistema Fotovoltaico – Eólico	57
4.2	Casa Ecoeficiente.....	58
4.2.1	Sistema de Geração Fotovoltaico	59
4.2.2	Sistema de Geração Eólica	60
4.2.3	Banco de Baterias	61
4.2.4	Controlador de Carga.....	61
4.2.5	Inversores	63
4.3	Avaliação do Sistema Híbrido Solar e Eólico.....	64
4.3.1	Resultado para Estudo Utilizando o Sistema Solar.....	67
4.3.2	Resultado para Estudo Utilizando o Sistema Eólico.....	69
4.3.3	Resultado para Estudo Utilizando o Sistema Solar e Eólico	71
4.3.4	Análise dos Resultados.....	72
5	Conclusão	73
6	Referências	74

1 INTRODUÇÃO

No presente trabalho, duas fontes de energia renováveis serão descritas, energia solar fotovoltaica e eólica, bem como o seu sistema híbrido. Tais fontes de energia constituem uma alternativa de suprimento de energia elétrica em locais remotos, onde há dificuldades de acesso e os custos são elevados para construção do sistema de fornecimento de energia convencional.

As energias renováveis tiveram um grande avanço no cenário mundial, seja pelo seu desenvolvimento tecnológico ou a necessidade de preservação da natureza. Sua participação frente as outras formas de geração de energia convencional, ainda é pequena e necessita de estudos para consolidação tecnológica empregada, o que levaria a redução do custo, que é hoje a principal barreira para expansão das fontes renováveis de energia elétrica.

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje uma das alternativas energéticas mais promissoras para prover a energia necessária ao desenvolvimento humano (CRESESB ,1999).

A tecnologia de geração eólica está baseada no aproveitamento da energia cinética do vento. Este aproveitamento foi realizado durante séculos na forma de energia mecânica em aplicações como barcos à vela, moinhos de vento, etc., mas foi durante o último século principalmente quando começou a ser utilizado também para produzir eletricidade (Arribas, L,2013).

Uma alternativa de suprimento de energia elétrica em regiões isoladas é o uso de sistemas híbridos quando estes locais apresentarem recursos para implantação deste sistema, que pode utilizar duas ou mais fontes de energia renováveis ou não. Em regiões onde os recursos eólico e solar são significativos para geração de energia, a implantação de um sistema híbrido fotovoltaico-eólico é bastante vantajosa devido a complementariedade ao longo do ano das fontes envolvidas, o que diminui o custo de implantação do sistema.

1.1 OBJETIVO

O Trabalho de Conclusão de Curso tem como propósito exibir os resultados do estudo bibliográfico sobre o sistema híbrido fotovoltaico- eólico.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 1 é introdutório, contextualiza o trabalho. No Capítulo 2 é realizado o estudo sobre energia solar fotovoltaica, sua evolução tecnológica, o efeito fotovoltaico, os tipos de células, associação de células e módulos fotovoltaicos e parâmetros externos que afetam as características elétricas. No Capítulo 3 é desenvolvido o estudo da energia eólica, sua evolução histórica, as tecnologias empregadas e o estudo de pequenas turbinas eólicas.

O Capítulo 4 é apresentado os sistemas de armazenamento e condicionamento de potência. Em seguida no Capítulo 5 é apresentado os sistemas híbridos, sistema híbrido tipo fotovoltaico-eólico, a Casa Ecoeficiente e uma simulação para um pequeno posto de saúde localizado na região de Campina Grande. Por fim é apresentado as conclusões do trabalho.

2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje uma das alternativas energéticas mais promissoras para prover a energia necessária ao desenvolvimento humano (CRESESB ,1999).

2.1 BREVE HISTÓRICO

O fundamento da conversão da energia do sol em energia elétrica está no Efeito Fotovoltaico, descoberto por Becquerel em 1839 ao observar que certos materiais, ao ser exposto à luz, eram capazes de produzir uma corrente elétrica (Alonso, M.C., García, F.S. e Silva, J.P. ,2013).

Através de seus experimentos, Becquerel observou que a radiação luminosa poderia ser convertida em energia elétrica, mediante a incidência de luz em um eletrodo mergulhado numa solução eletrolítica (PINHO et al., 2008).

Em 1876, W. G. Adams e R. E. Day observaram efeito similar em um dispositivo de estado sólido fabricado com selênio. Os primeiros dispositivos que podem ser denominados de células solares ou células fotovoltaicas foram fabricados em selênio e desenvolvidos por C. E. Frits em 1883 (Pinho e Galdino,2014).

Uma série de avanços foram obtidos com o passar do tempo, principalmente os relacionados ao material com propriedades fotocondutoras utilizados na conversão. No entanto, somente em 1954 foi produzida a primeira célula fotovoltaica com uma eficiência de conversão aceitável (Chapin, 1954, célula de 6%) (Alonso, M.C., García, F.S. e Silva, J.P. ,2013).

A primeira célula solar moderna foi apresentada em 1954 por Daryl Chapin, Calvin Fuller e Gerald Pearson. Estas células fotovoltaicas foram fabricadas a partir de lâminas de silício tinha apenas dois centímetros quadrados de área e atingiram uma eficiência de conversão de energia solar em elétrica, relativamente alta para a época, de 6%, gerando 5 mW de potência elétrica (Alonso, M.C., García, F.S. e Silva, J.P. ,2013).

As primeiras aplicações da tecnologia fotovoltaica foram para empresas do setor de telecomunicação, que utilizava os painéis como fonte de energia para sistemas instalados em lugares remotos. A Aplicação de células fotovoltaicas em sistemas espaciais teve início no ano de 1958.

Inicialmente, os satélites usaram pilhas químicas ou baseadas em isótopos radioactivos. As células solares eram consideradas uma curiosidade, e foi com grande relutância que a NASA aceitou incorporá-las, como back-up de uma pilha convencional, no Vanguard I, lançado em março de 1958. A pilha química falhou, mas o pequeno painel com cerca de 100 cm², que produzia quase 0,1W, manteve o transmissor de 5 mW em funcionamento muito para além de todas as expectativas: o Vanguard I manteve-se operacional durante oito anos. Depois desta demonstração de fiabilidade, durabilidade e baixo peso, o programa espacial norte-americano adoptou as células solares como fonte de energia dos seus satélites (Vallêra, 2006).

A célula fotovoltaica era, e continua sendo, o meio mais adequado (menor custo, peso e segurança) para fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos de alimentação de equipamentos eletroeletrônicos no espaço (Pinho e Galdino,2014).

Um acontecimento importante para a renovação e ampliação do interesse relacionado a aplicações terrestre da tecnologia solar fotovoltaica foi a crise do petróleo de 1973. Durante uma boa parte dos anos 90 o principal país a se destacar nessa tecnologia foi Estados Unidos, logo depois países como Alemanha e Japão por meio de políticas de governamentais voltadas para redução de CO₂ e para desenvolver o mercado dessa tecnologia para exportação, promoveram aumentos substanciais no desenvolvimento desse mercado.

O grande salto no desenvolvimento do mercado fotovoltaico resultou do rápido aumento da produção chinesa, observado desde 2006. Em 2003, a Ásia não figurava entre os dez maiores fabricantes do mundo, entretanto, em 2008, três destes eram da China e um de Taiwan e, em 2009, a China já ocupava a liderança na fabricação de módulos. Nos últimos onze anos, o crescimento anual médio da indústria de células e módulos fotovoltaicos foi de 54,2% (Pinho e Galdino,2014).

O grande desafio para o mercado de energia solar e a principal barreira para a expansão dos sistemas fotovoltaicos em larga escala é o custo das células. Realidade essa que está mudando devido ao custo decrescente da tecnologia fotovoltaica e custos crescentes das demais formas de produção de energia, além de fatores que eram anteriormente ignorados, como a questão dos impactos ambientais.

O problema da eficiência de conversão e custo de material, e ainda o grande conhecimento adquirido pela teoria física das células têm impulsionado a pesquisa de células solares produzidas com materiais diferentes do silício monocristalino. Atualmente são estudados e mesmo utilizados o silício policristalino e amorfo, o arseneto de gálio e o sulfeto de cádmio, dentre outros. No entanto, o conhecimento da tecnologia que emprega o silício, em particular o monocristal e a abundância da matéria prima que lhe dá origem, tem sido as razões mais importantes que tornaram o silício o material predominante no processo de desenvolvimento tecnológico (Fadigas).

Diversas tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas foram desenvolvidas nos últimos 60 anos e as células fotovoltaicas fabricadas a partir de lâminas de silício cristalino (monocristalino ou policristalino) dominam o mercado mundial atualmente. As outras tecnologias comercializadas são baseadas em filmes finos de telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS), silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), silício microcristalino ($\mu\text{-Si}$) e silício crescido em fitas (Si-fitas). Células fotovoltaicas multijunção de alta eficiência, células baseadas em corantes (DSSC – Dye Sensitized Solar Cells) ou polímeros também estão sendo desenvolvidas (Pinho e Galdino,2014).

2.2 EFEITO FOTOVOLTAICO

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade através do efeito fotovoltaico, descoberto pelo cientista francês Edmond Becquerel, em 1839 onde constatou uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor quando exposto a luz.

O efeito fotovoltaico dá-se em materiais da natureza denominados semicondutores que se caracterizam pela presença de bandas de energia onde é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e de outra onde totalmente “vazia” (banda de condução) (Brito ,2006).

A célula de silício cristalina é a mais comum. Atualmente, cerca de 95 % de todas as células solares do mundo são de silício (Pinho e Galdino,2014).

O elemento fundamental na conversão fotovoltaica é a célula solar. Em determinados matérias semicondutores, os fótons da radiação solar são capazes de transmitir sua energia aos elétrons de valência do semicondutor, tornando possível romper suas ligações de modo que fiquem livres e possam movimenta-se no material. A ausência

de um elétron devido ao rompimento de uma ligação se chama lacuna, e também pode mover-se através do semicondutor. Portanto, as propriedades de condução elétrica de um semicondutor devem-se tanto ao movimento dos elétrons, quanto ao movimento das lacunas, denominando-se ambos, de maneira genérica, portadores de carga (Alonso, M.C., García, F.S. e Silva, J.P. ,2013).

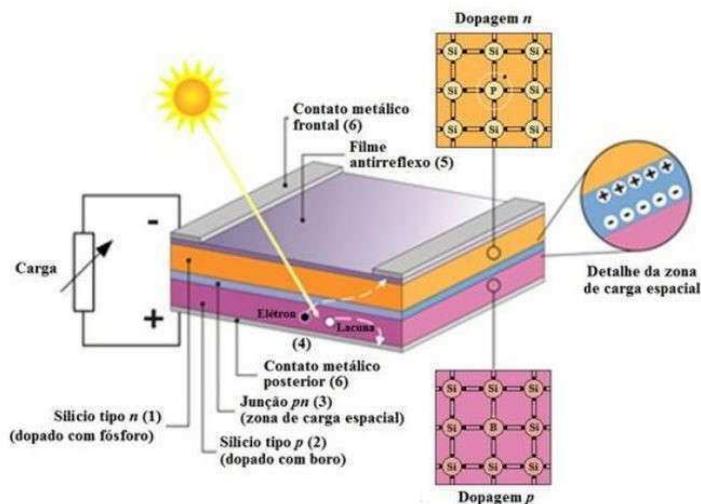
O movimento dos elétrons e lacunas em direções opostas gera uma corrente elétrica no semicondutor, que seria aproveitável por um circuito externo. A fim de separar as lacunas elétrons para que a ligação não se reestabeleça utiliza-se um campo elétrico que obriga a circulação de ambas cargas em sentidos opostos. Uma célula solar não é mais do que um semicondutor preparado de maneira que seja possível extrair a circulação de corrente do mesmo até um circuito externo (Alonso, M.C., García, F.S. e Silva, J.P. ,2013).

Os materiais semicondutores utilizados na fabricação das células fotovoltaicas são normalmente pertencentes ao grupo 4 da tabela periódica de elementos. Quando puros, esses semicondutores possuem a banda de valência completamente preenchida e a banda de condução vazia. Para que o material possua a capacidade de conduzir corrente elétrica, ele passa pelo processo de dopagem, que pode ser realizado através de dois modos: em um deles, o material dopante é um átomo de grupo 5 (doador) e a ligação ocasionará o aparecimento de um elétron livre, que poderá se deslocar para a banda de condução, formando o chamado semicondutor tipo n. No outro modo, a impureza pertence ao grupo 3(receptor), o que criará uma deficiência na banda de valência (buraco). Neste caso, o semicondutor é do tipo p. Para obtenção de uma célula fotovoltaica, o semicondutor puro é submetido a um processo de adição de “impureza”, inicialmente do tipo receptora e posteriormente do tipo doadora, formando assim uma junção pn, na qual baseia-se o princípio de operação da célula fotovoltaica (PINHO et al., 2008).

Se uma junção pn for exposta a fótons com energia maior que o gap, ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna; se isto acontecer na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando assim, uma corrente através da junção; este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial ao qual chamamos de Efeito Fotovoltaico. (Fadigas)

A Figura 1 representa a estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício.

Figura 1- Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício.



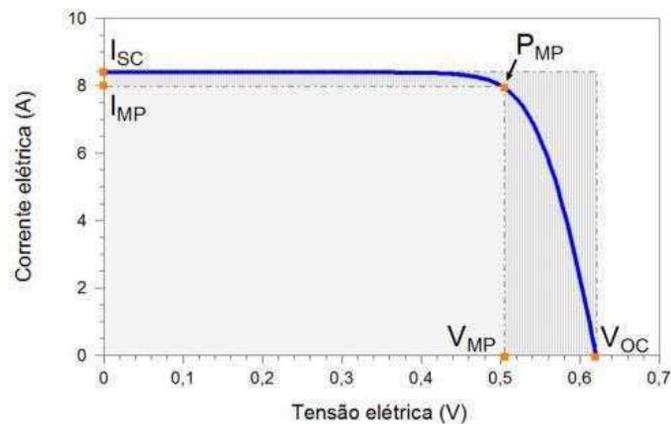
Fonte: (Pinho e Galdino, 2014).

2.3 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Segundo a norma NBR10899, o módulo fotovoltaico é uma unidade básica formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica.

