



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

CAIO CÉSAR CALADO FERNANDES



Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
DIRETRIZES PARA PROJETO DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA
UTILIZANDO CÉLULAS FOTOVOLTAICAS



Departamento de
Engenharia Elétrica



CAMPINA GRANDE
2018

CAIO CÉSAR CALADO FERNANDES

DIRETRIZES PARA PROJETO DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO PARA IRRIGAÇÃO DE
PEQUENOS PRODUTORES RURAIS.

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso 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: Processamento de Energia

Orientador:
Professor Leimar Oliveira, M. Sc.

Campina Grande
2018

CAIO CÉSAR CALADO FERNANDES

DIRETRIZES PARA PROJETO DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO PARA IRRIGAÇÃO DE
PEQUENOS PRODUTORES RURAIS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso 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: Processamento 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 este trabalho à minha Mãe, exemplo de mulher, que devotou todos os esforços que foram necessários para que seus filhos tivessem a melhor educação possível, lhes dando amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por me permitir chegar ao final dessa jornada com o sentimento de dever cumprido.

Agradeço à minha mãe, Lúcia, por ter se esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação, por ter me enchido com coragem, amor e exemplos de perseverança, os quais foram essenciais para superar todas as adversidades ao longo dessa caminhada.

Agradeço à minha noiva, Thaís que com todo seu amor e dedicação se manteve fiel ao meu lado me ajudando a superar as dificuldades que apareceram pelo caminho, sempre paciente e amorosa.

Agradeço aos meus irmãos, que são também vitoriosos e partilharam comigo toda uma vida, me apoiando e desejando meu sucesso.

Agradeço também a toda minha família, e meus amigos que com todo carinho e apoio me trouxeram até aqui.

Agradeço à Coordenação do Curso, em especial aos amigos Tchai e Adail, por toda a ajuda prestada nessa caminhada e por serem excepcionalmente bons no que fazem.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

“Combati o bom combate, terminei a minha carreira, guardei a fé.”
II Timóteo, 4

RESUMO

A energia solar constitui uma opção “limpa” e renovável de produção de energia elétrica, sendo o bombeamento de água uma das tecnologias mais difundidas quanto ao emprego de energia solar fotovoltaica. A presente monografia consiste na utilização de sistemas de bombeamento fotovoltaico aplicados à irrigação de pequenas unidades agrícolas, em especial àquelas instaladas em regiões secas e carentes de água, que são geralmente as mais favoráveis em termos de insolação, como é o caso da área rural do Nordeste do Brasil. Para tanto foi feito um estudo sobre a tecnologia fotovoltaica focado nos aspectos mais pertinentes à aplicação em sistemas de bombeamento. A partir da observação de um sistema de irrigação acionado por painéis fotovoltaicos e seus dados, foram geradas curvas e assim foi possível analisar o comportamento elétrico do motor-bomba e sua capacidade de bombeamento, ao longo de um dia, em função da irradiância e também avaliar esse comportamento ao variar a carga imposta ao sistema, que se dá ao ativar as linhas de irrigação. O potencial de utilização da tecnologia fotovoltaica se mostrou relevante na irrigação de pequenas unidades agrícolas de subsistência, tanto devido ao potencial energético na localidade onde o sistema foi instalado, quanto devido à capacidade de volume de água bombeado adequado à produção agrícola.

Palavras-chave: Sistemas de bombeamento fotovoltaico. Energia solar. Irrigação

ABSTRACT

Solar energy is a “clean” and renewable option for producing electricity, with water pumping being one of the most widespread technologies for the use of photovoltaic solar energy. The present monograph consists of the use of photovoltaic pumping systems applied to the irrigation of small agricultural units, especially those installed in dry regions and lacking water, which are generally the most favorable in terms of insolation, as is the case in the rural area of Northeast of Brazil. For this, a study was carried out on photovoltaic technology focused on the aspects most pertinent to the application in pumping systems. From the observation of an irrigation system triggered by photovoltaic panels and their data, curves were generated and it was possible to analyze the electric behavior of the pump motor and its pumping capacity, over a day, as a function of the irradiance and also evaluate this behavior by varying the load imposed on the system, which occurs when the irrigation lines are activated. The potential of the use of photovoltaic technology was shown to be relevant in the irrigation of small subsistence agricultural units, both due to the energy potential in the locality where the system was installed and due to the volume capacity of pumped water adequate to the agricultural production.

Keywords: Photovoltaic pumping systems. Solar power. Irrigation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Atlas Solárimétrico do Brasil.....	19
Figura 3.1: Esquema simplificado da célula fotovoltaica.....	26
Figura 3.2: Distribuição das Tecnologias no Mercado Mundial.....	28
Figura 3.3: Geração de pares eletrons-lacunas devido à foto incidência.....	29
Figura 3.4: Processo de Dopagem do átomo de Silício.....	31
Figura 3.5: Célula fotovoltaica de junção p-n.....	32
Figura 3.6: Circuito Equivalente da célula fotovoltaica.....	33
Figura 3.7: Curva I-V.....	34
Figura 3.8: Desenvolvimento das células fotovoltaicas	36
Figura 3.9: Curvas típicas da célula fotovoltaica.....	37
Figura 3.10: Curvas I x V(100W/m ² e temperaturas difetentes).....	37
Figura 3.11: Curvas I x V(a 25 °C e irradiâncias diferentes).....	38
Figura 3.12: Evolução das Tecnologias.....	41
Figura 3.13: Películas Finas e absorção do comprimento de onda.....	43
Figura 3.14: Concentrador Fotovoltaico.....	44
Figura 4.1: Arranjo para Bombeamento de poço artesiano.....	46
Figura 4.2: Bomba Centrífuga.....	49
Figura 4.3: Gráfico para análise de tipos de bombas	50
Figura 4.4: Bomba tipo diafragma.....	50
Figura 4.5: Diagrama de bombeamento fotovoltaico.....	52
Figura 4.6: Região de aplicação de bombeamento.....	53
Figura 4.7: Catálogo Schneider de bomba commercial.....	57
Figura 4.8: Eficiência média de um Sistema.....	58
Figura 4.9: Demanda em Watt-Pico pela eficiência.....	59
Figura 4.10: Orientação do Sol para efeitos de Irradiância.....	60
Figura 4.11: Parâmentos relevantes para o dimensionamento.....	62

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si	Silício Amorfo
BM	Banco Mundial
C.A	Corrente Alternada
C.C	Corrente Contínua
c-Si	Silício Cristalino
CdTe	Telureto de Cádmio
CEEI	Centro de Engenharia Elétrica e Informática
CPV	Células Concentradas Fotovoltaicas
CRESESB	Centro de Referência para Equipe Solar e Eólica de Salvo Brito
cm ²	Centímetro Quadrado
D	Diâmetro da tubulação
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
eV	Elétron-volt
Ef	Energia do fóton
f	Coefficiente de atrito
F	Frequência
FF	Fator de forma
FV	Fotovoltaica
GaAs	Arseneto de Gálio
GHI	Irradiação Global Horizontal
GTZ	Deutch Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit
g	Aceleração da gravidade
h	Constante de Plank
H _m	Altura Manométrica
H _v	Altura Vertical
hf	Perda de carga na tubulação
he	Perda de carga em pontos singulares
H _{DT}	Altura Dinâmica
H _{DR}	Altura do Reservatório
HCPV	High Concentrated Photovoltaic
I	Corrente elétrica
I _{sc}	Corrente de curto-circuito

k	Constante de Boltzmann
l	Litro
L	Comprimento da tubulação
m^2	Metro quadrado
m^3	Metro cúbico
h	Eficiência
n	Portadores negativos
n_i	Portadores intrínsecos
N_d	Concentração do dopante
<i>ONG</i>	Organização Não Governamental
<i>OPV</i>	Célula Fotovoltaica Orgânica
P	Potência
P_h	Potência Hidráulica
<i>PNUD</i>	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
P_{mp}	Ponto de máxima Potência
q	Carga do elétron
Q_m	Vazão
R_s	Resistência Série
R_p	Resistência Paralelo
STC	Standard Test Conditions
<i>UFMG</i>	Universidade Federal de Campina Grande
<i>USD</i>	United State dollars
V	Velocidade média do fluido
W_p	Watt-Pico

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados das tecnologias fv atuais.....	40
Tabela 2: Produção de tecnologia celular	41
Tabela 3: Tecnologias FV.....	43
Tabela 4: Distribuição da Irradiância Solar	60

SUMÁRIO

1 SUMÁRIO

1	Capítulo 1: Introdução	15
1.1	Justificativa do Tema Selecionado.....	16
1.2	Objetivo geral.....	18
1.3	Objetivos específicos.....	18
1.4	Estrutura do Trabalho.....	18
2	Capítulo 2: Energia Fotovoltaica	20
2.1	Energia fotovoltaica no Brasil e no mundo.....	20
2.2	Uso de energia fotovoltaica para a agricultura no Brasil.....	24
3	Capítulo 3: Tecnologia do bombeamento fotovoltaico	25
3.1	Painéis fotovoltaicos.....	26
3.3	Características Elétricas.....	34
3.4	Gerações Das Células Fotovoltaicas.....	37
3.4.1	Tecnologias de Silício.....	41
3.4.2	Visão geral sobre películas finas.....	42
3.4.3	concentrador fotovoltaico.....	44
3.5	Histórico de aplicação de sistemas de bombeamento fotovoltaico na irrigação no Brasil e no mundo.....	45
4	Capítulo 4: Considerações para Dimensionamento do projeto de irrigação em pequenas propriedades rurais abastecidas por poços artesianos	47
4.3	bombeamento fotovoltaico.....	53
4.3.1	Elementos de um sistema de bombeamento fotovoltaico.....	53
5	Capítulo 5: Conclusões	65
	Sugestões para trabalhos futuros.....	66
	Referencias Bibliográficas.....	66

1 CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

A eletricidade é uma das formas de energia mais versáteis e que melhor se adapta às necessidades da civilização no mundo atual. Sua utilização está tão estendida que dificilmente se concebe uma sociedade tecnologicamente avançada que não faça uso dela em larga escala. Incontáveis aparelhos são projetados para funcionar alimentados com energia elétrica. Pode-se dizer que todo o parque tecnológico, exceção feita, até o momento, em grande medida ao transporte, está baseado em eletricidade (FEDRIZZI, 1997).