As mais importantes características elétricas dos módulos fotovoltaicos são, potência, tensão e corrente. Uma característica fundamental da célula solar é o seu perfil corrente-tensão, curva I-V. A partir da curva I-V, podem ser determinados os parâmetros elétricos que caracterizam as células ou módulos fotovoltaicos, tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, fator de forma e eficiência. A curva I-V representa as possíveis combinação de corrente e tensão que podem ser obtidas de uma célula e em determinadas condições. O perfil da curva I-V é visto na Figura 2.

Figura 2-Corrente elétrica em função da diferença de potencial aplicada em uma célula fotovoltaica de silício.



Fonte: (Pinho e Galdino,2014).

As definições a baixo são definidas segundo Alonso, M.C., García, F.S. e Silva, J.P. (2013).

- **Corrente de curto-circuito** (I_{sc} notação internacional): É a máxima corrente que produzirá o dispositivo sob condições definidas de iluminação e temperatura, correspondentes a uma voltagem igual a zero.
- **Tensão de circuito aberto** (V_{oc} notação internacional): É a máxima voltagem do dispositivo sob condições determinadas de iluminação e temperatura, correspondentes a uma corrente igual a zero.
- **Potência máxima (Pmax)**: É a máxima potência que produzirá o dispositivo em condições determinadas de iluminação e temperatura, correspondente ao par máximo $V \times I$.
- **Corrente no ponto de máxima potência** (I_{max}): É o valor da corrente para Pmax em condições determinadas de iluminação e temperatura.
- **Tensão no ponto de máxima potência** (V_{max}): É o valor de voltagem para Pmax em condições determinadas de iluminação e temperatura.
- **Fator de preenchimento ou fill fator (FF)**: É o valor correspondente ao quociente entre Pmax e o produto $I_{sc} \times V_{oc}$. Pode ser expressado em porcentagem, sendo que 100% corresponderia a um hipotético perfil de curva quadrado, não real. Fornece uma ideia da qualidade do dispositivo fotovoltaico, sendo que este será melhor quanto maior seja seu fator de preenchimento.

- **Eficiência:** É o quociente entre a potência que pode entregar a célula e a potência da radiação solar que incide sobre ela.

Levando em consideração que a curva característica do módulo fotovoltaico é alterada mediante as condições do ambiente, se faz necessário definir uma série de condição de operações.

A condição padrão para se obter as curvas características dos módulos é definida para radiação de 1000W/m^2 (radiação recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio dia), e temperatura de 25°C na célula (a eficiência da célula é reduzida com o aumento da temperatura) (Brito,2006).

Normalmente os parâmetros característicos dos módulos ou células incluídas nas folhas de especificações técnicas são definidos nestas condições. No entanto, em poucas oportunidades os módulos fotovoltaicos atingem esses parâmetros.

2.4 TIPOS DE CÉLULAS

A maioria dos materiais utilizados na conversão fotovoltaica são cristalinos, caracterizando-se por terem uma estrutura de átomos que se repete. Os semicondutores mais apropriados à conversão da luz solar são os mais sensíveis, ou melhor, aqueles que geram o maior produto corrente-voltagem para a luz visível, já que as maiores parcelas da energia fornecida pelos raios solares estão dentro da faixa visível do espectro. (Fadigas).

As células fotovoltaicas são fabricadas, na sua grande maioria, usando o silício (Si) e podendo ser constituída de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo.

Existem também novos materiais em estudo, alguns já em estágio de comercialização, que se baseiam na combinação dos semicondutores das famílias da tabela periódica 3A e 5A, como o Arseneto de Gálio (GaAs); e 2A e 6A, como o Disseleneto de Cobre-Índio (CuInSe_2) e o Telureto de Cádmio (CdTe). Estas tecnologias, somadas ao silício amorfo, são denominadas tecnologias de Filme Fino, às suas características construtivas (PINHO et al., 2008).

As células de c-Si corresponderam em 2011 a 87,9% do mercado mundial. Para sua fabricação, a matéria prima utilizada é o silício ultrapuro. Pode ser utilizada a mesma matéria prima da indústria eletrônica (chips) o chamado silício grau eletrônico (Si-gE),

com uma pureza de 99,9999999%, também denominada 9N (nove nozes), ou então o silício grau solar (Si-gS), com 99,9999% (6N), de menor custo (este último não pode ser usado na indústria eletrônica (Pinho e Galdino,2014).

2.4.1 CÉLULAS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO

É o mesmo material utilizado na fabricação de circuitos integrados para microeletrônica. São atualmente as mais utilizadas comercialmente, O silício é o segundo material mais abundante na crosta terrestre e células fabricadas com esse material não apresentam problemas ambientais causados pela combinação por seus elementos constituintes, além de apresentarem elevada vida útil (PINHO et al., 2008).

As células são formadas em fatias de um único grande cristal, previamente crescido e enfatiado. A grande experiência na sua fabricação e pureza do material garante alta confiabilidade do produto e altas eficiências. Enquanto o limite teórico de conversão da luz solar em energia elétrica, para esta tecnologia é de 27%, valores nas faixas de 12 a 16% são encontrados em produtos comerciais (Fadigas).

As desvantagens estão relacionadas com o alto custo de produção, devido ao processo construtivo, e ao alto consumo de energia nos processos de fabricação.

2.4.2 CÉLULAS DE SILÍCIO MULTICRISTALINO

Estas células são fabricadas a partir do mesmo material que, ao invés de formarem um único grande cristal, é solidificado em forma de um bloco composto de muitos pequenos cristais, a partir deste bloco são obtidas fatias e fabricadas as células (Fadigas).

Esse procedimento visa reduzir custo de fabricação embora haja uma pequena perda de eficiência. Os avanços tecnológicos vêm reduzindo bastante as diferenças de custo e eficiência entre as células mono e policristalinas, sendo essas diferenças atualmente pouco perceptíveis (PINHO et al., 2008).

2.4.3 CÉLULAS DE SILÍCIO AMORFO

O material amorfo difere de um material cristalino pelo fato de não apresentam qualquer ordenamento na estrutura dos átomos.

Mesmo apresentando um custo reduzido na produção, o uso de silício amorfo apresenta duas desvantagens: a primeira é a baixa eficiência de conversão comparada às células mono e policristalinas de silício; em segundo, as células são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo assim a eficiência ao longo da vida útil (Brito ,2006).

É a célula mais pesquisada atualmente, e a que possui um preço mais baixo devido ao seu processo mais simples de fabricação. Pode citar algumas vantagens da célula de silício amorfo como:

- Processo de fabricação relativamente simples e barato,
- Possibilidade de fabricação de células com grandes áreas,
- Baixo consumo de energia na produção.

2.4.4 OUTROS TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Células de Arseneto de Gálio (GaAs), têm estrutura similar à do silício, apresentando eficiência ligeiramente superior. Ideais para utilização em sistemas com concentração, são pouco utilizados em escala terrestre, principalmente devido ao complexo processo de produção envolvido, resultando em custos muito elevados (PINHO et al., 2008).

Células de Disseleneto de Cobre-Índio (CIS), são compostas por um material policristalino, podendo captar uma larga faixa do espectro solar. No entanto, o gasto de material é maior do que no silício amorfo, devido à presença do índio. Essa tecnologia pode ocasionar problemas ambientais devido à combinação por seus elementos. Apresentam eficiências máximas laboratoriais de 19,2% e comerciais de 14%. (PINHO et al., 2008).

Células de Telureto de Cádmiio (CdTe), também são compostas por arranjos policristalinos. Os riscos ambientais apresentados são mínimos, porém apresentam dificuldade no processo de dopagem. Atingem eficiências máximas laboratoriais de 16,5% e comerciais de 11%. (PINHO et al., 2008).

Na Tabela 1 são apresentadas as potências médias por unidade de área no estágio atual do desenvolvimento de módulos fotovoltaicos de várias tecnologias.

Tabela 1-Áreas ocupadas por de módulos de diferentes tecnologias.

Tecnologia	Potência/área (Wp/ mm ²)
Si monocristalino-m-Si	150
Si policristalino-p-Si	135
Si amorfo- a-Si	85
Disseleneto de Cobre-Índio (e Gálio) -CI (G) S	100
Telureto de Cádmio- CdTe-	110

Fonte: (Pinho e Galdino,2014).

Alguns fabricantes vêm disponibilizando comercialmente células fotovoltaicas de c-Si coloridas para módulos destinados à integração arquitetônica (SFIE – Sistema Fotovoltaico Integrado à Edificação). O resulta em redução de sua eficiência como pode ser visto na Tabela 2

Tabela 2-Eficiências de células fotovoltaicas coloridas.

Cor	Eficiência (%)
azul	13,6
marrom	12,2
dourado	11,7
cinza	12,4
magenta	11,3
verde	11,5
prateada	10,4

Fonte: (Pinho e Galdino,2014).

Ressalta-se que a eficiência do módulo não deve ser utilizada como indicador de qualidade do mesmo. A escolha de um módulo fotovoltaico deve se basear em diversos fatores, como, custo, durabilidade, reputação do fabricante etc. Em princípio, a eficiência não deve nortear a escolha do módulo a não ser que a área disponível para instalação do painel fotovoltaico seja um fator restritivo (Pinho e Galdino,2014). Na Figura 3 é apresentado imagens de diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos.

Figura 3-distintos tipos de módulos fotovoltaicos.



Fonte: (Alonso, M.C., García, F.S. e Silva, J.P.,2013).

2.5 ASSOCIAÇÃO DE CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Devido à baixa tensão e corrente de saída em uma célula fotovoltaica, existe a necessidade de associação das células, essas são encapsuladas em módulos, ou seja, O módulo fotovoltaico consiste na conexão elétrica de células FV em série-paralelo para que se obtenham tensões e correntes úteis na prática. Estas células são soldadas em tiras, geralmente com soldagem realizada por iluminação com lâmpadas halógenas ou radiação laser. Depois de soldadas, as células são encapsuladas, o empacotamento é feito para que fiquem protegidas das intempéries, principalmente da umidade do ar conferindo-lhe ao mesmo tempo rigidez mecânica e isolando-o eletricamente do exterior. Os arranjos ou geradores fotovoltaicos são constituídos por um conjunto de módulos associados eletricamente em série e/ou paralelo, de forma que proporcionam energia a uma instalação. A corrente produzida pelo efeito fotovoltaico é contínua. Pelas características

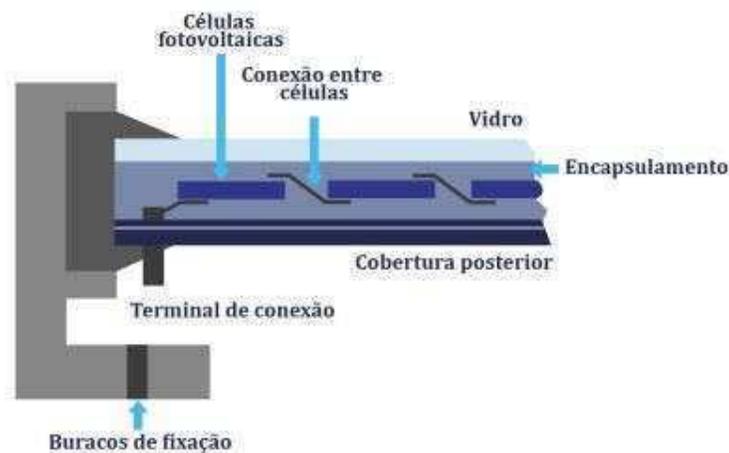
típicas das células (corrente máxima por volta de 3 A e tensão muito baixa, em torno de 0,6 V).

Os primeiros módulos fotovoltaicos utilizados em aplicações autônomas de pequena potência costumavam estar constituídos por 33 ou 36 células de silício monocristalino ou policristalino associadas em série. Atualmente, com a amplas gamas de instalações fotovoltaica existente e o aumento de novas aplicações como a integração de sistemas fotovoltaicos em edifícios, o tamanho e características dos módulos apresenta uma grande variação (Alonso, M.C., García, F.S. e Silva, J.P. ,2013).

A conexão mais comum de células fotovoltaicas em módulos é o arranjo em série, em geral em números de 30, 33 e 36. Este consiste em agrupar o maior número de células em série, onde se somam as tensões de cada célula, chegando a um valor final que possibilita a carga de acumuladores (baterias) que funcionam com tensão nominal de 12 V (Brito ,2006).

De acordo com Alonso, M.C., García, F.S. e Silva, J.P. (2013) a estrutura mais convencional do módulo fotovoltaico é a esquematizada na Figura 4, que apresenta a seção transversal de um módulo.

Figura 4- Seção transversal da configuração convencional de um módulo fotovoltaico.



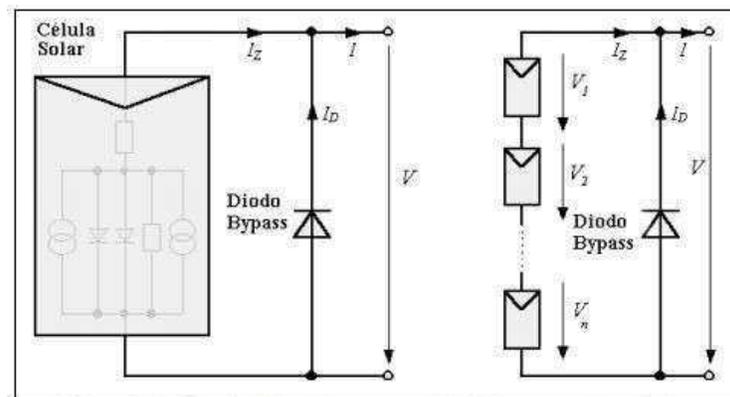
Fonte: (Alonso, M.C., García, F.S. e Silva, J.P.,2013).

No intuito de fornecer maiores valores de potência, corrente e/ou tensão, os Dispositivos fotovoltaicos podem ser associados em série e/ou paralelo, dependendo dos valores desejados. Tais dispositivos podem ser células, módulos ou arranjos fotovoltaicos. Uma associação de módulos dá origem a um gerador ou arranjo fotovoltaico.

Quando a ligação é feita em série, a tensão final do dispositivo fotovoltaico (células, módulos ou arranjos fotovoltaicos) é igual à soma das tensões dos módulos e a corrente final do dispositivo fotovoltaico é igual à corrente de um único módulo. Na conexão em série, o terminal positivo de um dispositivo fotovoltaico é conectado ao terminal negativo do outro dispositivo, e assim por diante. Para minimizar as perdas de potência no sistema, apenas deverão ser utilizados módulos do mesmo tipo.

Se uma célula fotovoltaica dentro de um módulo, por algum motivo, estiver encoberta a potência de saída do módulo cairá drasticamente que, por estar ligada em série, comprometerá todo o funcionamento das demais células no módulo. Para evitar a ocorrência de “pontos quentes”, os módulos são normalmente protegidos com **diodos de desvio (by-pass)**, para impedir que, em uma associação série, um módulo operando em condições anormais influencie negativamente no desempenho do arranjo como um todo. Este diodo serve como um caminho alternativo para a corrente e limita a dissipação de calor na célula defeituosa, a localização do diodo de by-pass e ilustrado na Figura 5. Geralmente alguns fabricantes fornecem o diodo de passagem já instalado na caixa de conexões do módulo.

Figura 5- Possível ligação para um diodo bypass entre células.

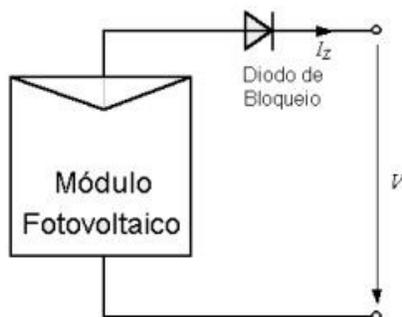


Fonte: (BRITO,2006).

O **diodo de bloqueio** é outro componente de proteção usado em conexões de módulos ou conjuntos série de módulos em paralelo, para impedir que os módulos fotovoltaicos atuem como carga para as baterias em períodos de indisponibilidade de geração, ou seja impedir o surgimento de uma corrente negativa fluindo pelas células. Esta corrente pode causar queda na eficiência das células e, em caso mais drástico, a célula pode ser desconectada do arranjo causando assim a perda total do fluxo de energia do

módulo. Além disso Impedem também que módulos operando em condições normais injetem correntes elevadas em um grupo de módulos em condições anormais de funcionamento. O esquemático da localização do diodo de bloqueio é visto na Figura 6.

Figura 6- Diodo de bloqueio.

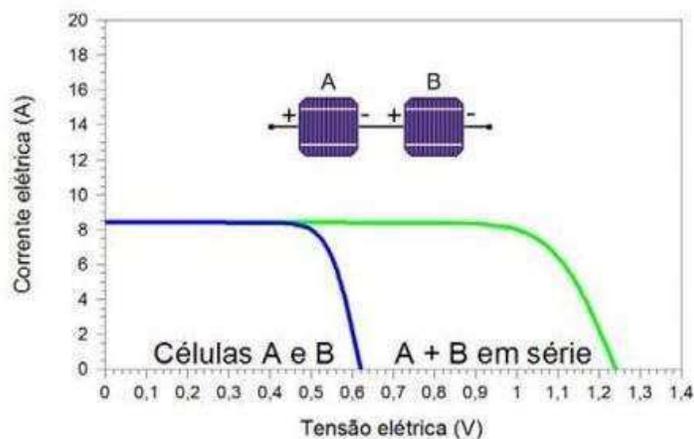


Fonte: (BRITO,2006).

Na associação em paralelo, o processo é inverso ao anterior; a corrente final do dispositivo fotovoltaico (células, módulos ou arranjos fotovoltaicos) é igual à soma das correntes e a tensão final é igual à tensão de um único módulo. Quando a ligação é feita em paralelo, os terminais positivos dos dispositivos são interligados entre si, assim como os terminais negativos. As correntes elétricas são somadas, permanecendo inalterada a tensão.

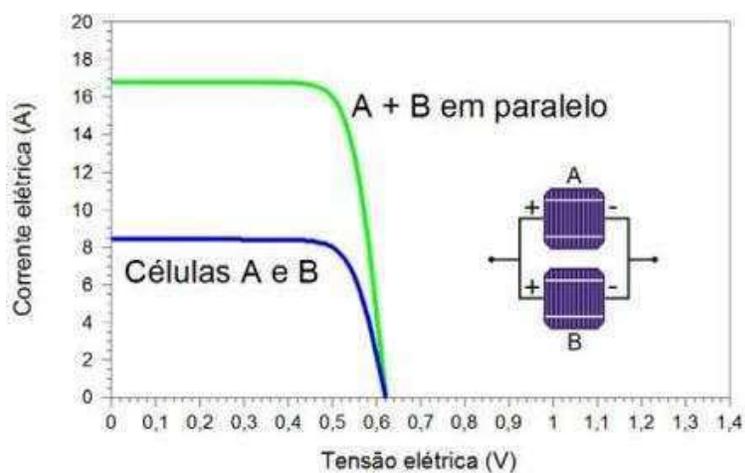
Figura 7 e Figura 8 representam o efeito da associação em série e em paralelo na curva I-V do módulo fotovoltaico.

Figura 7- Curvas I-V de duas células fotovoltaicas de silício cristalino conectadas em série.



Fonte: (Pinho e Galdino,2014).

Figura 8- Curvas I-V de duas células fotovoltaicas de silício cristalino conectadas em paralelo.

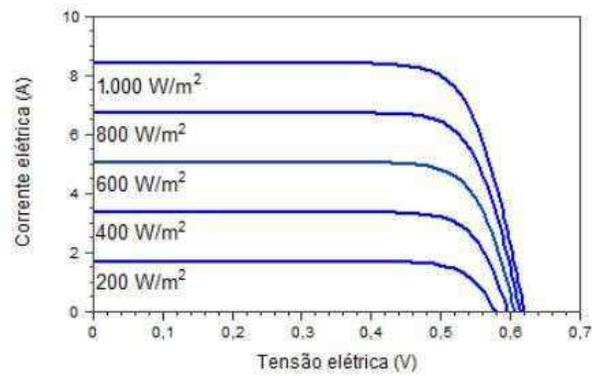


Fonte: (Pinho e Galdino,2014)

2.6 PARÂMETROS EXTERNOS QUE AFETAM AS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

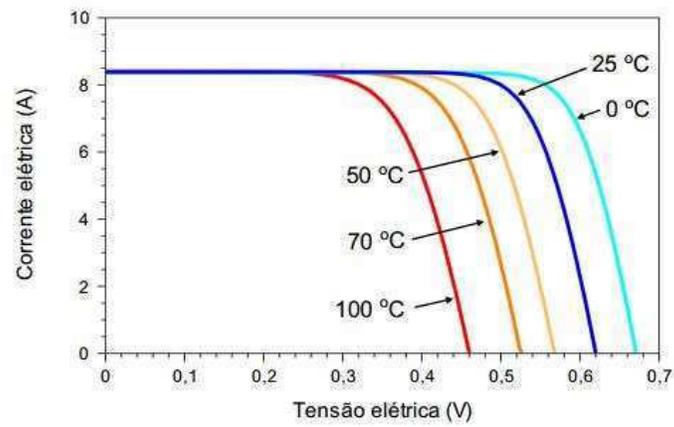
Diferentemente de outras tecnologias, os sistemas fotovoltaicos dificilmente operam em condições nominais de funcionamento. A intensidade luminosa (irradiância) e a temperatura das células influenciam as características I-V de um painel. A temperatura tem um efeito mais destacado sobre a tensão e a potência, de modo que ao aumentar a temperatura, estas diminuem. Baixos níveis de irradiância reduzem a corrente gerada sem causar redução considerável à tensão. Em face das diferentes condições de irradiância e de temperatura, um sistema fotovoltaico raramente entrega a sua potência nominal. A Influência da variação da irradiância solar e da temperatura podem ser vistas nas curvas s características I-V mostradas na Figura 9 e na Figura 10 respectivamente.

Figura 9- Influência da variação da irradiância solar na curva característica I-V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino na temperatura de 25 °C.



Fonte: (Pinho e Galdino,2014).

Figura 10-Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V (para irradiância de 1.000 W/m2, espectro AM1,5).



Fonte: (Pinho e Galdino,2014).

3 ENERGIA EÓLICA

A tecnologia de geração eólica está baseada no aproveitamento da energia cinética do vento. Este aproveitamento foi realizado durante séculos na forma de energia mecânica em aplicações como barcos à vela, moinhos de vento, etc., mas foi durante o último século principalmente quando começou a ser utilizado também para produzir eletricidade (Arribas, L,2013).

3.1 BREVE HISTÓRICO

Com o avanço da agricultura, o homem necessitava cada vez mais de ferramentas que o auxiliassem nas diversas etapas do trabalho. Tarefas como a moagem dos grãos e o bombeamento de água exigiam cada vez mais esforço braçal e animal. Isso levou ao desenvolvimento de uma forma primitiva de moinho de vento, utilizada no beneficiamento dos produtos agrícolas, que constava de um eixo vertical acionado por uma longa haste presa a ela, movida por homens ou animais caminhado numa gaiola circular (DUTRA, R,2008).

O primeiro uso da energia eólica de que se tem conhecimento é a utilizada nos barcos à vela. Esta tecnologia teve um importante impacto, posteriormente, no desenvolvimento dos moinhos de vento do tipo vela.

O primeiro registro histórico da utilização da energia eólica para bombeamento de água e moagem de grãos através de cata-ventos é proveniente da Pérsia, por volta de 200 A.C. Esse tipo de moinho de eixo vertical veio a se espalhar pelo mundo islâmico sendo utilizado por vários séculos. Acredita-se que antes da invenção dos cata-ventos na Pérsia, a China (por volta de 2000 A.C.) e o Império Babilônico (por volta 1700 A.C) também utilizavam cata-ventos rústicos para irrigação (CHESF-BRASCEP, 1987). (SHEPHERD, 1994).

Mesmo com baixa eficiência devido a suas características, os cata ventos primitivos apresentam vantagens importantes para o desenvolvimento das necessidades

básicas de bombeamento d'água ou moagem de grãos, substituindo a força motriz humana ou animal (DUTRA, R,2008).

A introdução dos cata-ventos na Europa deu-se, principalmente, no retorno das Cruzadas há 900 anos. As máquinas primitivas persistiram até o século XII quando começaram a ser utilizados moinhos de eixo horizontal na Inglaterra, França e Holanda, entre outros países. Os moinhos de vento de eixo horizontal do tipo “holandês” foram rapidamente disseminados em vários países da Europa. Durante a Idade Média, na Europa, a maioria das leis feudais incluía o direito de recusar a permissão à construção de moinhos de vento pelos camponeses, o que os obrigava a usar os moinhos dos senhores feudais para a moagem dos seus grãos. Com o desenvolvimento tecnológico das pás, sistema de controle, eixos etc, o uso dos moinhos de vento propiciou a otimização de várias atividades utilizando-se a força motriz do vento. Na Holanda, entre os séculos XVII a XIX, o uso de moinhos de vento em grande escala esteve amplamente relacionado com a drenagem de terras cobertas pelas águas. (DUTRA, R,2008).

Um importante marco para a energia eólica na Europa foi a Revolução Industrial no final do Século XIX. Com o surgimento da máquina a vapor, iniciou-se o declínio do uso da energia eólica na Holanda. Já no início do século XX, existiam apenas 2.500 moinhos de ventos em operação, caindo para menos de 1.000 no ano de 1960 (CHESF-BRASCEP, 1987).

A utilização de cata-ventos de múltiplas pás destinados ao bombeamento d'água desenvolveu-se de forma efetiva, em diversos países, principalmente nas suas áreas rurais. Acredita-se que, desde a segunda metade do século XIX, mais de 6 milhões de cata-ventos já teriam sido fabricados e instalados somente nos Estados Unidos para o bombeamento d'água em sedes de fazendas isoladas e para abastecimento de bebedouros para o gado em pastagens extensas (CHESF-BRASCEP,1987).

3.1.1 DESENVOLVIMENTO DOS AEROGERADORES NO SÉCULO XX

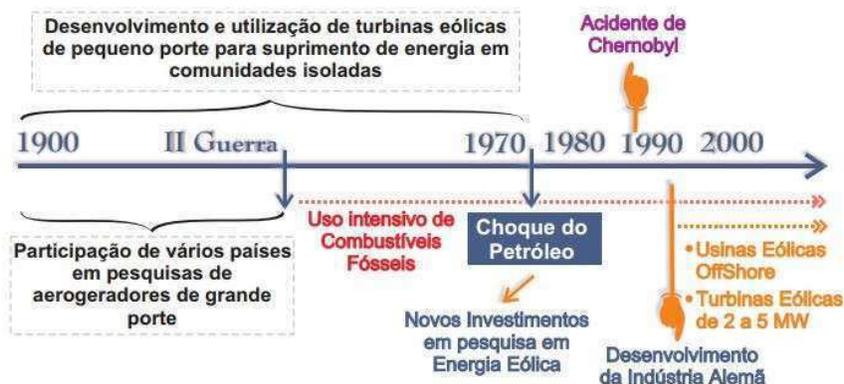
Com o avanço da rede elétrica, foram feitas, também no início do século XX, várias pesquisas para o aproveitamento da energia eólica em geração de grandes blocos de energia. Enquanto os Estados Unidos estavam difundindo o uso de aero geradores de pequeno porte nas fazendas e residências rurais isoladas, a Rússia investia na conexão de aerogeradoresde médio e grande porte diretamente na rede (DUTRA, R,2008).

O início da adaptação dos cata-ventos para geração de energia elétrica teve início no final do século XIX. Em 1888, Charles F. Brush, um industrial voltado para eletrificação em campo, ergueu na cidade de Cleveland, Ohio, o primeiro cata-vento destinado à geração de energia elétrica. Tratava-se de um cata-vento que fornecia 12kW em corrente contínua para carregamento de baterias, as quais eram destinadas, sobretudo, para o fornecimento de energia para 350 lâmpadas incandescentes (VOADEN,1943 apud SHEPHERD, 1994) (PUTNAM,1948 apud SHEPHERD, 1994) (KOEPPPL,1982 apud SHEPHERD, 1994).

Um dos primeiros passos para o desenvolvimento de turbinas eólicas de grande porte para aplicações elétricas foi dado na Rússia em 1931. O aerogerador Balaclava (assim chamado) era um modelo avançado de 100kW conectado, por uma linha de transmissão de 6,3kV de 30km, a uma usina termelétrica de 20MW. Essa foi a primeira tentativa bem-sucedida de se conectar um aerogerador de corrente alternada com uma usina termelétrica (SEKTOROV, 1934 apud SHEPHERD, 1994).