Os índices de pobreza de uma região são determinados a partir da avaliação de algumas componentes, como o acesso à água e à energia elétrica (KRETER, 2011). A insuficiência ou ausência desses serviços atinge de forma mais intensa às realidades singulares, como é o caso das áreas rurais e, em especial, do Nordeste brasileiro.

A região possui clima semiárido, caracterizado por baixos índices pluviométricos. Essa característica causa uma forte dependência da intervenção do homem sobre a natureza, no sentido de garantir, por meio de obras de infraestrutura hídrica, uma melhor forma de utilização da água. Um bom gerenciamento da água na irrigação é essencial para a economia rural nordestina, segundo CASTRO (2012), 82,9% da mão de obra do campo, nessa região, equivalem à agricultura familiar. A agricultura familiar, hoje, é responsável por 75% dos alimentos que vai para mesa do brasileiro (EMBRAPA, 2014).

O êxito de fornecimento de água está diretamente associado à disponibilidade de recursos energéticos. A matriz energética brasileira, hoje, é altamente dependente das hidroelétricas e, em casos de emergência, das termoelétricas, porém a eficiência de um planejamento energético se dá com a diversificação, um sistema é mais seguro se há várias fontes de energia (GOMES, 2014). Segundo GOMES (2014), o Brasil precisa trabalhar com as regionalidades no setor energético, ou seja, explorar os recursos energéticos característicos de cada região, como o recurso solar no Nordeste.

Neste sentido a tecnologia Solar fotovoltaica se mostra bastante promissora, devido tanto à autonomia quanto à abundância do recurso energético no Nordeste brasileiro, segundo o Plano Nacional de Energia 2030, esta região possui irradiação solar comparável as melhores regiões do mundo, como por exemplo a cidade de

Dongoda, no deserto Sudanês, ou mesmo a região de Dagget no deserto de Majave, Califórnia segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE,2008) o valor da irradiação chega a variar entre 5 e 6,1 kWh/m²/dia.

A tecnologia fotovoltaica se encontra tecnicamente consolidada e vem sendo adotada para eletrificação rural, tendo como uma das principais aplicações o bombeamento de água (FEDRIZZI, 2003).

Outros fatores positivos são a alta confiabilidade técnica, vida útil superior a 20 anos, renovabilidade da fonte, reduzida manutenção, sem emissão de ruídos e poluentes na operação. Seu custo inicial ainda é elevado, porém à medida que as aplicações dessa tecnologia crescem os preços decrescem.

O Ministério de Minas e Energia coordenou o programa “Luz para Todos” que teve como meta levar o acesso a energia elétrica, gratuitamente, para a população rural nas localidades de menor índice de desenvolvimento humano. Para as áreas mais remotas foram estabelecidos critérios técnicos e financeiros, segundo o “Manual de Projetos Especiais”, a serem aplicados com o uso de fontes alternativas de energia elétrica, dentre as opções tecnológicas está a solar fotovoltaica (MME, 2014).

1.1 Justificativa do Tema Selecionado

Conforme foi dito, a agricultura familiar, hoje, é responsável por 75% dos alimentos que vai para mesa do brasileiro, portanto é imprescindível o contínuo fornecimento de energia elétrica para os sistemas de irrigação que atendam a essas unidades agrícolas.

Assim, a partir do contexto apresentado, a principal motivação para a escolha do presente tema é colaborar na diversificação da matriz energética, em locais, em especial no Nordeste brasileiro devido à singularidade do seu clima, que exerçam a agricultura familiar como fonte de renda e subsistência. O êxito no fornecimento de água às populações está diretamente associado a disponibilidade de recursos energéticos. Com frequência, as únicas fontes de energia acessíveis às populações carentes para a execução de tal ação são as trações humana e animal, o que limita muito a oferta do recurso, e em muitos casos torna-se um trabalho

escravo, afetando principalmente mulheres e crianças.

Sendo assim, a inexistência de rede elétrica, a irregularidade e os custos do fornecimento de combustível em muitas regiões, motivam a introdução de sistemas de bombeamento baseados em recursos energéticos disponíveis localmente, como podem ser a tecnologia eólica, solar fotovoltaica, pequenas quedas d'água, biomassa, etc.

Atualmente a tecnologia fotovoltaica, conta com um alto grau de maturidade o que se reflete em uma também elevada confiabilidade e eficiência no funcionamento dos sistemas. Concretamente, a geração fotovoltaica tem um excepcional êxito em aplicações onde as exigências em termos de confiabilidade são rigorosas como podem ser em equipamentos de telecomunicação, sinalização e suprimento de água para consumo humano e de animais domésticos. (FEDRIZZI, 2003)

Quanto a durabilidade, já foi demonstrado que a vida útil do gerador fotovoltaico e da maioria dos componentes é superior a 20 anos e que, apesar de não estarem sendo amplamente aplicadas por uma série de motivos, as normas de engenharia necessárias para um bom funcionamento de sistemas fotovoltaicos já estão bem estabelecidas.

Mesmo que a geração fotovoltaica já tenha sido aprovada tecnicamente, para que ocorra uma maior disseminação em escala mundial, existe a necessidade de que seja competitiva com outras opções. Entretanto, para que haja uma maior competitividade, isto é, para que ocorra uma redução nos custos, deve haver uma mudança na atual estrutura de produção de módulos em termos de economia de escala e curva de aprendizado, a fim de que possa ser eliminado o atual círculo vicioso: os custos elevados mantêm a demanda baixa e a baixa demanda mantêm os custos elevados.

No contexto acima apresentado, a principal motivação para a execução deste trabalho é colaborar na solução da problemática do fornecimento de água às populações rurais menos assistidas. Geralmente é esta mesma população que localiza-se a maiores distâncias da rede elétrica e de centros urbanos, como também a que comumente tem baixo poder aquisitivo e menor acesso a assistência

médico-sanitária, educacional e cultural, entre outros.

A ênfase na análise do potencial de inserção da tecnologia fotovoltaica de geração de energia para o bombeamento de água deu-se por inúmeros fatores, dentre eles destaca-se o fato de ser uma tecnologia que utiliza uma fonte inesgotável e acessível de energia que apresenta-se em abundância e com boa distribuição em todo o território nacional; Além disso, não emite poluentes na geração, apresentando um alto índice de confiabilidade com baixa necessidade de manutenção assegurando uma certa independência do usuário.

1.2 Objetivo geral

Fazer um estudo geral a respeito da tecnologia fotovoltaica e analisar o uso de bombeamento fotovoltaico para unidades de produção agrícola de pequeno porte.

1.3 Objetivos específicos

Realizar um estudo sobre uso da geração fotovoltaica para acionamento de sistemas de bombeamento e discutir os resultados do mesmo.

1.4 Estrutura do Trabalho

Esta monografia é composta por cinco capítulos. Neste primeiro Capítulo é feita uma apresentação geral do assunto abordado evidenciando os objetivos e a motivação do trabalho.

No Capítulo 2 é relatado o cenário da energia fotovoltaica no Brasil e no mundo, o uso de aplicações agrícolas e o aproveitamento de recursos visando o aumento da produtividade. Apresenta informações relacionadas aos sistemas de bombeamento fotovoltaico, além dos aspectos importantes da energia fotovoltaica. Em seguida é feito um histórico da aplicação desse tipo de sistema na irrigação, bem como uma revisão bibliográfica de alguns trabalhos, sobre o tema, realizados por

pesquisadores.

No Capítulo 3 é realizado uma contextualização sobre a tecnologia fotovoltaica, suas aplicações, estado da Arte e é feita uma ponderação dos temas que são significativos para o correto dimensionamento a fim de mensurar os recursos na geração de energia.

No Capítulo 4 são feitas análises e ponderações sobre itens essenciais para dimensionamento do projeto de irrigação em pequenas propriedades rurais abastecidas por poços artesianos.

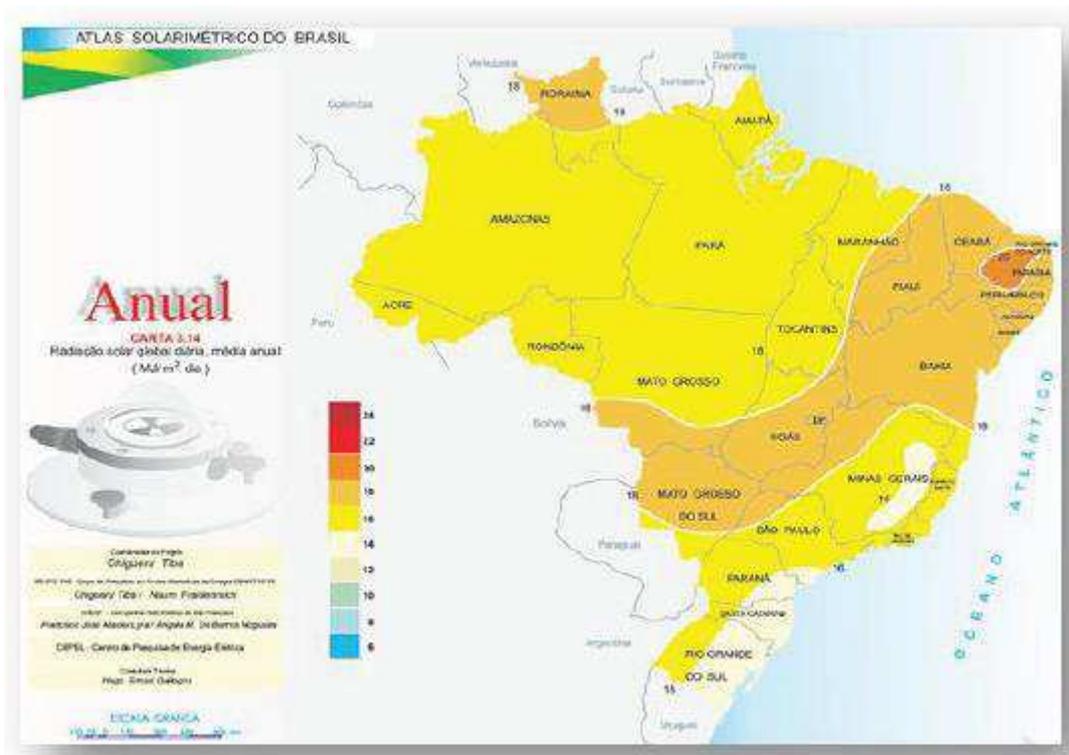
No Capítulo 5 são feitas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros e aprofundamentos no estudo da geração fotovoltaica

2 CAPÍTULO 2: ENERGIA FOTOVOLTAICA

2.1 Energia fotovoltaica no Brasil e no mundo

O Sol é responsável pela origem de praticamente todas as fontes de energia na Terra. A energia gerada pelo Sol é fonte de calor e luz e é inesgotável na escala terrestre de tempo. Através de sistemas de captação pode ser convertida em outras formas de energia, de forma simplificada, para fins de engenharia, em energia solar térmica e energia solar fotovoltaica.