A energia medida foi de 280.000kWh.ano, o que significa um fator médio de utilização de 32%. O gerador e o sistema de controle ficavam no alto da torre de 30 metros de altura, e a rotação era controlada pela variação do ângulo de passo das pás. O controle da posição era feito através de uma estrutura em treliças inclinada apoiada sobre um vagão em uma pista circular de trilhos (CHESF-BRASCEP, 1987) (SHEPHERD, 1994). A Figura 11 mostra o esquemático dos - Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no Século XX.

Figura 11- Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no Século XX.



Fonte:(Dutra, 2001).

A Segunda Guerra Mundial (1.939-1.945) contribuiu para o desenvolvimento dos aerogeradores de médio e grande porte, uma vez que os países em geral empenhavam grandes esforços no sentido de economizar combustíveis fósseis. Os Estados Unidos desenvolveram um projeto de construção do maior aerogerador até então projetado. Tratava-se do aerogerador Smith-Putnam cujo modelo apresentava 53,3m de diâmetro, uma torre de 33,5m de altura e duas pás de aço com 16 toneladas. Na geração elétrica, foi usado um gerador síncrono de 1.250kW com rotação constante de 28rpm, que funcionava em corrente alternada, conectado diretamente à rede elétrica local (VOADEN,1943 apud SHEPHERD, 1994) (PUTNAM,1948 apud SHEPHERD, 1994) (KOEPL,1982 apud SHEPHERD, 1994).

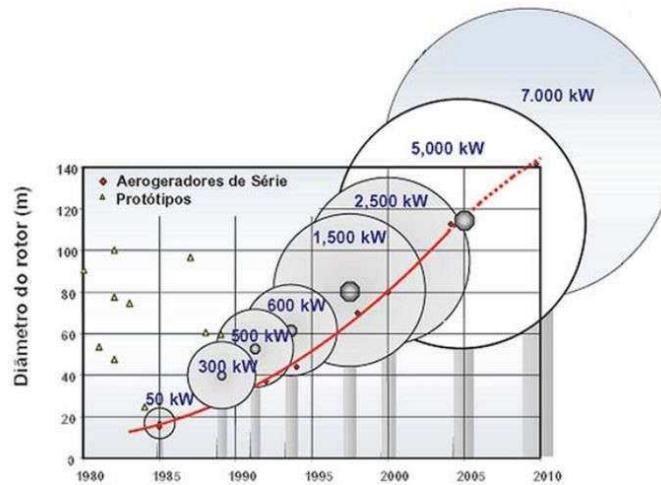
Esse aerogerador iniciou seu funcionamento em 10 de outubro de 1941, em uma colina de Vermont chamada Grandpa's Knob. Em março de 1945, após quatro anos de operação intermitente, uma das suas pás (que eram metálicas) quebrou-se por fadiga (SHEPHERD, 1994) (EWEA, 1998A).

A Dinamarca, no período inicial da 2ª Guerra Mundial, apresentou um dos mais significativos crescimentos em energia eólica em toda Europa. Esse avanço deu-se sob a direção dos cientistas dinamarqueses Poul la Cour e Johannes Juul (JUUL, 1964 apud DIVONE, 1994).

De uma forma geral, após a Segunda Guerra Mundial, o petróleo e grandes usinas hidrelétricas se tornaram extremamente competitivos economicamente, e os aerogeradores foram construídos apenas para fins de pesquisa, utilizando e aprimorando técnicas aeronáuticas na operação e desenvolvimento de pás, além de aperfeiçoamentos no sistema de geração (DUTRA, R,2008).

O comércio de aerogeradores no mundo se desenvolveu rapidamente em tecnologia e tamanhos durante os últimos 15 anos. Na Figura 12 é mostrado o impressionante desenvolvimento do tamanho e da potência de aerogeradores desde 1985.

Figura 12- Evolução dos aerogeradores desde 1985 até 2005.



Fonte: (DUTRA, R,2008).

3.2 O RECURSO EÓLICO

Os ventos são resultantes do movimento do ar na atmosfera terrestre e, assim como outras fontes renováveis de energia, são originalmente resultantes da radiação solar que atinge a Terra (PINHO et al., 2008).

Os ventos são correntes de ar motivadas pelo aquecimento desigual da atmosfera devido à radiação solar incidente. As diferentes temperaturas do ar criam zonas com diferentes pressões atmosféricas. Como consequência desta desigualdade de pressões, produz-se um movimento das massas de ar, das zonas de alta pressão às zonas de baixa pressão. Associado ao movimento de uma massa há uma energia, denominada energia cinética, que depende de sua massa e sua velocidade (Arribas, L. ,2013).

Segundo DUTRA, R. (2008) existem locais no globo terrestre nos quais os ventos jamais cessam de “soprar”, pois os mecanismos que os produzem (aquecimento no equador e resfriamento nos polos) estão sempre presentes na natureza. São chamados de ventos planetários ou constantes, e podem ser classificados em:

- **Alísios:** ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes.
- **Contra-Alísios:** ventos que sopram do Equador para os pólos, em altas altitudes.
- **Ventos do Oeste:** ventos que sopram dos trópicos para os pólos.
- **Polares:** ventos frios que sopram dos pólos para as zonas temperadas.

Tendo em vista que o eixo da Terra está inclinado de 23,5 graus em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol, variações sazonais na distribuição de radiação recebida na superfície da Terra resultam em variações sazonais na intensidade e duração dos ventos, em qualquer local da superfície terrestre. Como resultado surgem os ventos continentais ou periódicos e compreendem as monções e as brisas (DUTRA, R,2008).

Devido à grande variabilidade do vento é bastante complexa a avaliação do recurso eólico de um local, o que requer campanhas de medida com coleta de dados do vento e períodos de medida longos para poder realizar uma avaliação adequada (Arribas, L. ,2013).

3.3 CONVERSÃO EÓLICA

A principal característica do vento a ser observado quando se deseja o aproveitamento eólico para geração de eletricidade é a velocidade. A energia utilizada em uma turbina eólica é a energia cinética associada a uma coluna de ar. Ao reduzir a velocidade do deslocamento da massa de ar, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica através da rotação das pás. Embora os aerogeradores consigam transformar a energia do vento em energia eléctrica, não conseguem extrair completamente a potência disponível no vento. Diversos fatores limitam a potência efetivamente aproveitada por um sistema eólico para conversão em energia eléctrica.

As fontes de perdas em um aerogerador, que contribuem para a redução da potência final (eléctrica), são as perdas aerodinâmicas nas pás, as perdas nos componentes da máquina, tais como mancais, caixa multiplicadora de velocidade e gerador, além das perdas relacionadas ao fato de o rotor eólico operar apenas em uma determinada faixa de velocidades de vento (PINHO et al., 2008).

O coeficiente de potência, CP, representa a fração de potência do vento que pode efetivamente ser extraída pelas pás do rotor. A máxima energia que um aerogerador consegue transformar em energia eléctrica é denominado limite de Betz, em homenagem ao pesquisador alemão A. Betz, que em 1927 estudou o comportamento de uma corrente de ar em um aerogerador.

O limite de Betz indica que o rendimento máximo teórico de uma turbina eólica é de 59% (C_p máximo = 0,59). Numa aplicação real o C_p é da ordem dos 0,3 a 0,4. (Pedro Alexandre da Silva Costa Duarte,2010).

Isto significa que, se o processo de extração de energia do vento não tiver perdas, somente 59% da energia disponível no vento pode ser convertida em potência mecânica por uma turbina eólica.

A potência contida no vento é proporcional ao cubo de sua velocidade, tornando evidente a importância deste parâmetro em projetos de sistemas eólicos. (PINHO et al., 2008).

Parte do total da energia contida no vento é captada pelas turbinas eólicas e transformada em energia mecânica no eixo (Arribas, L., 2013).

A potência mecânica (P , expressa em watts) que chega ao aerogerador depende dos seguintes fatores de acordo com a Equação 1.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3. \quad (1)$$

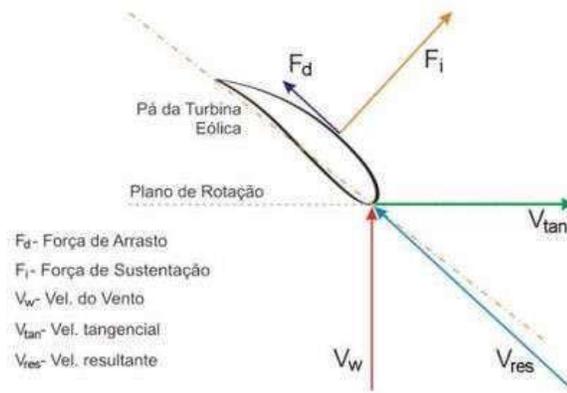
Onde;

- A é área de captação em m^2 ;
- ρ é densidade do ar em kg/m^3 ;
- v é a **velocidade do vento** elevada ao cubo, em m/s ;
- P é a potência mecânica que chega ao aerogerador.

Força de arrasto é força que atua sobre uma área perpendicular à direção do vento. Força de sustentação é componente perpendicular à velocidade relativa onde, velocidade relativa é a soma vetorial da velocidade do vento e a velocidade das pás.

Normalmente, como as turbinas que são movidas pela força de arrasto, possuem baixa velocidade de rotação e alto torque, elas são utilizadas, principalmente, para moer grãos e bombear água. Enquanto que, as turbinas que utilizam a força de sustentação possuem alta velocidade e baixo torque, desta forma, sendo mais adequadas para a geração de eletricidade (Marques, 2004). Na Figura 13 é possível ver as principais forças atuantes em uma pá de um aerogerador.

Figura 13- Principais forças atuantes em uma pá de aerogerador.



Fonte:(Montezano, 2008).

3.4 TURBINA EÓLICA

As turbinas eólicas é o elemento responsável pela transformação a energia mecânica proveniente dos ventos em energia elétrica, é também conhecido como aerogerador.

O rotor, constituído pelo cubo, cone e pás, o gerador, a torre e a nacelle. É o elemento o responsável direto pelo aproveitamento da energia cinética dos ventos. É constituído por um determinado número de pás, numa turbina o importante é a área varrida pelas pás e não o número de pás. A potência das turbinas é limitada pelo seu tamanho (maior potência implica maior área varrida pelas pás). Estas pás utilizam a força dos ventos para impulsionar o rotor e fazê-lo girar em torno de seu eixo.

Quanto à posição do eixo de rotação, as turbinas podem ser classificadas como turbinas de eixo vertical e eixo horizontal.

Turbinas eólicas de eixo horizontal possuem seu eixo de rotação situado paralelamente à direção do vento, sendo os modelos mais comuns aqueles constituídos por três pás. Já as turbinas de eixo vertical possuem seu eixo de rotação situado perpendicularmente à direção do vento, e as mais comuns são os modelos Darrieus e Savonius (PINHO et al., 2008).

Os aerogeradores de eixo vertical caracterizam-se por disporem as pás das turbinas de forma a rodarem sobre um eixo vertical. O eixo de rotação destas turbinas é perpendicular ao solo e perpendicular à direção do vento. As turbinas com rotores de eixo vertical têm a vantagem fundamental de não precisar de nenhum sistema de orientação

ativo para captar a energia do vento. Também têm a vantagem de os seus componentes poderem ser montados ao nível do solo. Como principal inconveniente estão a dificuldade de realizar a regulação de potência ante ventos altos neste tipo de turbinas, a flutuação do par motor no giro da aeroturbina, bem como o menor rendimento do sistema de captação com relação às aeroturbinas de eixo horizontal (Arribas, L. ,2013).

Como algumas desvantagens em relação às turbinas de eixo horizontal, as de eixo vertical do tipo Darrieus não partem automaticamente e seu torque flutua à medida que as pás se movem a favor e contra a direção do vento (walker e jenkins, 1997). Um exemplo de turbinas de eixo vertical pode ser visto na Figura 14.

Figura 14-Aerogerador experimental de eixo vertical.



Fonte: (SANDIA, 2006).

Os principais tipos de rotores de eixo vertical são Darrieus, Savonius e turbinas com torre de vórtices. Os rotores do tipo Darrieus são movidos por forças de sustentação e constituem-se de lâminas curvas (duas ou três) de perfil aerodinâmico, atadas pelas duas pontas ao eixo vertical (DUTRA, R,2008).

Os rotores de eixo horizontal são os mais comuns, principalmente aquelas de três pás, são atualmente muito mais utilizadas para geração de energia elétrica do que as de eixo vertical, caracterizam-se por disporem as pás das turbinas de forma a rodarem sobre um eixo horizontal, ou seja, gira suas pás em um plano perpendicular à direção do vento incidente. Um exemplo de turbinas de eixo vertical pode ser visto na Figura 15.

Figura 15- Aero gerador de eixo horizontal.



Fonte: (DUTRA, R,2008).

Os aerogeradores podem ser classificados quanto a orientação de seu rotor com relação ao vento, o disco varrido pelas pás pode estar a jusante do vento (a favor do vento) ou a montante do vento (contra o vento), o que pode ser visto na Figura 16.

Rotores do tipo a favor do vento apresentam como vantagem o fato de não necessitarem de mecanismos de orientação ao vento; porém, a própria torre torna-se um obstáculo ao fluxo de vento, o que pode ocasionar maiores perdas. Esta desvantagem torna esses tipos de rotores menos utilizados que os contra o vento, pois estes, apesar de necessitarem de dispositivos de orientação, são mais eficientes (PINHO et al., 2008).

Figura 16- Tipos de rotores com relação à sua orientação, da esquerda para a direita: contra e a favor do vento.



Fonte: (PINHO et al., 2008).

3.5 PEQUENOS GERADORES EÓLICOS

A mini eólica tem um grande potencial, mas ainda existem desafios a superar quando comparado aos grandes parques eólicos que já alcançaram um grande desenvolvimento. A tecnologia da mini-eólica é claramente diferente da utilizada em grandes aerogeradores. Estas diferenças afetam a todos os subsistemas: principalmente ao sistema elétrico e ao de controle, mas também ao desenho do rotor como pode ser visto na Figura 17.

A maioria dos aerogeradores de pequena potência existentes no mercado foram construídos de forma quase artesanal (Arribas, L,2013).

Figura 17- Microaerogerador de eixo horizontal Air Breeze, Southwest Windpower.



Fonte: Air Breeze.

A Tabela 3 apresenta a classificação dos aerogeradores de pequeno porte comumente encontrado no comércio.

Tabela 3- Classificação de aerogeradores de pequena potência.