Figura 2.1: Atlas Solarimétrico do Brasil



Fonte: COPEL, 2017

Apesar do regime de radiação solar na horizontal ter uma grande variação em função da latitude, este parâmetro não chega a ser impeditivo para a adoção de sistemas fotovoltaicos em todo o território nacional como mostrado na figura 2.1.

A energia solar fotovoltaica encontra-se em alto grau de desenvolvimento tecnológico, o que lhe dá um caráter de grande potencial de disseminação, muito embora ainda conte com a barreira dos altos custos dos equipamentos.

Os sistemas fotovoltaicos são de fácil transporte e instalação, tendo como uma das vantagens, a facilidade de ampliação do projeto em virtude de seu caráter modular. Outro ponto positivo desta tecnologia é o fato de requerer pouca manutenção, e no caso específico dos grupos motobombas fotovoltaicos, estes tem grande durabilidade e eficiência no funcionamento, relativamente as outras opções.

Após o embargo do petróleo em 1973, o uso da energia solar fotovoltaica deixou de ser uma tecnologia fundamentalmente espacial para ser amplamente utilizada em sistemas terrestres. Naquela época, foram disponibilizados fundos em todo o mundo, dedicados à pesquisa, desenvolvimento e demonstração de sistemas de geração de energia a partir de fontes renováveis e em especial dos sistemas fotovoltaicos terrestres.

Tendo em vista que as tecnologias a combustíveis fósseis e nucleares, produzem na geração, grandes quantidades de resíduos sólidos, líquidos e gasosos, a primeira, e radioativos, a segunda; e ainda considerando os riscos de acidentes, sejam eles decorrentes de falhas técnicas ou humanas, no transporte, na pesquisa, na geração ou ainda nos canteiros de resíduos, a tecnologia solar fotovoltaica, constitui uma das opções energéticas menos prejudiciais ambientalmente.

Cabe aqui lembrar, que a geração hidroelétrica causa grandes impactos ambientais, tanto nas áreas alagadas como nas faixas de ocupação das linhas de transmissão. Este último impacto é inerente a todas as tecnologias de geração

centralizada de energia.

Em realidade, a tecnologia fotovoltaica, quando de sua fabricação, também produz resíduos químicos, mas sendo um volume relativamente pequeno, e por tratarem-se de substâncias caras, a própria indústria as reutiliza, ou seja, estas substâncias não chegam ao lugar da geração elétrica. Por outro lado, quando o sistema faz uso de armazenamento eletrolítico, ou seja, de baterias, há que ter-se o cuidado de que estas, uma vez inutilizadas, voltem para as indústrias para serem recicladas. No Brasil, grande parte das baterias utilizadas são devolvidas ao comércio, tendo o usuário um desconto no preço da nova.

A geração fotovoltaica tem encontrado inúmeras aplicações no mundo inteiro, não somente para sistemas de geração autônoma como também e cada vez com maior importância, em sistemas conectados a rede elétrica existente. A seguir apresentam-se algumas das principais aplicações desta tecnologia:

- Aplicações espaciais - sistemas fotovoltaicos em satélites e outras missões espaciais.
- Sistemas conectados a rede elétrica - Sistemas residenciais comerciais ou industriais que geram energia elétrica e a entregam ou recebem da rede segundo seu balanço geração/consumo.
- Grandes Centrais de Geração - Sistemas que entregam a energia gerada diretamente à rede elétrica.
- Produtos de consumo - células solares em calculadoras, relógios e outros pequenos objetos, Além de projetos em desenvolvimento para indústria automobilística.
- Sistemas remotos autônomos - Sistemas residenciais, comerciais, para pequenas comunidades, postos de saúde, estações meteorológicas, plataformas marinhas, sistemas de telecomunicações, carregadores de baterias e bombeamento de água.

No contexto brasileiro, uma mudança estratégica do arranjo de sistemas de geração e transmissão de eletricidade encontra-se em curso na sociedade contemporânea. O modelo de geração centralizado em usinas hidrelétricas ou térmicas, característico do planejamento elétrico até o século XX, modifica-se por meio do uso de um bom planejamento sistêmico, significativo e inteligente. A difusão da utilização de tecnologias atuais de conversão a partir de fontes renováveis de energia compõe o cenário de expansão, que une o conjunto de usinas de grande e médio porte com um modelo de geração descentralizada. Modernas tecnologias de sistemas renováveis proporcionam importantes alternativas à expansão do sistema elétrico nacional, com capacidade de atendimento da demanda, com requisitos de segurança, confiabilidade e sendo economicamente viáveis e de base sustentável.

No Brasil, a ANEEL lançou em 2011 a chamada nº 013/2011 do projeto estratégico “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira” com o objetivo de facilitar a inserção da geração solar fotovoltaica na matriz energética, ao tempo que incentiva o desenvolvimento do país em toda sua cadeia produtiva, na indústria solar com a nacionalização da tecnologia empregada.

Além disso, a chamada busca viabilizar economicamente a produção, instalação e monitoramento da geração solar fotovoltaica para injeção de energia elétrica nos sistemas de distribuição e/ou transmissão dentre outros objetivos.

Porém o principal objetivo desta iniciativa foi a proposição de arranjos técnicos e científicos para o projeto de geração de energia elétrica por meio da utilização da tecnologia solar fotovoltaica, de forma integrada e sustentável. (FRONTIN, 2017)

2.2 Uso de energia fotovoltaica para a agricultura no Brasil

O início da comercialização de sistemas fotovoltaicos para bombeamento data do final da década de 70, mais ou menos 20 anos após suas primeiras aplicações. Porém é difícil de prever quando essa tecnologia começou a ser implementada para irrigações. (FEDRIZZI,2003).

A aplicação de sistemas de bombeamento FV consiste numa tecnologia sustentável bastante promissora, principalmente quando aplicada em regiões secas e carentes de água, que são geralmente as mais favoráveis em termos de insolação. Outro aspecto muito favorável dessa aplicação refere-se à possibilidade de armazenamento da água bombeada em vez do armazenamento da eletricidade produzida pelos módulos FV. Isso diminui a importância de um fator limitante do uso da energia solar que é sua variabilidade no tempo e a necessidade de sistemas de armazenamento para tê-la de forma contínua (ALVARENGA, 2001). Os reservatórios de água substituem as baterias elétricas com custo muito menor.

Além dessas vantagens, esse tipo de sistema é de fácil instalação, possui baixo nível de manutenção, que é uma necessidade para áreas ermas, longa vida útil dos painéis FV, bombeamento sem emitir ruídos ou poluição e o agricultor não está sujeito a aumento do preço da eletricidade ou combustível, para que haja a disseminação de uma nova tecnologia não basta que o sistema seja tecnicamente confiável.

O dimensionamento é de fundamental importância, não somente em termos de bons resultados no funcionamento do sistema, como também em termos econômicos. Um bom dimensionamento, deve ser capaz de proporcionar o melhor desempenho com baixos custos, e alongando ao máximo a vida útil dos componentes do sistemas e do projeto como um todo.

Nessa monografia são introduzidos conceitos sobre sistemas de irrigação e serão apresentados os elementos que formam um sistema de bombeamento FV bem como o estado da arte desse tipo de sistema.

3 **CAPÍTULO 3: Tecnologia do bombeamento fotovoltaico**

Nesta monografia é abordada a conversão direta da luz em eletricidade, ou seja, a conversão fotovoltaica.

O setor de telecomunicações foi o primeiro a impulsionar o desenvolvimento da tecnologia FV, buscava fontes de energia que se comportassem bem em localidades remotas.

Posteriormente se deu o uso espacial, com entendimento de que a célula solar é o meio mais adequado para fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos de permanência no espaço e a necessidade de energia para satélites (CRESESB, 2014).

O interesse em ampliar as aplicações terrestres se deu com a crise energética de 1973, modificando-se assim o perfil das empresas envolvidas no setor. A partir daí foram disponibilizados fundos em todo o mundo voltados à pesquisa e desenvolvimento dessa tecnologia (CRESESB, 2014).

O custo inicial dos sistemas FV ainda é o principal empecilho para sua difusão em larga escala. No entanto, a tecnologia está se tornando cada vez mais competitiva, tanto porque seus custos estão decrescendo, quanto porque a avaliação dos custos das outras formas de geração está se tornando mais real, levando em conta fatores que eram anteriormente ignorados, como a questão dos impactos ambientais.

As principais aplicações terrestres podem ser agrupadas nas seguintes categorias (BORGES NETO; CARVALHO, 2012):

- a) Produtos de consumo: calculadoras, relógios, brinquedo, entre outros.
- b) Interligação com a rede elétrica: nessa aplicação são encontrados sistemas centralizados e descentralizados.
- c) Modo híbrido: conectados a outros tipos de geração, notadamente geradores diesel, para o abastecimento de consumidores não conectados à rede elétrica.
- d) Modo autonomy: conjunto de motobombas em unidades de bombeamento de água, fornecimento de eletricidades para baterias.

3.1 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

A principal forma de geração de energia elétrica através da energia do Sol se dá pelo uso de painéis FV. Para entender como acontece esse processo a seguir é explicado o efeito FV e as características elétricas das células que constituem o painel.

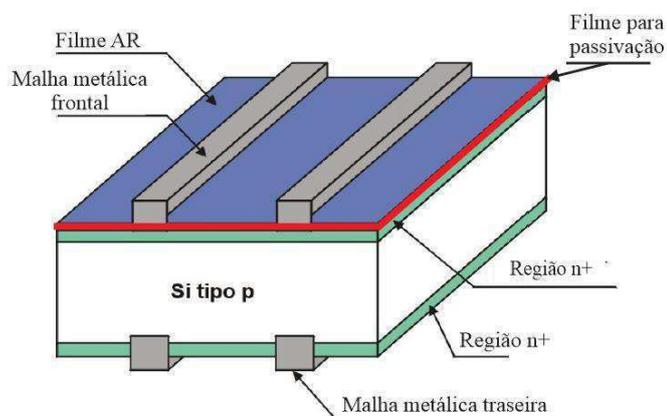
Efeito Fotovoltaico

O efeito FV, relatado por Edmond Becquerel¹, em 1839, é a diferença de potencial, produzida pela absorção da luz, entre os extremos do material semicondutor (CRESESB,2014). A célula FV é a unidade fundamental do processo de conversão, a Figura 3.1 mostra seu esquema simplificado.

O efeito se dá a partir da dopagem de um material semicondutor, geralmente o silício, com outro elemento, como boro ou fósforo. No processo de dopagem do silício, o silício dopado com fósforo é denominado de silício tipo N (negativamente carregado) e o silício dopado com boro é chamado de silício tipo P (positivamente carregado).

Os dois elementos, P e N, juntos compõem a célula, fazendo que haja a criação de uma junção pn e formando um campo elétrico que impede que elétrons do silício tipo N migrem para o tipo P. Essa neutralidade elétrica é rompida no momento que fótons, presentes na irradiação solar, com energia superior à banda de energia incidirem nessa junção, onde o campo elétrico seja diferente de zero, havendo assim uma excitação dos elétrons presentes neste material e, conseqüentemente, o surgimento de uma corrente através da junção. (BRAGA, 2008).

Figura 3.2: Esquema simplificado da célula fotovoltaica



Fonte: EPE, 2012.

Em 1839, Becquerel descobriu o efeito fotovoltaico ao constatar a capacidade que uma determinada solução ácida tinha de conduzir corrente elétrica quando exposta à luz. As primeiras células, denominadas células fotovoltaicas ou solares, foram fabricadas em selênio e desenvolvidas por C. E. Frits, alguns anos depois, após a ocorrência do efeito fotovoltaico no estado sólido do selênio ser observada por W.G. Adams e R.E. Day. Em 1914 as células solares de selênio já apresentavam eficiência de 1 a 2% (Falcão, 2005).

No ano de 1954, com o avanço na área de semicondutores, as primeiras células de silício cristalino passaram a ser fabricadas nos Estados Unidos, com eficiência de 6% para uma área de 2 cm². Nessa época as células ainda não tinham grande apelo comercial até que, em 1958, o programa espacial americano passou a aplicar essa tecnologia como fonte de energia para os sistemas de comunicação dos satélites.

A partir daí avanços na tecnologia de transistores e semicondutores contribuíram fortemente para o avanço no desenvolvimento das células solares. Contudo, os preços associados aos dispositivos ainda eram bastante elevados, quando o watt-pico² chegou a custar 150 dólares americanos. Até que, em meados dos anos 70, a crise do petróleo resultou no aumento do custo de outras fontes de energia tornando

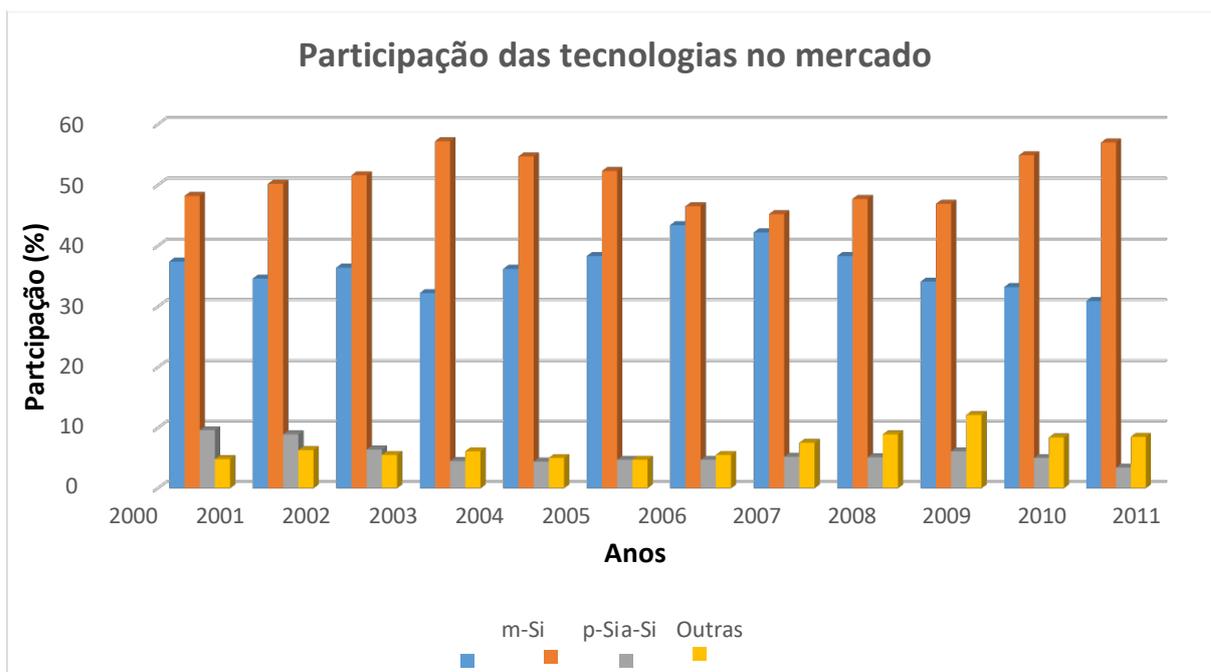
a energia fotovoltaica mais atrativa e acessível. De acordo com Pinho e Galdino (2014), em 2013 o preço do módulo fotovoltaico de c-Si era de cerca de 0,60 €/Wp na Europa, 0,65 US\$/Wp nos Estados Unidos e menos de 3 R\$/Wp no Brasil.

Ao mesmo tempo em que a tecnologia de silício cristalino avançava outras tecnologias, tais como silício amorfo, telureto de cádmio (CdTe), arseneto de gálio (GaAs) e disseleneto de cobre e índio (CIS e CGIS), surgiam como alternativas promissoras. No entanto, até hoje as células fotovoltaicas fabricadas a partir de silício mono e policristalinos têm dominado o mercado mundial. Na Figura 3.2 pode-se observar que as células fabricadas com c-Si correspondem a mais de 81% da produção mundial desde 2000. Além das tecnologias citadas anteriormente e vistas no gráfico, células multijunção de alta eficiência, baseadas em corante e em polímeros estão sendo desenvolvidas.

¹ Alexandre-Edmond Becquerel, físico francês.

² Medida de potência associada a células fotovoltaicas. Significa a potência em Watts fornecida em condições ideais de ensaio.

FIGURA 3.3: Distribuição das tecnologias no Mercado mundial



Fonte: Monteiro (2016)

3.1.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Células fotovoltaicas são dispositivos semicondutores capazes de gerar energia elétrica por meio da conversão de energia solar luminosa em corrente elétrica. Como citado na seção anterior, as células solares podem ser fabricadas a partir de vários tipos de elementos, ligas ou compostos semicondutores, os quais são classificados segundo sua disposição atômica.

Os elementos classificados como semicondutores possuem banda de valência totalmente preenchida por elétrons e banda de condução vazia na temperatura zero absoluto (0 K) se comportando, portanto, como isolantes nessa temperatura. A banda proibida, ou *gap*,

A migração de elétrons para a banda de condução e geração das lacunas na banda de valência resulta da incidência de fótons no material semiconductor, os quais devem ter energia superior a energia da banda proibida do material. A energia do fóton pode ser determinada conforme a Equação 3.1 abaixo, e está diretamente relacionada à cor da luz.

$$E_f = hf \quad (3.1)$$

Onde: E_f – energia do fóton em Joules (J);

h – constante de Plank (J.s);

f – frequência da luz em Hz;

O termo “termalização” marcado na Figura 3.3 representa a dissipação de energia em forma de calor devido a absorção de fótons com energia superior a energia do *gap*. Já E_{fe} representa o nível de energia de Fermi, nível médio de energia dos portadores de carga.

De acordo com Ghensev (2006), além as parcelas de radiação que são dispersas antes de chegarem as células, da radiação total que incide sobre uma célula fotovoltaica grande parte é dispersa durante o processo de conversão. Cerca de 25% da radiação não tem índices de energia suficientes para desencadear a movimentação dos portadores de carga, 30% apresenta nível de energia muito elevados, não sendo assimiladas pelas células e causando apenas aquecimento. Ocorre ainda dispersão no processo de recombinação dos pares elétrons-lacunas, na estrutura interna do material e pelos efeitos de reflexão. Como resultado, apenas cerca de 20% da radiação é transformada em energia elétrica.

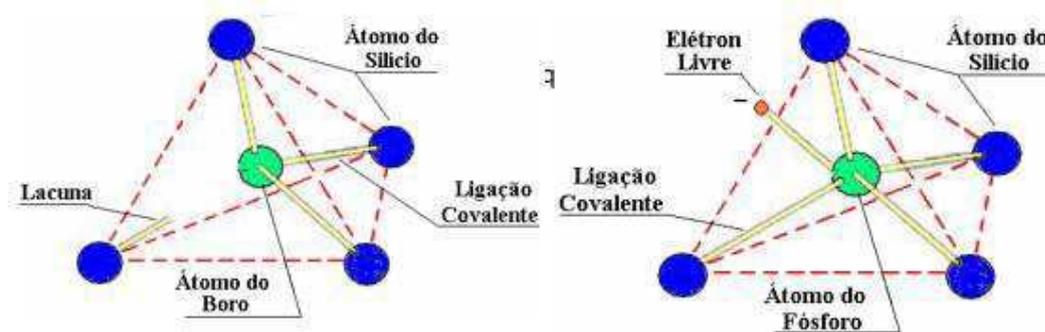
Para potencializar a condução em materiais semicondutores intrínsecos se faz necessária a existência de um campo elétrico, separando os portadores através de uma junção *pn*. A fim de construir uma junção *pn*, impurezas, ou elementos dopantes, são inseridos no semiconductor de forma a mudar as propriedades elétricas do material. Essa ação é chamada de dopagem.