Potência Nominal (kW)	Área de varredura de rotor (m ²)	Subcategoria
$P_{nominal} < 1kW$	$A < 4.9 m^2$	Pico eólico
$1kW < P_{nominal} < 7kW$	$A < 40 m^2$	Micro eólico
$7kW < P_{nominal} < 50kW$	$A < 200 m^2$	Mini eólica
$50kW < P_{nominal} < 100kW$	$A < 300m^2$	(Por definir)

Fonte: (Arribas, L,2013).

3.5.1 ROTOR

Equipamento responsável em converter energia dos ventos em energia eléctrica. Isto é possível devido ao movimento que o vento vai exercer sobre as pás da hélice que incorporam o dispositivo. A maioria das microeólicas utiliza geradores ímãs permanentes. Este gerador é mais simples e robusto e muito aproximado ao modelo ideal para as micro e mini eólica. (DM Ricardo Faria ,2010)

A utilização dos geradores de ímanes permanentes pode originar alguns problemas no micro eólico que funcionam com ventos mais baixos devido ao rotor estar parado. Os geradores de ímanes permanentes têm o inconveniente de quando os ímãs estão alinhados com os enrolamentos do estator, o eixo poder bloquear, criando assim uma resistência ao movimento entre eles, e para resolver esta situação decidiu-se inclinar os ímanes (GIPE, 2000).

Boa parte dos aerogeradores são de eixo horizontal a barlavento (o vento chega pela frente). Os rotores podem ser duas pás, a rotores de 6 pás, os mais utilizados são os de três pás, devido principalmente a seu melhor comportamento dinâmico e a um maior rendimento. O material das pás é quase sempre fibra de vidro/poliéster e, em alguns casos, madeira.

Uma das características mais notáveis de alguns geradores de ímanes permanentes usados pelos fabricantes de mini eólicas é o seu desenho invertido, ou seja, a carcaça na qual os ímãs estão montados, também chamada de cartucho magnético, roda por fora do estator, que é a parte estacionária do gerador. Nesta configuração, as pás podem ser aparafusadas diretamente na carcaça, o que ocorre a maior parte das vezes. Outro benefício desta configuração é que a força centrífuga pressiona os ímanes contra a parede da carcaça. (DM Ricardo Faria ,2010)

3.5.2 SISTEMA DE REGULAÇÃO DE POTÊNCIA E DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO

A principal diferença entre o sistema de regulação de um aerogeradores de grande porte e de um pequeno aerogerador é seu projeto de regulação passivo (mecânicos), enquanto nos aerogeradores de grande porte são geralmente ativos (eléctrico-eletrônicos), o que torna o projeto mais caro, o que não seria interessante para pequenos aerogeradores.

As principais soluções para regular a potência e a velocidade de giro nos pequenos aerogeradores de acordo com Arribas, L. (2013) são:

- “**Sem regulação**”, na qual o aerogerador é projetado para poder suportar as cargas produzidas em todas as condições de operação, incluídas as velocidades de giro que possam ser apresentadas no funcionamento a vácuo.
- “**Regulação por desorientação**” na qual o eixo do rotor se desalinha no plano horizontal com relação à direção do vento incidente. Existem distintas soluções para que se produza esta desorientação do rotor, a mais utilizada é através de um desenho em que o centro de impulso do rotor não está alinhado com o centro do rolamento de orientação.
- “**Regulação por lançamento**”, semelhante ao anterior, mas no qual o desalinhamento ocorre no plano vertical.
- “**Regulação por mudança de passo**”. A mudança de passo ativa é a solução utilizada nos aerogeradores maiores, mas raramente é usada na mini-eólica, porque na maior parte dos casos se utilizam sistemas de mudança de passo passivos, nos quais a variação do ângulo de ataque das pás se produz através de sistemas centrífugos passivos.
- “**Regulação por perda aerodinâmica**”, semelhante à utilizada em grandes aerogeradores, consiste em uma redução do coeficiente de potência a partir de certa velocidade de vento, que ocorre pelo comportamento das pás, sem necessidade de atuação externa.

3.5.3 SISTEMA DE FRENAGEM

Geralmente utiliza-se o sistema de controle de voltas como sistema de frenagem. Nos aerogeradores que possuem apenas um sistema de frenagem, a solução geralmente se dá através de **curto-circuito do gerador elétrico**. Quando se utilizam dois sistemas de frenagem, o primeiro deles quase sempre é o freio mecânico, ou através de posicionamento das pás na posição de “**bandeira**”. Para o segundo sistema utiliza-se freio mecânico, ou por curto-circuito do gerador elétrico, dependendo principalmente da solução utilizada para o primeiro sistema de frenagem (Arribas, L,2013).

3.5.4 SISTEMA DE ORIENTAÇÃO

Os aerogeradores podem ser classificados quanto a orientação de seu rotor com relação ao vento, o disco varrido pelas pás pode estar a jusante do vento (a favor do vento) ou a montante do vento (contra o vento). Aerogeradores de tipo a favor do vento necessitam um sistema de orientação que mantenha a máquina alinhada com o vento, Aerogeradores contra o vento e nas que o próprio rotor atua como cata-vento, não necessitam um sistema de orientação.

O sistema de orientação utilizado em grandes aerogeradores é um sistema ativo. Este sistema não é utilizado em mini-eólica. O principal sistema de orientação para os aerogeradores de pequena potência do tipo a favor do vento é um sistema passivo, mecânico, (por cata-vento de cauda). O leme cata-vento de orientação utilizado é, indistintamente, reto ou elevado (a fim de diminuir a ação do rotor sobre o leme).

3.5.5 GERADORES ELÉTRICOS

Boa parte dos aerogeradores de pequena potência usam conexão direto e com o rotor, sem existência de caixa de multiplicação.

Nos aerogeradores de micropotência (< 3kW) o tipo de gerador utilizado praticamente em todos os desenhos é um alternador de ímãs permanentes (PMG, sigla em inglês) de 4, 6, 8 ou 10 pares de polos. No caso de aerogeradores na gama dos 3-30 kW, ainda que exista uma tendência generalizada ao uso de PMG, também se utiliza a opção de geradores de indução (Arribas, L,2013).

3.5.6 CONTROLE ELETRÔNICO

Na saída do gerador utiliza sistemas de regulação eletrônicos, porque em sua grande maioria os geradores elétricos utilizados na geração de pequeno porte hoje em dia são trifásicos de tensão e frequência variáveis, enquanto a rede elétrica é corrente alternada sob tensão e frequência estáveis. Os elementos normalmente utilizados para conseguir esta adaptação podem incluir: Regulador ou controlador de carga e inversor.

3.6 CONFIGURAÇÕES DOS SISTEMAS EÓLICOS

Um sistema eólico pode ser aplicado em três situações distintas: sistemas isolados (Sistemas autônomos) para suprimento de necessidades básicas em locais remotos não atendidos pela rede elétrica, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede (Geração Distribuída), para entrega parcial ou total da energia gerada à rede elétrica. A potência do aerogerador a ser utilizado geralmente depende da aplicação, como é mostrado na Figura 18.

Figura 18- Considerações sobre o tamanho dos aerogeradores e suas principais aplicações.



Fonte: (DUTRA, R,2008).

3.6.1 SISTEMAS ISOLADOS

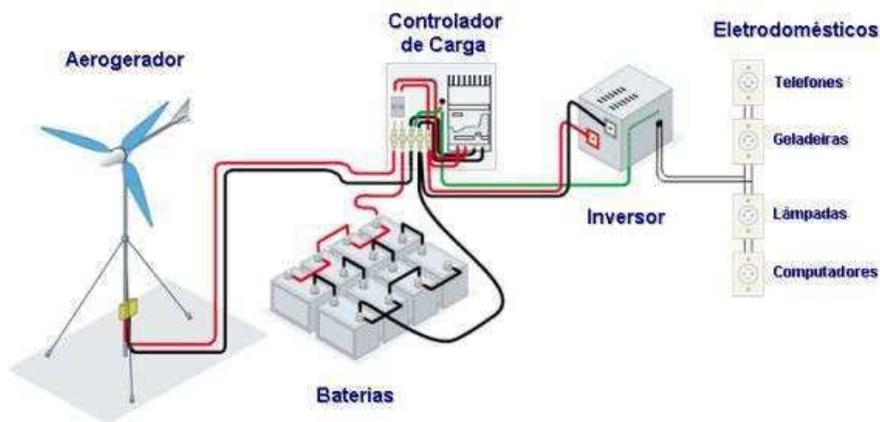
Os sistemas isolados, são aqueles que não estão conectados à rede elétrica de grande tamanho e são, portanto, responsáveis pelo controle e pela frequência do sistema. Existe a necessidade de utilização de acumuladores de energia em sistemas isolados, para garantir a autonomia do sistema.

Este armazenamento pode ser feito através de baterias, com o objetivo de utilizar aparelhos elétricos, ou na forma de energia gravitacional, com a finalidade de armazenar a água bombeada em reservatórios para posterior utilização. (DUTRA, R,2008).

Como os sistemas isolados usam baterias para armazenar energia então existe necessidade de utilização de um controlador de carga, e no caso de alimentação de

equipamentos que trabalham em corrente alternada também há a necessidade do uso de inversores. A Figura 19 configuração de um sistema eólico isolado.

Figura 19- Configuração de um sistema eólico isolado.



Fonte: (DUTRA, R,2008).

3.6.2 SISTEMAS HÍBRIDOS

Sistemas híbridos consistem em sistemas de geração de energia, isolados ou conectados à rede, com a presença de uma ou mais fontes complementares como, por exemplo, turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos, entre outras, como visto na Figura 20.

Fontes distintas são utilizadas em conjunto com a eólica para garantir maior confiabilidade ao sistema, principalmente em casos isolados, quando, em eventuais períodos de escassez de ventos, outras fontes possam ser responsáveis pelo suprimento de energia elétrica, evitando, assim, situações de interrupção no fornecimento (PINHO et al., 2008).

A utilização de várias formas de geração de energia elétrica aumenta a complexidade do sistema e exige a otimização do uso de cada uma das fontes (DUTRA, R,2008).

Figura 20-Configuração de um sistema híbrido solar-eólico-diesel.

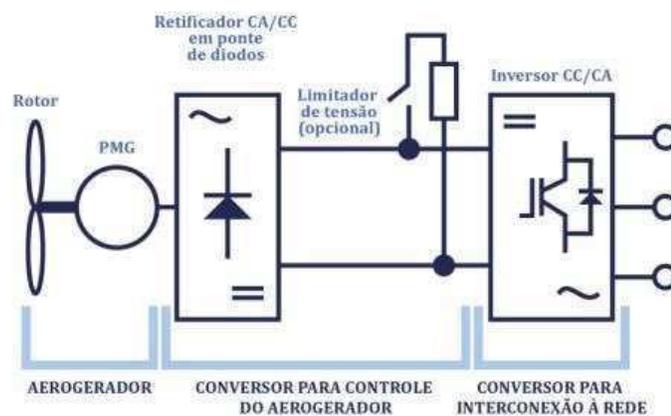


Fonte: (DUTRA, R,2008).

3.6.3 SISTEMAS INTERLIGADOS À REDE

Sistemas interligados à rede, sistemas compostos por geradores conectados a grandes redes elétricas, em que há um operador do sistema que se encarrega do controle geral (esta aplicação é chamada com frequência de conexão à rede). Sistemas interligados à rede não há necessidade de componentes armazenadores de energia. O esquemático do sistema pode ser visto na Figura 21.

Figura 21- Configuração típica para mini-eólica conectada à rede.



Fonte: (Arribas, L,2013).

3.7 SISTEMA DE ARMAZENAMENTO E CONDICIONAMENTO DE POTENCIA

Tanto o sistema fotovoltaico quanto o sistema mine-eólica é constituído por um bloco gerador, um bloco de condicionamento de potência e, opcionalmente, um bloco de armazenamento.

O bloco gerador contém os arranjos fotovoltaicos, constituídos por módulos fotovoltaicos em diferentes associações, o cabeamento elétrico que os interliga e a estrutura de suporte. O bloco de condicionamento de potência pode ter conversores c.c.-c.c., seguidor de ponto de potência máxima (SPPM), inversores, controladores de carga (se houver armazenamento) e outros dispositivos de proteção, supervisão e controle. Finalmente, o bloco de armazenamento é constituído por acumuladores elétricos (baterias) e/ou outras formas de armazenamento (Pinho e Galdino,2014).

3.7.1 SISTEMA DE ACUMULAÇÃO DE ENERGIA

A natureza das fontes renováveis solar e eólica é intrinsecamente variável no tempo, dependendo dos ciclos diários, das estações do ano e das variações aleatórias da atmosfera. Em sistemas isolados da rede elétrica, o uso de dispositivos de armazenamento de energia faz-se necessário para atender a demanda em períodos nos quais a geração é nula ou insuficiente. Deste modo, é possível utilizar a energia no momento em que seja necessária, que não precisa necessariamente coincidir com o momento em que é gerada.

No caso particular dos sistemas híbridos para produção de eletricidade, o adequado atendimento elétrico da aplicação exige, portanto, o armazenamento de energia nos momentos em que a produção excede a demanda, para utilizá-la em uma situação inversa. Denomina-se de sistema de armazenamento à parte do sistema que se encarrega de realizar tal função. Historicamente, o sistema de armazenamento mais utilizado em sistemas híbridos é aquele constituído por acumuladores eletroquímicos (ou baterias) de chumbo-ácido (PINHO et al., 2008).

Nas aplicações isoladas dos sistemas híbridos, o sistema de acumulação de energia utilizado com maior frequência são as baterias de chumbo-ácido, em função do seu menor custo e maturidade, a acumulação de água em depósitos para seu uso posterior e as baterias alcalinas de Ni-Cd ou Ni-Fe.

As vantagens de utilizar baterias de chumbo-ácido é que estão disponíveis comercialmente em qualquer lugar do mundo, a um preço relativamente baixo, que são fiáveis e funcionam em uma ampla gama de temperaturas, com um alto número de ciclagens e baixo nível de auto-descarga. Desvantagens são seu elevado peso e problemas associados com a operação com cargas de baixo valor, bem como possíveis problemas em caso de sobrecarga (Alonso, M.C., García, F.S. e Silva, J.P ,2013).

Outros tipos de baterias podem ser usados para o armazenamento de energia elétrica como as baterias automotivas, estacionárias, de tração e solares. Que serão descritas a seguir.