3.2 Processo De Dopagem

Nessa seção é explicado o processo de dopagem e formação da junção *pn* no silício cristalino, tendo em vista que esse é o material mais utilizado na produção de células fotovoltaicas. Tal material apresenta átomos tetravalentes e que formam ligações covalentes com átomos vizinhos, portanto cada átomo compartilha 8 elétrons. Introduzindo um átomo pentavalente na estrutura, o elétron excedente tem energia de ligação muito baixa, em relação ao seu átomo de origem, e é facilmente transportado da banda de valência até a banda de condução, mesmo para temperaturas ambientes.

Elementos que doam elétrons são chamados impurezas ou dopantes do tipo *n*, tipicamente são utilizados fósforo, arsênio e antimônio. Quando o contrário acontece, um átomo trivalente é inserido no material, faltando um elétron para formar todas as ligações com os átomos de Si, forma-se uma lacuna. Os elementos principais usados nesse tipo de dopagem são o boro, gálio, alumínio e índio e são denominados dopantes tipo *p* pelo fato de serem impurezas aceitadoras de elétrons. Na figura 3.4 abaixo se pode observar as ligações formadas nos dois tipos de dopagem.

Figura 3.5: Processo de dopagem do átomo de silício



Fonte: Ghensev, 2006.

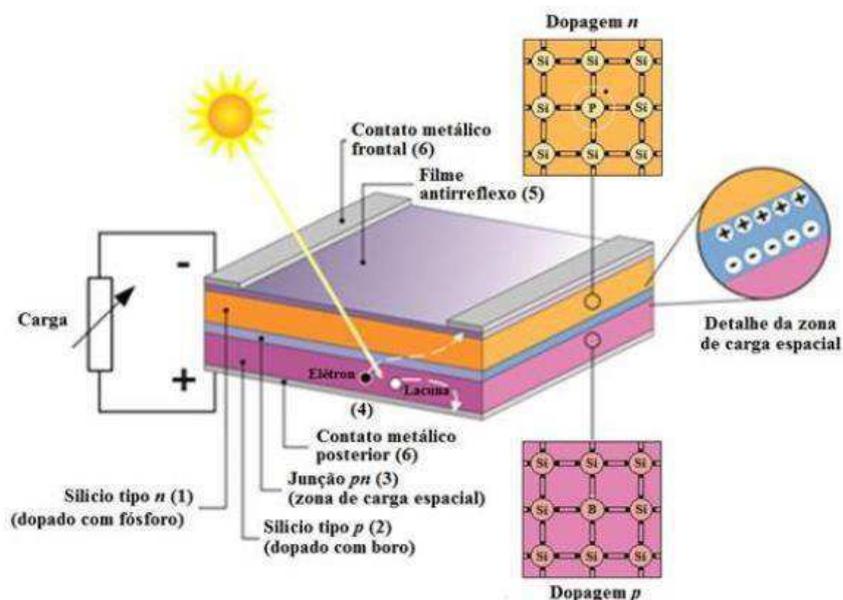
Normalmente a dopagem do tipo p é feita numa concentração de $\sim 1:10^7$, ou seja, cerca de um átomo de dopante do tipo p para 10 milhões de átomos de Si, enquanto que na dopagem do tipo n a proporção é de $\sim 1:10^3$, um átomo de dopante do tipo n para mil átomos de Si. Na região tipo n , as concentrações dos portadores negativos e positivos podem ser calculadas a partir da concentração dos portadores intrínsecos, segundo as Equações 3.2 e 3.3.

$$n \cong N_d \quad (3.2)$$

$$p = \frac{n_i^2}{N_d} \quad (3.3)$$

Onde: n_i – concentração de portadores intrínsecos; n – concentração de portadores negativos; p – concentração de portadores positivos; e N_d – concentração do dopante tipo n . Na região tipo p , acontece o inverso, de forma análoga (Pinho e Galdino, 2014).

Figura 3.6: Célula fotovoltaica de junção pn



Fonte: Moehlecke e Zanescio, 2005.

Quando se realiza os dois tipos de dopagem, uma em cada lado da lâmina de silício, forma-se a junção pn, como ilustrado na Figura 3.8. Os elétrons em excesso do lado n migram para a região p deixando a região n com cargas fixas positivas e a região p com cargas fixas negativas. Essa movimentação de partículas ocorre até que o equilíbrio seja atingido, quando o campo elétrico formado pelo excesso de elétrons e lacunas nas regiões n e p impede o traslado dos portadores de carga.

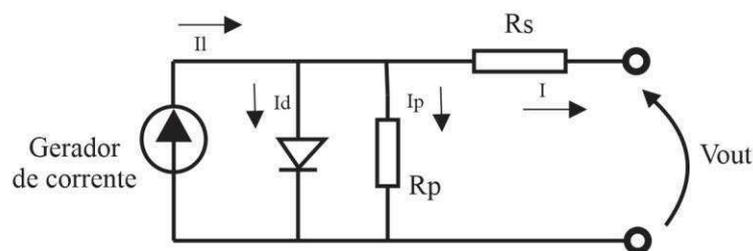
Nesse momento, a zona de depleção/carga espacial é formada criando uma barreira de potencial, dando origem ao efeito fotovoltaico. Ainda na fabricação das células, se faz necessário a conexão de contatos metálicos que, quando conectados por meio de um condutor, permitem a circulação da corrente elétrica gerada.

3.3 Características Elétricas

Uma célula fotovoltaica pode ser representada por uma conexão em paralelo de um diodo, que representa a junção *pn*, e um gerador de corrente, tal qual mostrado na Figura 3.6.

Então, a corrente gerada na célula é a soma da corrente no diodo, quando não há tensão externa de polarização, e a corrente gerada em decorrência da incidência da radiação solar.

Figura 3.7: Circuito equivalente da célula fotovoltaica



Fonte: Próprio autor.

Considera-se as resistências R_s e R_p , como mostrado na figura acima, devido as resistências em série, associadas a junção metal-semicondutor, malhas metálicas e regiões dopadas, e também, devido as resistências em

paralelo associadas a pontos de curto circuito na junção *pn*. A partir da equação da corrente no diodo ideal e do circuito equivalente, escreve-se a equação da curva característica I-V da célula, que pode ser vista na Figura 3.7.

$$I = I_L - I_0 \left[\left(\exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right) \right] - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (3.4)$$

Onde:

I_L – corrente fotogerada (A);

I_0 – corrente reversa de saturação no diodo (A);

q – carga do elétron ($1,6 \times 10^{19}$ C);

k – constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$);

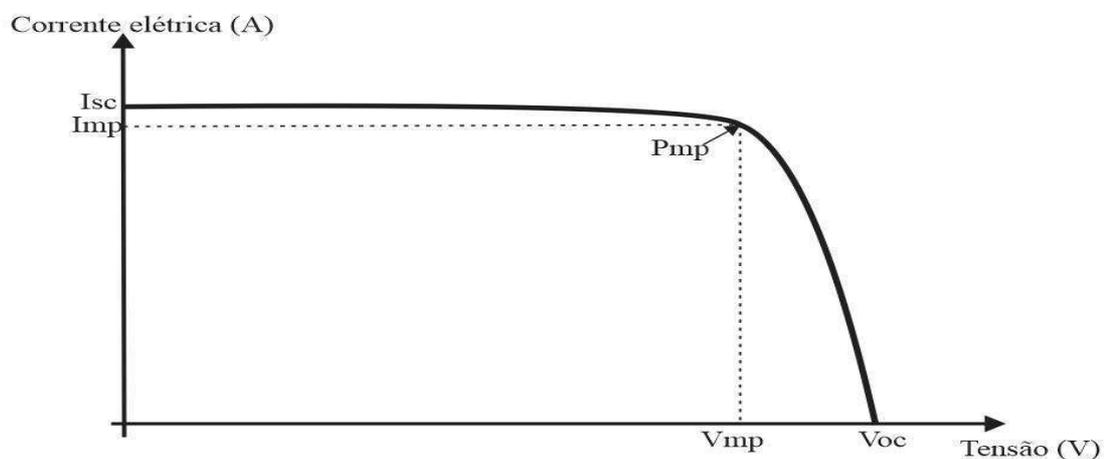
T – temperatura absoluta (K);

V – tensão nos terminais da célula;

R_s – resistência série;

R_p – resistência paralelo.

Figura 3.8: Curva I-V



Fonte: Próprio autor

Para se obter as curvas características consideram-se as condições padrões, com radiação de 100 W/m^2 e temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. A partir da curva característica, ilustrada na Figura 3.7, pode-se determinar os parâmetros que caracterizam as células ou módulos fotovoltaicos, cujos valores normalmente são fornecidos pelos fabricantes:

Corrente de curto-circuito (I_{sc}): máxima corrente obtida quando a tensão nos terminais da célula é nula. O valor dessa corrente depende da área da célula, da irradiância solar, da distribuição espectral, entre outros, portanto a densidade de corrente de curto-circuito varia conforme a tecnologia empregada como, por exemplo, c-Si (38 mA/cm^2), CdTe ($26,95 \text{ mA/cm}^2$) e a-Si ($16,75 \text{ mA/cm}^2$);

Tensão de circuito aberto (V_{oc}): máxima tensão entre os terminais quando da incidência de iluminação para a condição de resistência de carga infinita, ou seja, com o circuito aberto e sem circulação de. Determina-se a partir da equação:

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (3.5)$$

Ponto de máxima potência (P_{mp}): representa o ponto da curva no qual o produto Tensão \times Corrente tem máxima eficiência, encontra-se aproximadamente no joelho da curva, porém não é possível determinar o valor analiticamente, medida em Wp .

V_{mp} e I_{mp} : tensão e corrente no ponto de máxima potência, em Amperes e Volts, respectivamente.

Fator de Forma (FF): o fator de forma é definido pela equação:

$$FF = \left(\frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \right) \quad (3.6)$$

É um parâmetro que determina a potência máxima real da célula.

– **Eficiência (η):** mede a eficiência do processo de conversão de energia, está relacionado diretamente com a área da célula (A) e a irradiância solar incidente (G). A partir da equação 3.7 determina-se a eficiência de uma célula.

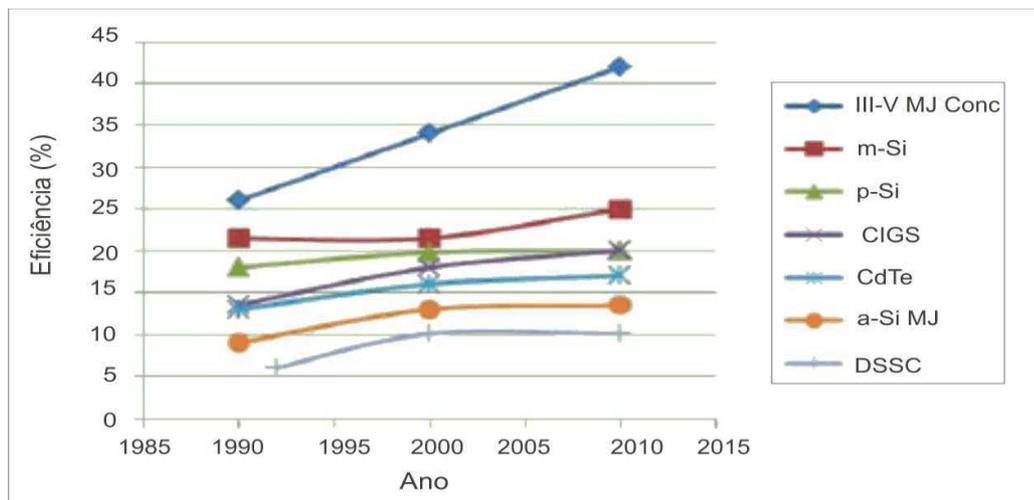
$$\eta = \frac{P_{mp}}{A.G} 100\% \quad (3.7)$$

3.4 GERAÇÕES DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

A produção de células é dividida em três gerações. A Figura 3.9 abaixo apresenta a evolução em termos de eficiência das tecnologias (CRESESB, 2014). A primeira geração utiliza silício policristalino (p-Si) e monocristalino (m-Si), tecnologia consolidada, confiável e com eficiência entre 16 a 25%.

A segunda geração utiliza filmes finos, pode ser aplicado em diversos substratos, com as seguintes cadeias produtivas: silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS), índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). Esta geração é menos eficiente, de 8 a 20%.

Figura 3.9: Desenvolvimento das células fotovoltaicas



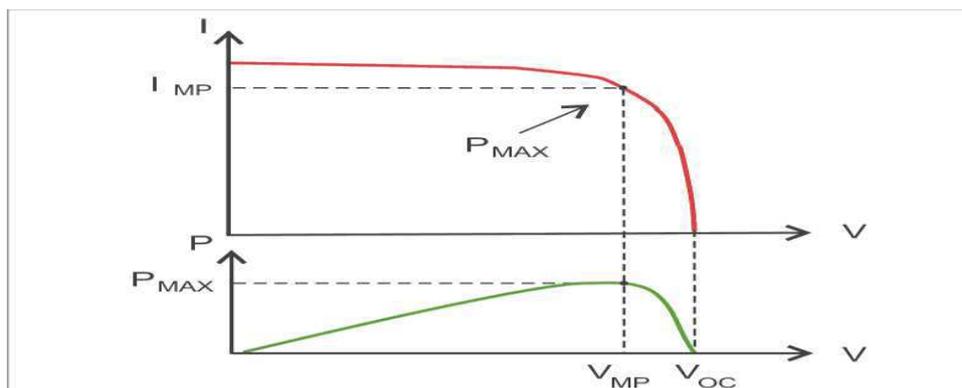
Fonte: CRESESB, 2014.

A terceira geração, ainda em fase de pesquisa, é constituída pelas células fotovoltaicas multijunção (MJ) e células fotovoltaicas para concentração (CPV - *Concentrad*

Photovoltaics), células sensibilizada por corante (DSSC – *Dye-Sensitized Solar Cell*) e células orgânicas e poliméricas (OPV – *Organic Photovoltaics*).

As curvas corrente (I) x tensão (V) e potência (P) x tensão (V) típicas e o ponto de operação de máxima produção de potência são mostrados na Figura 3.9 abaixo.

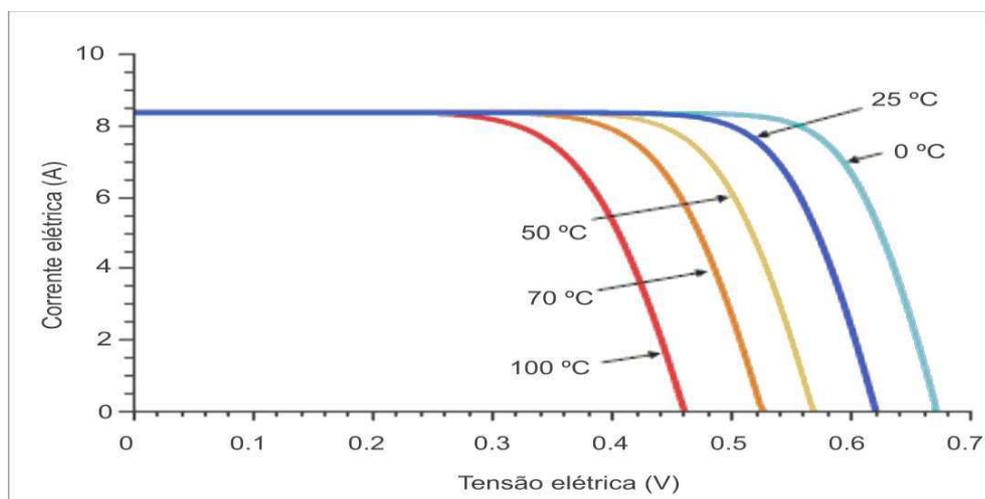
Figura 3.10: Curvas típicas da célula fotovoltaica



Fonte: EPE, 2012.

A eficiência da célula ou do painel FV é definida, em condições de referência (“*Standard Test Conditions – STC*”), pela relação entre a potência máxima de saída da célula normalizada pela área da célula em m^2 e o padrão de massa de ar de $1,5, 1.000 W/m^2$ e temperatura da célula de $25^{\circ}C$ (BORGES NETO; CARVALHO, 2012).

Figura 3.11: Curvas I x V ($100W/m^2$ e temperaturas diferentes)

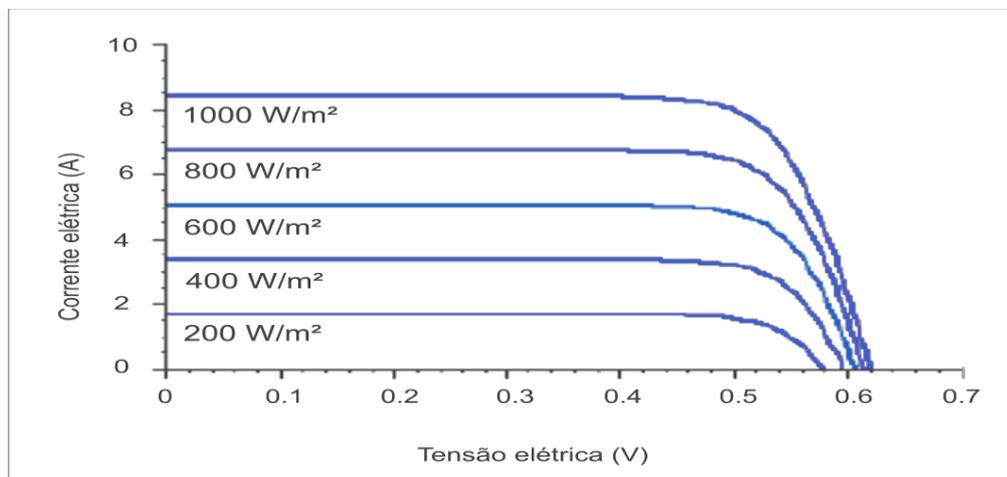


Fonte: CRESESB, 2014.

Os dois fatores principais que afetam a eficiência da conversão são a temperatura ambiente de operação e a intensidade da irradiância solar incidente sobre a célula.

Este último fator é afetado tanto pela nebulosidade local quanto pelo ângulo de inclinação da célula em relação ao sol. A eficiência da conversão se reduz ao longo da vida útil das células a taxa próxima de 1% ao ano (CRESESB, 2014).

Figura 3.12: Curvas I x V (a 25°C e irradiâncias diferentes)



Fonte: CRESESB, 2014.

A tecnologia de conversão da radiação solar em energia elétrica é relativamente nova, tendo o início de seu crescimento nos anos cinquenta com a “revolução dos semicondutores” para aplicações eletrônicas em geral.

O fluxo de energia solar que atinge a superfície da Terra corresponde a milhares de vezes a energia atual consumida pelos seres humanos. O potencial desse recurso é enorme e torna a energia solar um componente crucial de um portfólio renovável destinado a reduzir as emissões globais de gases do efeito estufa na atmosfera. No entanto, o uso atual desse recurso representa menos de 1% da produção total de eletricidade proveniente de fontes renováveis.

Apesar da implantação de inúmeros sistemas fotovoltaicos nos últimos 20 anos, as tecnologias solares ainda sofrem com algumas desvantagens que as tornam pouco competitivas em um mercado de energia dominado por combustíveis fósseis (alto custo de capital, eficiência de conversão moderada e intermitência).

Do ponto de vista técnico-científico, o desenvolvimento de novas tecnologias com maior eficiência de conversão e baixos custos de produção é requisito primordial para permitir a implantação de energia solar em larga escala.

Inicialmente a conversão fotovoltaica de energia era extremamente cara o que a manteve restrita ao setor aeroespacial. Entretanto, no final da década de setenta, melhorias nas técnicas de fabricação combinadas com o aumento do volume de produção resultaram na redução nos preços, proporcionando o início de sua utilização em aplicações terrestres.

Este item é dedicado a discorrer sobre o estado da arte das tecnologias fotovoltaicas partindo do conceito básico até as mais recentes tecnologias empregadas atualmente na fabricação de células FV, em seguida trataremos dos elementos constituintes do processo de bombeamento fotovoltaico.

A tabela 2 resume alguns dados das tecnologias fotovoltaicas atuais, incluindo o CPV (Concentração Fotovoltaica).