- **Automotivas:** Também conhecidas em língua inglesa como SLI (starting, lighting, ignition), são baterias projetadas fundamentalmente para descargas rápidas com elevadas taxas de corrente e com reduzidas profundidades de descarga. Esta condição é típica na partida de motores de combustão interna. Tem maior número de placas e placas mais finas, em relação aos outros tipos. Não são adequadas ao uso em sistemas fotovoltaicos, pois tem baixa vida útil para operação em regime de ciclagem (Pinho e Galdino,2014);
- **Estacionárias:** Projetadas para permanecerem em flutuação e serem solicitadas ocasionalmente (backup). Além disso, podem operar com regimes de carga elevados. Dentre as principais características destacam-se a moderada resistência ao processo de ciclagem e o baixo consumo de água (Alonso, M.C., García, F.S. e Silva, J.P ,2013);
- **Tração:** Projetadas para operar com ciclos profundos e frequentes e regimes de descarga moderados. Indicadas para alimentar veículos elétricos como, por exemplo, empilhadeiras. Suas principais características são a alta resistência à ciclagem o alto consumo de água e a manutenção frequente (Alonso, M.C., García, F.S. e Silva, J.P ,2013);
- **Fotovoltaicas (ou solares):** Projetadas para ciclos diários rasos com taxas de descarga reduzidas (descargas profundas esporádicas, da ordem de até 80%). Como características principais destacam-se a resistência ao processo de ciclagem e a pouca manutenção (Alonso, M.C., García, F.S. e Silva, J.P ,2013).

Os principais atributos para avaliação de baterias recarregáveis são: densidade de energia (volumétrica ou por peso), eficiência, capacidade, vida cíclica, taxa de autodescarga, reciclabilidade dos materiais e custo.

3.7.2 SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE POTÊNCIA

Sistema de condicionamento de potência compõem a ligação entre a geração e os sistemas de armazenamento e carga, como forme é ilustrado na Figura 22.

Segundo PINHO et al. (2008), o sistema de condicionamento de potência é composto por equipamentos (controladores de carga, retificadores, seguidores de ponto de máxima potência, inversores de tensão) cuja função principal é otimizar o controle geração/consumo visando ao aproveitamento ótimo dos recursos, aliado à qualidade e continuidade na entrega da energia ao usuário.

Figura 22- Diagrama de blocos de um sistema híbrido.



Fonte: (PINHO et al., 2008).

3.7.3 CONTROLADORES DE CARGAS

É um dispositivo eletrônico que opera em corrente contínua, cuja principal função é prevenir a sobrecarga o sobre-descarga da bateria e, aumentando a sua vida útil. Os reguladores se situam entre gerador e a bateria. Uma função adicional do regulador de carga é evitar a sobre-descarga das baterias, desconectando-as das cargas. É um equipamento normalmente associado ao arranjo fotovoltaico em sistemas híbridos. As principais características dos controladores de tensão na hora do dimensionamento são a sua capacidade, dada em amperes, e a sua tensão de operação.

O controlador de carga deve atuar em um sistema híbrido de modo a evitar que a bateria opere em condições anormais, que contribuem para a redução de sua vida útil. Os controladores devem ser utilizados com os tipos de baterias para os quais foram projetados (controladores projetados para baterias comuns de chumbo-ácido podem não ser adequados para as fotovoltaicas) (PINHO et al., 2008).

Controladores de carga são componentes críticos em sistemas fotovoltaicos isolados (SFI), pois, caso venham a falhar, a bateria poderá sofrer danos irreversíveis (Pinho e Galdino,2014).

3.7.4 RETIFICADORES

Os retificadores de tensão, ou simplesmente retificadores, são dispositivos responsáveis por converter a potência dos geradores (aerogeradores e grupos geradores a diesel) que estão conectados no barramento CA para uma potência CC, seja para carregar baterias (banco de baterias), ou para suprir eventualmente alguma carga CC. (PINHO et al., 2008).

3.7.5 INVERSORES

Para utilizar cargas convencionais de corrente alternada os sistemas fotovoltaicos devem incorporar inversores. O inversor de tensão é o equipamento responsável pela conversão da corrente contínua em corrente alternada, a energia CC pode ser proveniente, por exemplo, de baterias, células a combustível ou módulos fotovoltaicos, estes dispositivos também são conhecidos como conversores CC-CA. Suas principais características são suas tensões de operação de entrada (CC) e saída (CA), frequência de saída, potência nominal, capacidade de surto, eficiência, e forma de onda de saída.

A tensão CA de saída deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados às cargas a serem alimentadas. Adicionalmente, no caso de sistemas conectados à rede elétrica a tensão de saída do inversor deve ser sincronizada com a tensão da rede (Pinho e Galdino,2014).

Dependendo do princípio de operação, os inversores podem ser divididos em dois grandes grupos: comutados pela rede (comutação natural) e autocomutados (comutação forçada), como pode ser ilustrado na Figura 23.

Figura 23- Tipos de inversores classificados de acordo com o princípio de funcionamento.



Fonte: (Pinho e Galdino,2014).

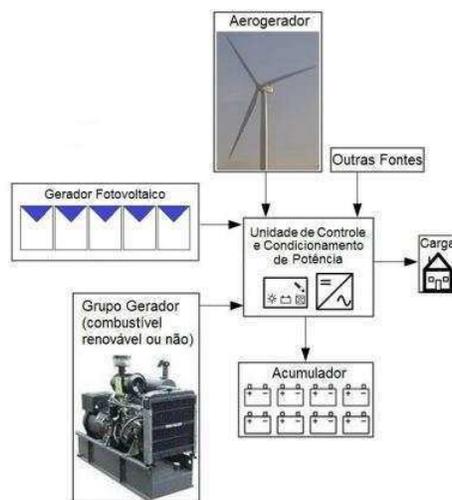
4 SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO

Sistema híbrido consiste em um sistema de geração de energia elétrica, isolado ou conectado à rede, com a presença de uma ou mais fontes complementares, como por exemplo, turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos, entre outras. A Figura 24 apresenta um esquemático de um sistema híbrido.

Segundo Barbosa. (2006) as fontes de energia híbridas devem gerar e distribuir energia elétrica, de forma otimizada e com custos mínimos, a uma determinada carga ou a uma rede elétrica, isolada ou conectada a outras redes, dependendo da disponibilidade dos recursos.

O uso de sistemas híbridos é importante principalmente em locais remotos, onde há dificuldades de acesso e a instalação do fornecimento convencional de energia elétrica é bastante elevada. Uma alternativa para o fornecimento de energia elétrica para locais remotos, seria as fontes de energia renováveis, tais como a solar (fotovoltaica), a eólica, a hídrica (de pequeno e médio porte), ou a biomassa.

Figura 24- sistema híbrido.



Fonte: (Pinho e Galdino,2014).

Os sistemas híbridos em muitos casos mostram-se bem atrativos economicamente, além de confiáveis e flexíveis. Principalmente em locais onde mais de uma fonte renovável se destaca. Uma das razões pelo qual os sistemas híbridos podem

ser em muitos casos confiáveis e flexíveis é a possibilidade de uma fonte suprir a falta temporária de outra o diminui o risco de interrupção. Em sistemas de múltiplas fontes de geração com é o caso de sistemas híbridos é necessária uma boa caracterização da demanda elétrica e dos recursos energéticos devido os custos elevados das instalações.

Devido à maior complexidade e multiplicidade de opções e o constante aperfeiçoamento dessas unidades, a forma de otimização desses sistemas é ainda hoje tema de estudos. Além disso, há de se considerar que a utilização de sistemas híbridos traz uma complexidade operacional e de manutenção do sistema que é uma questão muito desvantajosa para empreendimentos em regiões remotas (Pinho e Galdino,2014).

Inúmeros sistemas híbridos têm sido instalados em muitos países do mundo nas últimas três décadas, fundamentalmente com a finalidade de fornece eletricidade para comunidades isoladas, para pequenos sistemas de bombeamento e dessalinização de água, refrigeração, entre outras aplicações. A utilização dos sistemas híbridos teve seu início na década de 1970, provavelmente decorrente da busca de uma alternativa energética frente à crise do petróleo de 1973. A partir do final da década de 1990, a inserção desses sistemas passou também a ter como motivação a questão ambiental. Na mesma década, a maturidade das tecnologias fotovoltaica e eólica e o bom desempenho dos sistemas híbridos fotovoltaico-diesel e eólico-diesel abriram caminho para a combinação desses dois sistemas em um único, sistema híbrido fotovoltaico eólico-diesel (PINHO et al., 2008).

O primeiro sistema híbrido do Brasil corresponde ao sistema eólico-diesel de Fernando de Noronha, no estado de Pernambuco. Esse sistema foi implantado no ano de 1986, sendo composto por uma potência eólica de 75 kW e diesel-elétrica de 50 kW. Posteriormente o sistema foi repotenciado e é hoje o maior sistema eólico-diesel do país, contando com uma capacidade nominal de geração de 2,1 MW, a saber: 75 kW + 225 kW eólica e 1,8 MW diesel-elétrica (FEITOSA et alii, 2002).

Os sistemas híbridos mais utilizados são:

- Sistema eólico-diesel;
- Sistema fotovoltaico-diesel;
- Sistema fotovoltaico-eólico-diesel;
- Sistema fotovoltaico-eólico.

A principais formas de classificação dos sistemas híbridos são:

- Interligação com a rede elétrica convencional;

- Prioridade de uso das fontes de energia;
- Configuração;
- Porte.

4.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO – EÓLICO

Um sistema híbrido de geração do tipo fotovoltaico-eólico é um sistema capaz de aproveitar em simultaneamente os recursos solares e eólicos, nos dias de sol e vento. A vantagem em utilizar esse sistema está complementaridade entre as fontes de energia envolvidas. O uso de ambas as fontes superar a intermitência do recurso, que é uma das principais desvantagens de sistemas de geração de eletricidade individuais, como as fontes de energia solar e eólica.

Segundo PINHO et al. (2008) a complementaridade entre as fontes, muitas vezes verificada em alguns locais durante diferentes períodos de tempo, garante maior confiabilidade ao sistema, além de reduzir consideravelmente a participação do banco de baterias e/ou do grupo gerador a diesel.

Ainda segundo PINHO et al. (2008) o comportamento da radiação solar ao longo do dia segue um padrão razoavelmente previsível, iniciando no início da manhã com valores discretos, atingindo um máximo próximo ao meio-dia, e decrescendo até o pôr-do-sol. Em contrapartida, o comportamento do recurso eólico é menos previsível, e a possibilidade de serem obtidas velocidades mais elevadas em períodos onde o nível de radiação solar é baixo ou inexistente confere ao sistema maior continuidade no que se refere à geração de energia elétrica.

Sistema híbrido fotovoltaico-eólico tem como característica o não emprego de recursos não renováveis. Mas devido à característica intermitente e aleatória das fontes, faz-se necessário o uso de um sistema de armazenamento de energia maior que o utilizado nas configurações que possuem geração diesel-elétrica.

Os sistemas híbridos apenas são verdadeiramente vantajosos em regiões onde os padrões de vento e os recursos solares se complementam significativamente, ou seja, em lugares onde o vento sopra frequentemente a velocidades significativas durante a noite, ou em que os períodos de bons recursos solares também são frequentemente acompanhados por vetos consistentes.

4.2 CASA ECOEFICIENTE

Para estudo do caso de um sistema híbrido de geração tipo solar e eólico foi tomando como exemplo o Laboratório de Energias Renováveis, Casa Ecoeficiente, mostrada na Figura 25, localizada nas instalações do Centro de Inovação e Tecnologia Industrial, SENAI-PB, na cidade de Campina Grande-PB.

Figura 25-Planta baixa da casa solar eficiente.



Fonte: o próprio autor.

A energia elétrica para alimentar a Casa Ecoeficiente será fornecida por um sistema híbrido de geração de energia, com a seguinte configuração:

- Um arranjo fotovoltaico (20 painéis) com potência total de 1000Wp com tensão de 24Vdc;
- Um Gerador eólico de 1000Wp;
- Dois inversores de 1000Wp/24Vdc, cada um, sendo um senoidal e o outro não senoidal;
- Três controladores de carga de 50A/24volts, cada um;
- Conjunto de 20 baterias, 220 Ah, 12 v, do tipo estacionária, fabricado pela empresa MOURA ACUMULADORES.

Este sistema híbrido será utilizado para fornecimento de energia de toda a casa, ou seja:

- Iluminação de todos os ambientes e do jardim.

- Sistema de aquisição de dados composto por computador, data-log e sensores do tipo: radiação solar, velocidade do vento, umidade, índice de precipitação e temperatura.
- Equipamentos eletrodomésticos da cozinha, tais como: geladeira, microondas, máquina de lavar roupa, liquidificador, etc.
- 3 pequenas bombas para bombear: água dessalinizada, água do reuso da cisterna de placas para três caixas d'água.

4.2.1 SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICO

As fontes geradoras de energia que supre a Casa Ecoeficiente são energia solar e eólica. O sistema de geração de energia elétrica solar fotovoltaica da casa, é constituído por dois tipos de configuração, um sistema conectado à rede e outro isolado.

O sistema conectado à rede é constituído por dois arranjos de módulos fotovoltaicos, um fixo de silício amorfo e outro móvel com sistema de rastreamento solar de silício poli-cristalino (p-Si) ilustrado na Figura 26.

Figura 26- Arranjo solar com sistema de rastreamento solar.



Fonte: o próprio autor.

O sistema isolado é constituído de um arranjo fotovoltaico (20 painéis) com potência total de 1000Wp com tensão de 24Vdc. Os painéis fixos do sistema isolado e do sistema conectado à rede é apresentado na Figura 27.

Figura 27-Painéis fixos do sistema isolado e do sistema conectado à rede.



Fonte: o próprio autor.

4.2.2 SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA

A Casa Ecoeficiente possui um aerogerador de pequeno porte ilustrado na Figura 28, com potência nominal de 1000 Wp. Essa máquina, instalada a 12 metros de altura, foi adicionada ao sistema de geração da casa em paralelo ao sistema de geração fotovoltaico.

O aerogerador é formado por um rotor, composto pelas pás e pelo cubo, que impulsionado pelo vento aciona um gerador assíncrono, gerando eletricidade em CA. A tensão de saída do aerogerador é então convertida de CA em corrente contínua (CC), por meio de um conversor eletrônico chamado de retificador, e alimenta o banco de baterias com a tensão de operação de 24 Volts CC. A alimentação em CA dos equipamentos da Casa Ecoeficiente (como os encontrados em uma casa convencional) é realizada a partir do controlador de carga, mas antes a tensão de saída é convertida de CC para CA através de um inversor de fonte de tensão.