TABELA 2: DADOS DAS TECNOLOGIAS FV ATUAIS

Tecnologias FV atuais	Si-Cristalino		Película Fina			
	Mono c-SI	Multi c-SI	a-SI	CdTe	CIGS	HCPV
Eficiência Celular (registro) máx.,(%)	25,6	20,4	11,6	19,6	18,7	44,4
Eficiência de módulo máx (%)	22,9	18,5	11	17,5	15,7	35,9
Eficiência de módulo comercial (%)	15-19	11-15	7-9	10-13	7-14	24-28
Vida útil, em anos	25-30	25-30	25	25	25	n.a
Tempo de retorno de energia, em anos	< 2	1-1,5	1-,15	~0,6	< 1	< 1
Custo do módulo USD/kW	800-1.140		650-750	770-1.500		3.100-4.400
Custo do módulo USD/kW (Europa)	440-460		330	410	-	
Custo BOS USD/kW	800-1700					
Custo O&M	Estimado a 1%-1,5% do investimento por ano					

Legenda: BOS-Balanco de Sistema (controladores de carga, inversores,baterias,cabeamento, transformadores,etc.); c-Si-Silício cristalino; a-SI-Silício amorfo; CdTe-Telureto de Cádmio; CIGS-Cobre,Índio,Gálio e Seleneto; HCPV-High Concentrated fotovoltaic.

Fonte: Livro Jaíba Solar (2017), adaptada

3.4.1 TECNOLOGIAS DE SILÍCIO

As células fotovoltaicas (FV) convertem a luz solar diretamente em eletricidade. Atualmente, o silício cristalino (c-Si) e as tecnologias de película fina (TF) dominam o mercado global de FV. Os intervalos do sistema de c-Si FV (wafers) de silício de grau solar (alta pureza) são feitos de células que são montadas em módulos e conectadas eletricamente. A tecnologia de TF (película fina) FV consiste em camadas finas de material semi-condutor depositado sobre substratos econômicos de grande porte, tais como vidro, polímero ou metal. O FT de silício cristalino é o mais antigo, e atualmente domina a tecnologia FV com aproximadamente 91% da cota de mercado da tecnologia de silício com base na produção total de wafer (multi e monossilício cristalino) conforme tabela 3. (FRONTIN,2017)

TABELA 3: PRODUÇÃO DE TECNOLOGIA CELULAR

TECNOLOGIA CELULAR		PRODUÇÃO FV EM 2013
Multi c-Si		54,9 %
Mono c-Si		36,0 %
Película Fina	a-Si	2,0%
	CdTe	5,1%
	CI(G)S	2,0%

Fonte: Livro Jaíba Solar, 2017 adaptado

O conceito de junção p-n por trás dessa categoria de células foi desenvolvido por Chapin et al., em 1954. A primeira célula solar de silício que foi feita tinha eficiência de 4,5%. Hoje em dia, o registro de eficiência de conversão de energia para essa classe de células é superior a 25% o que se aproxima estreitamente do limite de Shockley-Queisser.

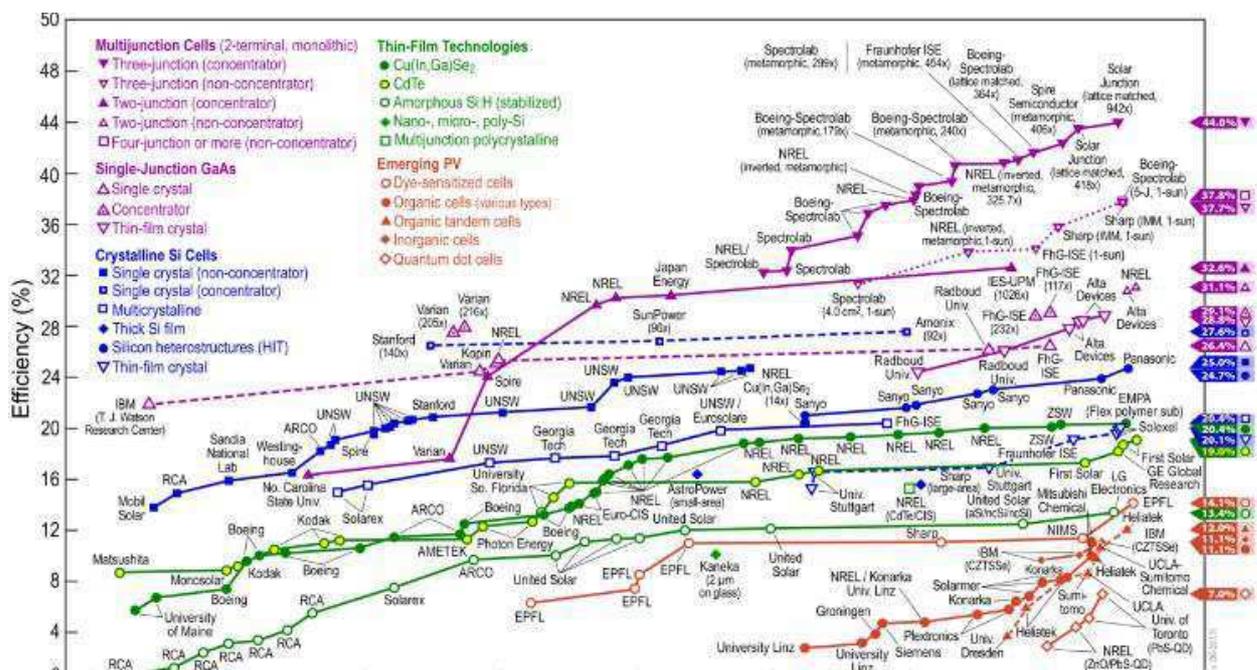
(FRONTIN, 2017)

3.4.2 VISÃO GERAL SOBRE PELÍCULAS FINAS

O diagrama na figura 3.12 monitora o progresso dos fotovoltaicos obtidos com as diferentes abordagens nos últimos 40 anos. Os mais altos níveis de eficiência são obtidos com as células solares no composto semiconductor III-V para altos fatores de concentração de sol. As melhores células solares de CdTe (Telureto de Cádmio) foram obtidas em 2014, pela First Solar, com eficiências registradas de 20,4 %. Entre as outras tecnologias de película fina vale a pena mencionar o registro muito promissor de 20,8% alcançado pela empresa alemã ZSW, no final de 2013, com tecnologia de Cobre, Índio, Gálio e Seleneto (CIGS). Nenhuma grande melhora foi obtida nos últimos 10 anos com a tecnologia de película fina de silício amorfo, que segue muito atrás com sua eficiência record (13,4% para uma estrutura de a-Si/nc-Si/nc-Si datada de 2012, pela LG Electronics.)

O maior esforço em tal tecnologia centra-se, nesse caso, na melhoria da eficiência em termos da estabilidade, que é a fraqueza da tecnologia de silício amorfo.

Figura 3.13: Evolução das tecnologias



Fonte: (Livro Jaíba Solar, 2017)

No resumo histórico da figura de eficiência da célula para várias tecnologias fotovoltaicas, as mais altas eficiências foram obtidas com células solares de multijunção aumentando a uma taxa de 1% ao ano, nos últimos anos.

Apesar da crise econômica que envolveu as principais economias mundiais, os anos mais rentáveis para a indústria fotovoltaica foram os anos de 2008 à 2011 graças também a adoção de medidas e mecanismos de incentivo de várias nações. Os anos de 2011 à 2013 caracterizaram-se pela queda do preço dos módulos de silício cristalino. Esse fato, combinado com o início da instabilidade de eficiência, diminuiu o apelo à tecnologia de película fina no mercado. As películas finas sofreram uma queda de preço no mercado definida pelos módulos de silício cristalino e não se equipararam totalmente a eles. Assim, não obtiveram êxito para ganhar cotas de mercado contra o Si que ainda contam com aproximadamente 91% do mercado FV.

A tabela 3 nos dá uma ideia da evolução de eficiência tecnológica:

TABELA 3: TECNOLOGIAS FV

		c-Si	mc-Si	CdTe	CIGS	a-Si / μc-Si
2008	Eficiência Teórica da Tecnologia	28	28	30	30	29
	Eficiência padrão do mercado (%)	19,6	18,5	11,1	12	7-9
	Eficiência alcançável em 2015 (%)	> 20	20	18	18	18
	Custo de Fabricação por watt (USD/W _p)	2,9	2,2-2,9	1	2,9	1,45
	Custo previsto a partir de 2020 (USD/W _p)	< 0,8	< 0,8	< 0,5	< 0,5	< 0,5
2013	Melhor Eficiência de mercado (%)	22	18	17	14	9-11
	Eficiência alcançável em 2020 (%)	28	20	25-28	>20	15
	Custo do módulo por watt (USD/W _p)	0,8-0,9	0,7-0,8	0,7	0,8	0,5
	Custo previsto a partir de 2020 (USD/W _p)	0,5	0,4-0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5

Fonte: MIP 2013

3.4.3 CONCENTRADOR FOTOVOLTAICO

A principal característica desse tipo de tecnologia que pode ser definida como a “3ª geração das células fotovoltaicas” deve ser a capacidade de aumentar significativamente a eficiência de conversão, de modo que exceda os limites termodinâmicos conhecidos na 1ª e na 2ª geração.

A ideia básica por trás desse tipo de célula solar já é conhecida desde os anos 60, e consiste na realização de estruturas compostas por várias células elementares, cada uma das quais é otimizada para converter uma parte bem definida do espectro solar e “empilhada” sobre a outra., como podemos ver na figura 3.14. A célula externa é aquela com maior gap de energia, e as células internas são caracterizadas pela diminuição progressiva dos gaps de energia.

Pelo princípio das células solares de multijunção : a diferença de energia mais elevada permite que mais energia possa ser absorvida em comprimento de ondas mais curtos, e as células são transparentes para os comprimentos de onda mais elevados. O uso desse tipo de célula em aplicação terrestre, passa obrigatoriamente pela técnica de concentrar radiação solar. Essa é a única maneira de ser competitivo em relação as tecnologias de 1ª e 2ª geração. Ou seja, a concentração por meio de espelhos ou lentes, abre possibilidade de produzir a mesma energia com material semiconductor menos ativo.