Figura 28- Gerador eólico da Casa Ecoeficiente.



Fonte: o próprio autor.

4.2.3 BANCO DE BATERIAS

O banco de baterias é composto por um conjunto de 20 baterias de chumbo-ácido estacionárias seladas de 200 Ah/12 Volts em C20 (com ciclo de descarga profundo) conectadas em 8 arranjos de 2 baterias associadas em série ligados em paralelo, operando com tensão de 24 Volts CC. Fabricado pela empresa Moura Acumuladores. O banco de baterias é apresentado na Figura 29.

Figura 29- Banco de baterias.



Fonte: o próprio autor.

4.2.4 CONTROLADOR DE CARGA

O controlador de carga deve atuar em um sistema híbrido de modo a evitar que a bateria opere em condições anormais, que contribuem para a redução de sua vida útil. Os

controladores devem ser utilizados com os tipos de baterias para os quais foram projetados (controladores projetados para baterias comuns de chumbo-ácido podem não ser adequados para as fotovoltaicas) (PINHO et al., 2008).

A Casa Ecoeficiente utiliza dois controladores de carga, uma para a geração eólica ilustrado na Figura 30 e outro para geração dos painéis fotovoltaicos ilustrado na Figura 31.

Figura 30- Controlador de carga eólico.



Fonte: o próprio autor.

Figura 31- Controlador de carga solar.



Fonte: o próprio autor.

4.2.5 INVERSORES

Para utilizar cargas convencionais de corrente alternada os sistemas fotovoltaicos devem incorporar inversores. O inversor de tensão é o equipamento responsável pela conversão da corrente contínua em corrente alternada, a energia CC pode ser proveniente, por exemplo, de baterias, células a combustível ou módulos fotovoltaicos, estes dispositivos também são conhecidos como conversores CC-CA. Suas principais características são suas tensões de operação de entrada (CC) e saída (CA), frequência de saída, potência nominal, capacidade de surto, eficiência, e forma de onda de saída.

A tensão CA de saída deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados às cargas a serem alimentadas. Adicionalmente, no caso de sistemas conectados à rede elétrica a tensão de saída do inversor deve ser sincronizada com a tensão da rede (Pinho e Galdino,2014).

A Casa Ecoeficiente utiliza dois inversores, uma para o sistema geração conectada à rede ilustrado na Figura 32 e outro para o sistema isolado ilustrado na Figura 33.

Figura 32- Inversor da geração conectada à rede.



Fonte: o próprio autor.

Figura 33-Inversor da geração isolada.



Fonte: o próprio autor.

4.3 AVALIAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO SOLAR E EÓLICO

Nesse tópico será realizado o estudo de fornecimento de energia elétrica através de um sistema híbrido isolado, fotovoltaico-eólico na região de Campina Grande. O objetivo projetar o sistema de alimentação com energias solar e eólica ideal para abastecer uma escola ou um centro de saúde de pequeno porte.

Pretende-se analisar as distintas opções para eletrificar o ambiente, no caso o uso de sistemas fotovoltaico, eólico e híbrido utilizando painel solar de 100Wp e aerogerador de 1000Wp. Para isso, foi utilizando um arquivo Excel, mi_Hycad_portugues.xls, utilizado no curso de capacitação de energia renováveis da ONUDI (Observatório de Energia Renováveis para a América Latina e o Caribe) para o estudo das três situações possíveis.

Para a realização da simulação foram considerados os seguintes dados:

- Sistema sem gerador de apoio, de modo que a carga deve estar 100% coberta a cada mês;
- Bateria: Tensão:
 - Tensão: 24 V;
 - Dias de autonomia: 3;
 - Profundidade de descarga: 0.8;
 - Eficiência da bateria: 0.85;
- Eficiência do inversor: 0.9.
- Inversor: considerar um Coeficiente de simultaneidade de 0.8;
- Taxa de crescimento da carga de 1,5%;
- **Consumo:**
 - (6) Fluorescentes de 30W funcionando 6 horas/dia;
 - (6) fluorescentes compactos de 12W funcionando 6 horas/dia;
 - (2) Computadores de 220 W, Monitores de 19" de 140 W funcionando 4 horas/dia;
 - Impressora jato de tinta de 50 W funcionando 2 horas/dia;
 - Antena parabólica de 30 W funcionando 3 horas/dia;
 - TV, 19" de 140 W funcionando 2 horas/dia;
 - Vídeo de 27 W funcionando 1 horas/dia, e consumindo 10 W em stand-by (durante 23 horas/dia);

- Geladeira de alta eficiência (150W) funcionando 8 horas/dia;

Os dados dos recursos solar e eólico (médias mensais) da cidade de Campina Grande, foram obtidos no site da NASA (Agência Espacial Americana), por meio do programa HOMER, esses dados são ilustrados nas Figura 34 e Figura 35.

Para a simulação foi considerado o aerogerador da marca Bergey com a potência de 1000Wp, além dos seguintes dados para geração eólica:

- Weibull K = 2 (local de interior);
- Expoente de corte= 0.2;
- Perdas por turbulência é 5%;
- Fator de segurança do aerogerador 10%;
- Altitude do lugar 551 m (Campina Grande);
- Altura do anemômetro: 10 metros;

Os dados para simulação da geração eólica foram obtidos de acordo com as indicações da planilha do Excel, o arquivo mi_Hycad_portugues.xls. O método da simulação utilizado foi baseado no procedimento sugerido pela empresa Bergey

Figura 34- Dados dos recursos solar de Campina Grande.



Fonte: o próprio autor.

Figura 35-Dados dos recursos eólico de Campina Grande.



Fonte: o próprio autor.

4.3.1 RESULTADO PARA ESTUDO UTILIZANDO O SISTEMA SOLAR

No estudo do caso usando somente painel solar de 100Wp, o preço médio da implantação do sistema é 20 300 €. Para que a geração seja maior ou igual ao consumo durante todos os meses do ano, é necessário a implantação de no mínimo 29 painéis solares de 100Wp. Essa configuração está sobre dimensionada durante boa parte do ano como pode ser visto na Tabela 4 e na Figura 1.

Tabela 4- Avaliação de sistema solar.

Modelo de Avaliação HyCad**Avaliação de Sistema Solar**

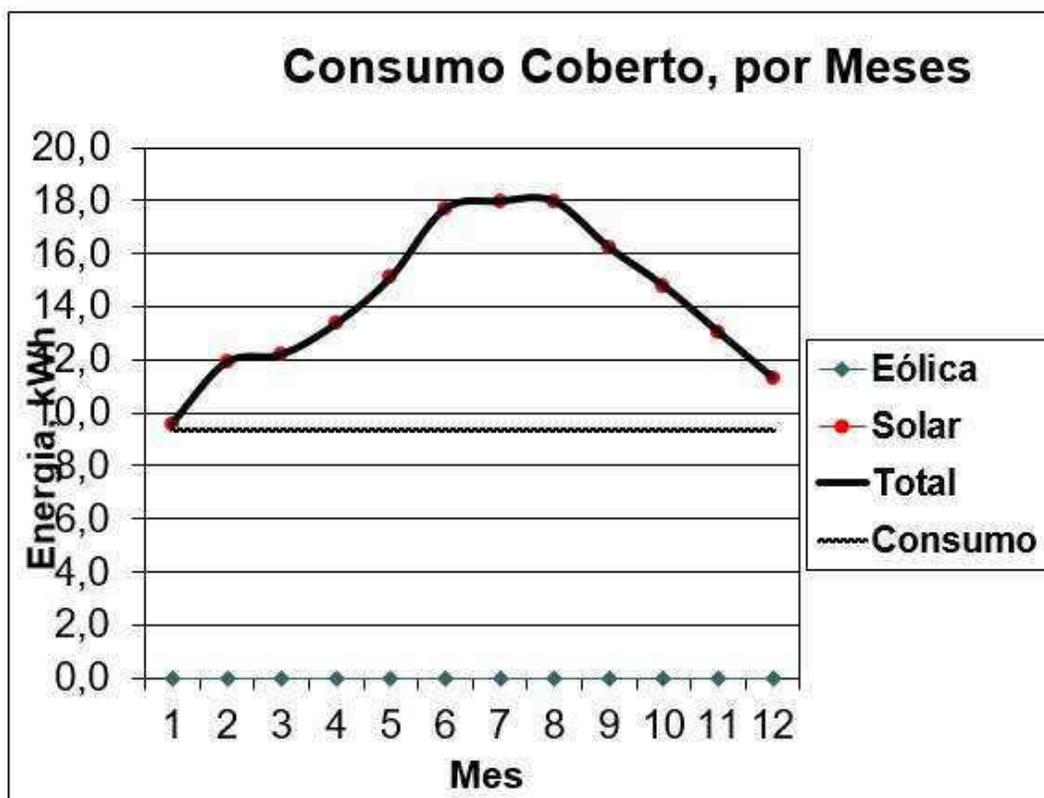
Consumos: AC Diário kWh:	6,319			<u>Eficiências BOS (Balanço do Sistema)</u>	
Geração: DC Equivalente kWh:	9,36			Bateria:	0,85
		EUROS		Inversor:	0,9
		Euros/W	TOTAL	Fiação:	0,98
Tamanho da Geração Eólica, kW:	0	5,5	0.0	Outros:	1
Tamanho da Geração Fotovoltaica, kW:	2,9	7,0	<u>20.300</u>	Energia Dissipada:	0,95
			20.300	Margem de Segurança:	0,95
				<u>Total:</u>	0,675

ENTADAS

Mês	1.0 kW Wind	1 kW PV	Eólica	Fotovoltaica	Total	Consumo	Consumo
	Energia Diária Saída, kWh	Médio Diário	Coberto %				
JAN	6,3	3,30	0,0	9,6	9,6	9,36	102%
FEV	6,9	4,10	0,0	11,9	11,9	9,36	127%
MAR	7,8	4,20	0,0	12,2	12,2	9,36	130%
ABR	8,6	4,60	0,0	13,3	13,3	9,36	143%
MAI	7,8	5,20	0,0	15,1	15,1	9,36	161%
JUN	5,8	6,10	0,0	17,7	17,7	9,36	189%
JUL	5,3	6,20	0,0	18,0	18,0	9,36	192%
AGO	3,2	6,20	0,0	18,0	18,0	9,36	192%
SET	4,3	5,60	0,0	16,2	16,2	9,36	174%
OUT	5,8	5,10	0,0	14,8	14,8	9,36	158%
NOV	5,3	4,50	0,0	13,1	13,1	9,36	139%
DEZ	6,9	3,90	0,0	11,3	11,3	9,36	121%
Média Ano	6,2	5,3	0,0	14,3	14,3	9,36	152%

Fonte: o próprio autor.

Figura 36-Gráfico consumo coberto mensal do sistema solar.



Fonte: o próprio autor.

4.3.2 RESULTADO PARA ESTUDO UTILIZANDO O SISTEMA EÓLICO

No estudo do caso usando somente aerogeradores de 1000Wp, o preço médio da implantação do sistema é 16 500 €. Para que a geração seja maior ou igual ao consumo durante todos os meses do ano, é necessário a implantação de no mínimo 3 aerogeradores de 1000Wp. Os resultados da simulação são apresentados na Tabela 5 e Figura 1

TABELA 5- AVALIAÇÃO DE SISTEMA EÓLICO.

Modelo de Avaliação HyCad**Avaliação de Sistema Eólico**

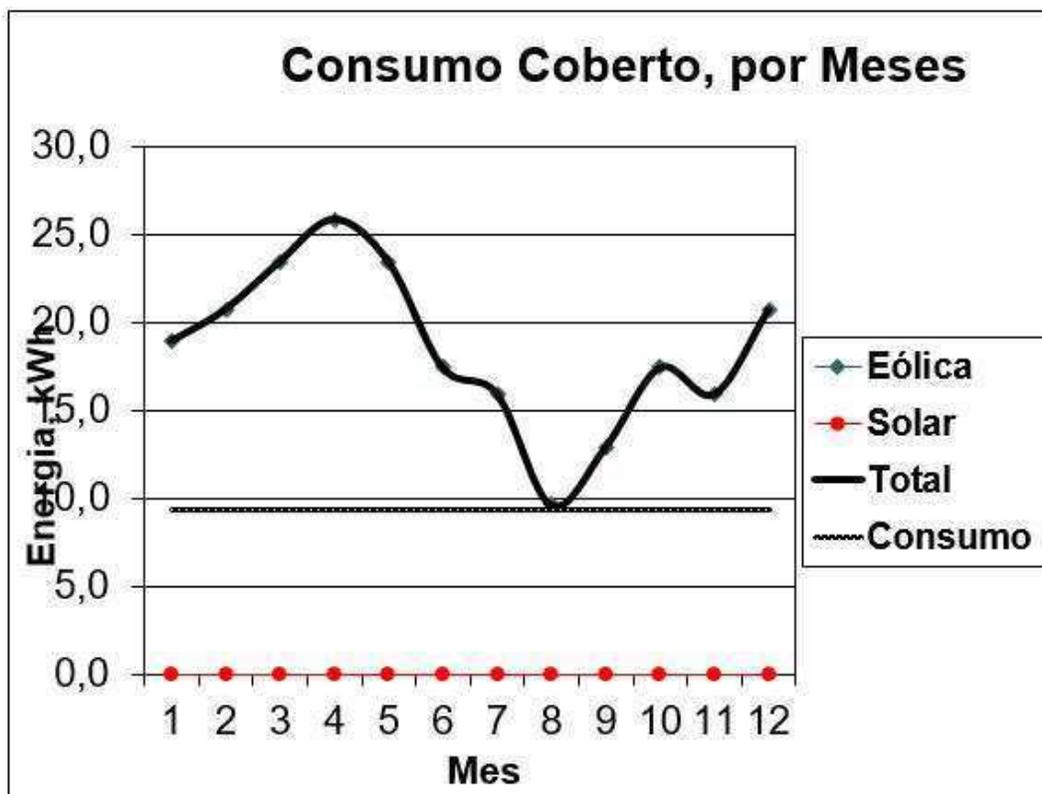
Consumos: AC Diário kWh:	6,319			<u>Eficiências BOS (Balanço do Sistema)</u>	
Geração: DC Equivalente kWh:	9,36			Bateria: 0,85	
		EUROS			
		Euros/W	TOTAL	Inversor: 0,9	
Tamanho da Geração Eólica, kW:	3	5,5	16.500	Fiação: 0,98	
Tamanho da Geração Fotovoltaica, kW:	0	7,0	<u>0.000</u>	Outros: 1	
			16.500	Energia Dissipada: 0,95	
				Margem de Segurança: 0,95	
				<u>Total: 0,675</u>	

ENTADAS

Mês	1.0 kW Wind	1 kW PV	Eólica	Fotovoltaica	Total	Consumo Médio Diário	Consumo Coberto %
	Energia Diária Saída, kWh	Energia Diária Saída, kWh	Energia Diária Saída, kWh	Energia Diária Saída, kWh	Energia Diária Saída, kWh		
JAN	6,3	3,30	18,9	0,0	18,9	9,36	202%
FEV	6,9	4,10	20,7	0,0	20,7	9,36	221%
MAR	7,8	4,20	23,4	0,0	23,4	9,36	250%
ABR	8,6	4,60	25,8	0,0	25,8	9,36	276%
MAI	7,8	5,20	23,4	0,0	23,4	9,36	250%
JUN	5,8	6,10	17,4	0,0	17,4	9,36	186%
JUL	5,3	6,20	15,9	0,0	15,9	9,36	170%
AGO	3,2	6,20	9,6	0,0	9,6	9,36	103%
SET	4,3	5,60	12,9	0,0	12,9	9,36	138%
OUT	5,8	5,10	17,4	0,0	17,4	9,36	186%
NOV	5,3	4,50	15,9	0,0	15,9	9,36	170%
DEZ	6,9	3,90	20,7	0,0	20,7	9,36	221%
Média Ano	6,2	5,3	18,5	0,0	18,5	9,36	198%

Fonte: o próprio autor.

Figura 37- Consumo coberto mensal do sistema eólico.



Fonte: o próprio autor.

4.3.3 RESULTADO PARA ESTUDO UTILIZANDO O SISTEMA SOLAR E EÓLICO

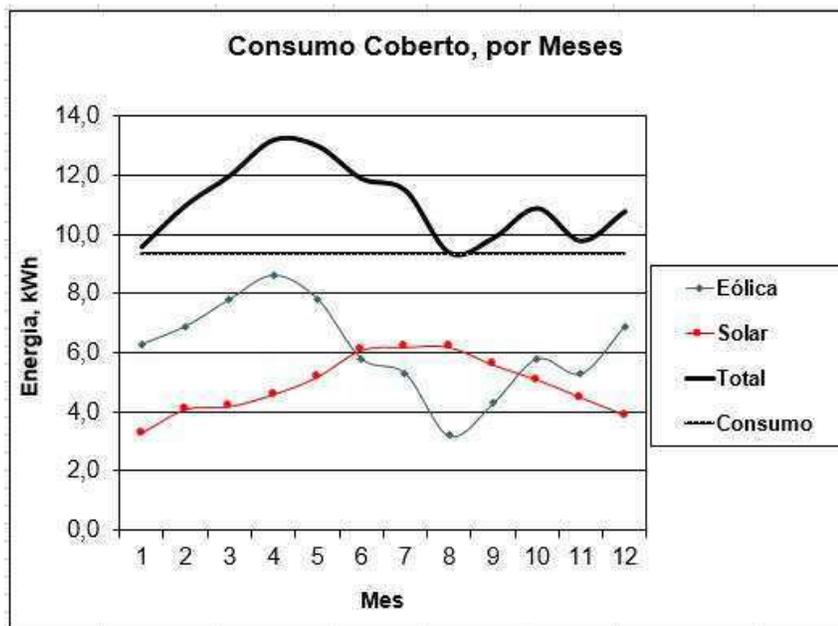
No estudo do caso usando painel solar de 100Wp e um aerogerado de 1000Wp, o preço médio da implantação do sistema é 12 500 €. Para que a geração seja maior ou igual ao consumo durante todos os meses do ano, é necessário a implantação de no mínimo 10 painéis solares de 100Wp e um aerogerado de 1000Wp. Os resultados para essa configuração podem ser vistos na Tabela 6 e Figura 38.

Tabela 6- Avaliação de sistema híbrido eólico e solar.

Modelo de Avaliação HyCad							
Avaliação de Sistema Híbrido Eólico & solar							
Consumos: AC Diário kWh:		6,319		Eficiências BOS (Balanço do Sistema)			
Geração: DC Equivalente kWh:		9,36		Bateria: 0,85			
				EUROS			
				Euros/W			
				TOTAL			
Tamanho da Geração Eólica, kW:		1		5,5	5.500	Inversor: 0,9	
Tamanho da Geração Fotovoltaica, kW:		1		7,0	7.000	Fiação: 0,98	
				<u>12.500</u>		Outros: 1	
						Energia Dissipada: 0,95	
						Margem de Segurança: 0,95	
						<u>Total: 0,675</u>	
ENTADAS							
Mês	1.0 kW Wind	1 kW PV	Eólica	Fotovoltaica	Total	Consumo	Consumo
	Energia Diária Saída, kWh	Energia Diária Saída, kWh	Médio Diário	Coberto %			
JAN	6,3	3,30	6,3	3,3	9,6	9,36	103%
FEV	6,9	4,10	6,9	4,1	11,0	9,36	118%
MAR	7,8	4,20	7,8	4,2	12,0	9,36	128%
ABR	8,6	4,60	8,6	4,6	13,2	9,36	141%
MAI	7,8	5,20	7,8	5,2	13,0	9,36	139%
JUN	5,8	6,10	5,8	6,1	11,9	9,36	127%
JUL	5,3	6,20	5,3	6,2	11,5	9,36	123%
AGO	3,2	6,20	3,2	6,2	9,4	9,36	100%
SET	4,3	5,60	4,3	5,6	9,9	9,36	106%
OUT	5,8	5,10	5,8	5,1	10,9	9,36	116%
NOV	5,3	4,50	5,3	4,5	9,8	9,36	105%
DEZ	6,9	3,90	6,9	3,9	10,8	9,36	115%
Média Ano	6,2	5,3	6,2	4,9	11,1	9,36	118%

Fonte: o próprio autor.

Figura 38- Gráfico consumo coberto mensal do sistema híbrido.



Fonte: o próprio autor.

4.3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

No estudo do caso de uma escola ou de um posto médico, ambos de pequeno porte localizados na região de Campina Grande, foram utilizados os sistemas solar, eólico e híbrido.

O sistema solar se mostrou caro em relação aos outros sistemas, embora possua um custo de manutenção baixo quando comparado aos mesmos. Já no caso do sistema eólico o custo de implantação é menor que o caso do sistema solar, mais o seu custo de manutenção é maior e esse sistema requer uma grande área para instalação das torres. Em ambos os casos os sistemas foram sobredimensionados para garantir que, a geração seja capaz de suprir a demanda do consumo durante todos os meses do ano. Esse sobredimensionamento é o que torna o custo de implantação de ambos os sistemas caro.

O sistema híbrido foi o sistema com menor custo de implantação, isso se deve ao fato que as fontes de geração envolvidas são complementares ao longo de todo o ano, o que diminui consideravelmente o custo de implantação do sistema pois não há o sobredimensionamento das fontes envolvidas.

5 CONCLUSÃO

Devido aos avanços tecnológicos e os apelos ambientais crescentes, as energias renováveis vêm ganhado espaços no setor energético nos últimos anos. Em destaque a energia solar fotovoltaica que aumentou exponencialmente sua produção nas últimas décadas. Embora não tenha ganhado espaço como os grandes empreendimentos dos grandes parques eólicos os pequenos aerogeradores podem ser uma solução energética para localidades isoladas que não é suprida pela rede de energia elétrica convencional. A implantação de sistemas de energia renováveis ainda possui seu custo muito elevados quando compara as outras formas convencionais de geração de energia elétrica, o que torna o seu uso pouco atrativo. Uma solução seria o uso combinado de várias fontes de energia constituindo assim um sistema híbrido. Dentre as várias configurações de sistemas híbridos possíveis (Sistema eólico-diesel, Sistema fotovoltaico-diesel, Sistema fotovoltaico-eólico-diesel e Sistema fotovoltaico-eólico), o sistema fotovoltaico-eólico é uma boa alternativa em lugares onde há disponibilidade de recurso solar e eólico. A vantagem em utilizar esse sistema está na complementaridade entre as fontes de energia envolvidas. O uso de ambas as fontes superar a intermitência do recurso, que é uma das principais desvantagens de sistemas de geração de eletricidade individuais como as fontes de energia solar e eólica. Além de ter como característica o não emprego de recursos não renováveis. Mas devido à característica intermitente e aleatória das fontes, faz-se necessário o uso de um sistema de armazenamento de energia maior que o utilizado em outras configurações que não usam energias renováveis. Em sistemas de múltiplas fontes de geração com é o caso de sistemas híbridos é necessária uma boa caracterização da demanda elétrica e dos recursos energéticos devido os custos elevados das instalações. Além disso, deve ser considerado que a utilização de sistemas híbridos traz uma complexidade operacional e de manutenção do sistema que é uma questão muito desvantajosa para empreendimentos em regiões remotas.

Os sistema híbrido fotovoltaico-eólico apenas é verdadeiramente vantajoso em regiões onde os padrões de ventos e os recursos solares se complementam significativamente, ou seja, em lugares onde o vento sopra frequentemente a velocidades significativas durante a noite, ou em que os períodos de bons recursos solares também são frequentemente acompanhados por ventos consistentes.

6 REFERÊNCIAS

- Alonso, M.C., García, F.S. E SILVA, J.P. *Energia Solar Fotovoltaica*. [s.l], 2013. 91 p
- ARRIBAS, L. *Energia Mini-Eólica*. [s.l], 2013. 59 p.
- BARBOSA, C. F. O. *Avaliação Tecnológica, Operacional e de Gestão de Sistemas Híbridos para Geração de Eletricidade na Região Amazônica*. Dissertação de Mestrado, Belém: UFPA, 2006.
- BRITO, SÉRGIO DE SALVO. *Tutorial de Energia Solar–Princípios e Aplicações. 2006*. CRESESB–Centro de Referência para Energia Solar e Eólica. Disponível em:<
<http://www.cresesb.cepel.br/index.php>.
- CHESF-BRASCEP. *Fontes Energéticas Brasileiras, Inventário/ Tecnologia. Energia Eólica. V.1 De cata-ventos a aerogeradores: o uso do vento*, Rio de Janeiro,1987.
- CRESESB. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*, diversos autores, Grupo de Trabalho de Energia Solar Fotovoltaica – GTEF – RESESB/CEPEL, 2ª Edição,1999.
- DUTRA, R. *Princípios e Tecnologia*. Tutorial de Energia Eólica. CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito), 2008.
- Dutra, R.M. *Viabilidade Técnico-Econômica da Energia Eólica face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro*. Dissertação de M.Sc., Programa de Planejamento Energético, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brazil, 2001, 300 pp.
- FEITOSA, E., PEREIRA, A. e ROSAS, P. (2002). *Increasing Wind Penetration on Fernando de Noronha Wind/Diesel System*, World Wind Energy Conference, Berlin, 2002.
- FADIGAS, E.A. (s.d). *Energia solar fotovoltaica: fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica*. São Paulo 71p
- GIPE, P. *Energia Eólica Prática*. Espanha: PROGNSA.2000.
- KOEPPL, G.W., 1982, Putnam’s Power form the Wind, ed. 2 Van Nostrand Reinhold Co., New York. *apud* SHEPHERD, 1994 *Op. cit.*
- EWEA, EUROPEAN COMMISSION, 1998a, “Technology”. In: Wind Energy – The Facts, Vol 1.
- MARQUES, J. *Turbinas eólicas: modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação*. Santa Maria, RS, Brasil: [s.n.], 2004.

- MONTEZANO, B.E.M., 2008. *Modelo Dinâmico de Visualização de um Aerogerador com Velocidade de Rotação Variável e Controle de Passo em VRML*. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, UFRJ, Rio de Janeiro, Brazil, 137 pp.
- PINHO, JOÃO T., AND MARCO A. GALDINO. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB ,2014.
- PINHO, J. T.; BARBOSA, C. F. O.; PEREIRA, E. J. S.; SOUZA, H. M. S.; BLASQUES, L. C. M.; GALHARDO, M. A. B.; MACÊDO, W. N. *Sistemas híbridos - Soluções energéticas para a Amazônia*. 1. ed. Brasília, Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2008. 396 p.
- PUTNAM, G. C., 1948, *Power form the Wind, Van Nostrand Reinhold Co.*, New York. apud SHEPHERD, 1994 Op. cit.
- SHEPHERD, D.G., *Historical Development of the Windmill*. In *Wind Turbine Technology – Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering*, SPERA, S.A, (ed), 1 ed. New York, ASME Press, 1994, pp 1-46.
- SANDIA, 2006, *Vertical Axis Wind Turbine: The History of the DOE Program*. Disponível na INTERNET via http://www.sandia.gov/Renewable_Energy/wind_energy/topical.htm. Arquivo consultado em junho, 2006.
- SCIENTIFIC AMERICA, Dec. 20, 1890, *Mr. Brush's Windmill Dynamo*” Vol. LXIII, n. 25 cover and p. 389. apud SHEPHERD, 1994 Op. cit.
- SEKTOROV, V. R., 1934, *The First Aerodynamic Three-Phase Electric Power Plant in Balaclava, L'Elettrotecnica*, 21(23-24), pp. 538-542; Traduzido por Scientific Translation Service, NASA TT-F-14933, Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, pp. 13 apud SHEPHERD, 1994 Op. cit.
- VALLÊRA, ANTÔNIO M., AND MIGUEL CENTENO BRITO. *Meio século de história fotovoltaica*. Gazeta da física 29, 2006.
- VOADEN, G.H., 1943, *The Simith-Putnam Wind Turbine – A Step Forward in Aero-Electric Power Research*”, *Turbine Topics*, 1(3); reprinted 1981 in NASA CP-2230, DOE CONF-810752, pp. 34-42, Cleveland, Ohio: NASA Lewis Research Center. apud SHEPHERD, 1994 Op. cit
- WALKER, J. F. e JENKINS, N. (1997). *Wind Energy Technology*. John Wiley & Sons.
- ROSAS, P. A. C. e ESTANQUEIRO, A. I. (2003), “Guia de Projeto Elétrico de Centrais Eólicas –Projeto Elétrico e Impacto de Centrais Eólicas na Rede Elétrica”, Centro Brasileiro de Energia Eólica, Vol. I. Recife.