Esse tipo de células atinge altos valores de eficiência, graças a sua capacidade de absorver e converter uma grande quantidade de espectro solar incidente. Além disso, como o espectro absorvido por cada junção é caracterizado por energias de fótons encontradas nas proximidades do gap de energia de junção, esse tipo de arranjo tem se mostrado ser o mais eficaz entre os fotovoltaicos.

Figura 3.14: Películas finas e absorção do comprimento de onda

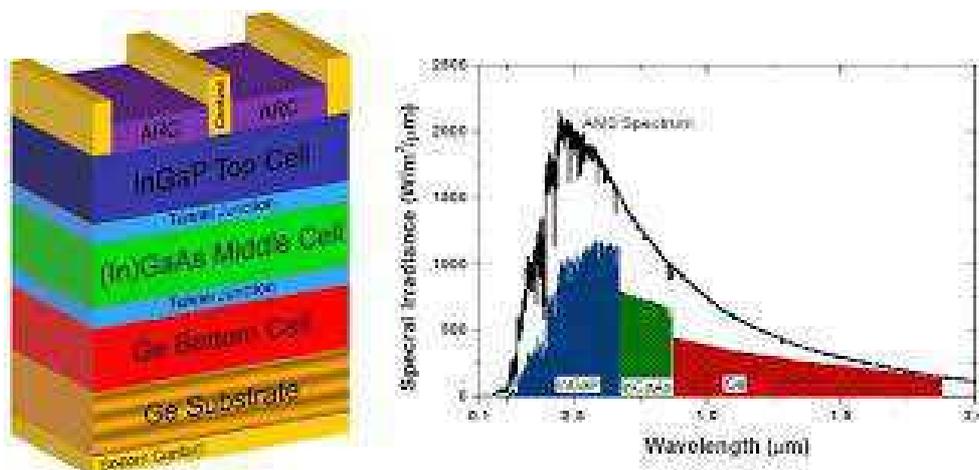


Figura 3.15: Concentrador Fotovoltaico



Fonte: imagens da internet, em 11/03/18

3.5 HISTÓRICO DE APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO NA IRRIGAÇÃO NO BRASIL E NO MUNDO

Durante a década de 1960, na antiga União Soviética, foi montado com êxito um sistema FV de irrigação em uma área remota do semiárido do sudeste do país. Entre 1979 e 1981, foi realizado um projeto piloto para avaliação de pequenos sistemas de bombeamento fotovoltaico (de 100 a 300 Wp) usados em pequenas propriedades rurais de Mali, Filipinas e Sudão, uma parceria entre o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), o Banco Mundial (BM) e a ONG *Intermediate Technology Development Group* (ITDG) (HALCROW, 1981).

Entre 1998 e 2002, através do *PVP (Irrigation Pilot Project)*, da Agência de Cooperação Alemã *Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit* (GTZ), foram instalados dez sistemas de irrigação com tecnologia fotovoltaica no Chile, Egito e Jordânia (GTZ, 2003). A experiência mostrou a aceitação da tecnologia pelos usuários e a viabilidade desse tipo de sistema. Cinco anos depois de finalizado o projeto foi observado que um dos quatro sistemas instalados no Chile estava funcionando em perfeitas condições, dois continuavam em operação, mas não em toda sua capacidade, e outro havia sido soterrado por um terremoto (GTZ, 2008).

Em 2003, o maior sistema de irrigação do mundo foi instalado, com 36 kWp, no Vale de San Joaquin, Estados Unidos, uma parceria entre a companhia Shell e a *WorldWater & Power Corporation*. Esse sistema tem fins demonstrativos e não comerciais (KELLEY; GILBERTSON, 2010). Na Argentina, ONGs argentinas em parceria com ONGs alemãs, entre

2002 e 2004, instalaram seis sistemas de bombeamento fotovoltaico para a irrigação de campos de cultivos para produção de batata, cenoura, milho e outros grãos (MÜLLER, 2004). Na Mauritània, a ONG *Dentistas Sobre Ruedas* instalou um sistema piloto, de 425 Wp em 2009 (DENTISTAS SOBRE RUEDAS, 2009).

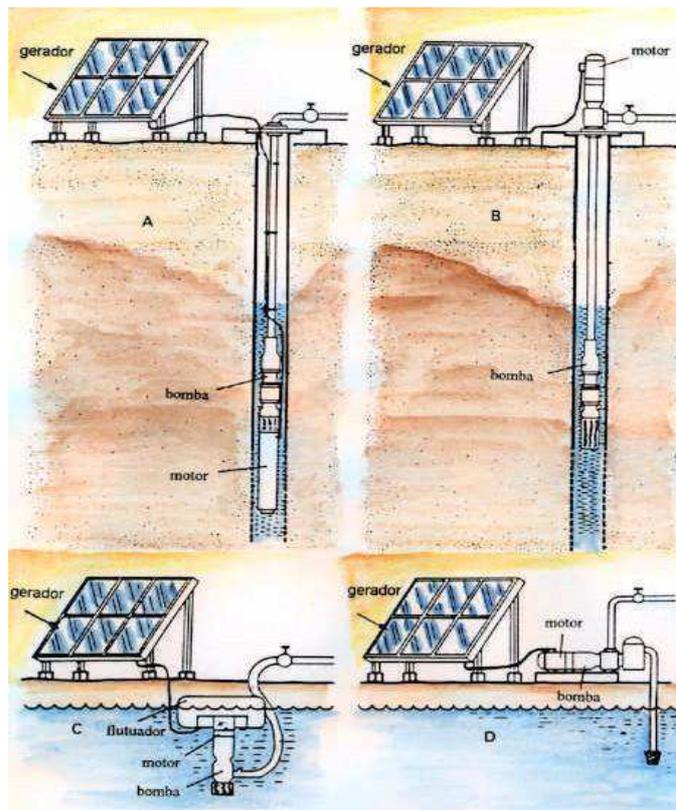
Atualmente, apesar da tecnologia fotovoltaica não ser das modalidades de geração elétrica mais baratas, ela encontra seu nicho de competitividade principalmente em comunidades isoladas. É neste tipo de aplicação, em sistemas remotos autônomos, que se enquadram os bombeamentos de água para consumo doméstico e irrigação, bem como para sistemas de drenagem e circulação de água em aquacultura.

No Brasil foram instalados vários sistemas FV de bombeamento, porém, pouco se sabe sobre seu uso para irrigação. Alguns projetos foram executados, principalmente no Nordeste do país, através de parcerias entre ONGs, companhias fornecedoras de eletricidade e institutos de pesquisa.

4 Capítulo 4: Considerações para Dimensionamento do projeto de irrigação em pequenas propriedades rurais abastecidas por poços artesianos.

Os capítulos anteriores evidenciam a escolha do sistema fotovoltaico (FV) de bombeamento como tema; cabe a este capítulo apresentar e discutir o experimento desenvolvido que tem por objetivo atender a irrigação de uma unidade agrícola de subsistência com acionamento FV. A nível deste projeto, podem-se gerar soluções para pequenos espaços agrícolas urbanos situados em escolas, quintais, etc., ou contribuir como alternativa a fim de solucionar questões ambientais e energéticas do semiárido atendendo às necessidades dos pequenos proprietários rurais.

Figura 4.1: Arranjo para bombeamento de poço artesiano



Fonte: Modificado de FRAENKEL, P., A Handbook for Users and Choosers.

Geralmente o problema de distribuição de água está relacionado com as deficiências energéticas locais para executar os trabalhos de extração e transporte da água do reservatório ou manancial ao ponto de sua utilização.

Frente a esta situação, e reconhecendo que a questão em foco é o acesso à água potável por parte de populações rurais, as quais apresentam um certo grau de carência em termos de energia, inclusive para a realização de um tipo de trabalho tão básico como pode ser o bombeamento de água. A solução deste problema poderia estar associada à introdução de sistemas autônomos de geração de energia, uma vez que a extensão de redes de distribuição de energia elétrica à localidades distantes dos centros geradores pode ser muito mais custosa do que outras alternativas.

O bombeamento de água remonta aos primórdios da história da humanidade, com a utilização de métodos manuais ou a tração animal, entretanto, as bombas manuais encontram seu campo de aplicação nas pequenas capacidades características³ dos poços e a pequenas alturas de bombeamento. São dispositivos bastante conhecidos na zona rural devido a seu baixo custo e relativa simplicidade. A capacidade típica de extração de bombas manuais está limitada a cerca de 70 m⁴/d⁴ Em outras palavras, em um poço de 30 m de profundidade, o volume que proporciona uma destas bombas é inferior a 2,5 m³ por dia. Ou seja, somente pode abastecer em média a duas famílias, o que pode significar um baixo grau de aproveitamento do poço e da força de trabalho humana. As bombas manuais exigem a utilização constante de mão-de-obra que poderia estar sendo utilizada para a realização de outras tarefas mais nobres. (FEDRIZZI,2003).

³ Capacidade característica - quantidade máxima de água a ser extraída do poço por unidade de tempo sem apresentar riscos para a estrutura do mesmo.

⁴ A potência hidráulica requerida para o bombeamento costuma ser medida em metro na quarta potência por dia (m⁴/d), que corresponde ao fluxo em metros cúbicos diário (m³/dia), em função da altura manométrica em metros (m).

4.1 Bombas e Motores

As bombas mais comuns em sistemas FV de bombeamento são as centrífugas e volumétricas. A escolha de uma bomba ou grupo motobomba deve ser em fator da máxima eficiência, sob as condições de vazão e altura manométrica. Tais bombas são acionadas por motores de corrente alternada (c.a.) ou corrente contínua (c.c.).

A escolha do motor adequado está interligada aos seguintes fatores: potência requerida para atingir a altura manométrica necessária, volume de água, eficiência, custo, submersão ou não do motor, confiabilidade e manutenção.

O grupo motobomba é o acoplamento destes dois mecanismos distintos, a eficiência desse sistema dependente em grande parte desse acoplamento. Atualmente existem grupos motobombas fabricados diretamente para aplicação FV.

Bomba centrífuga

São bombas que usam a força centrífuga, resultante do movimento circular do rotor, para deslocar água através delas, os elementos que compõe a bomba são mostrados a seguir.

As pás do rotor giram em alta velocidade, criando pressão e forçando o fluxo. Há o incremento da energia cinética do fluido a qual é transformada gradualmente em energia potencial em forma de pressão.

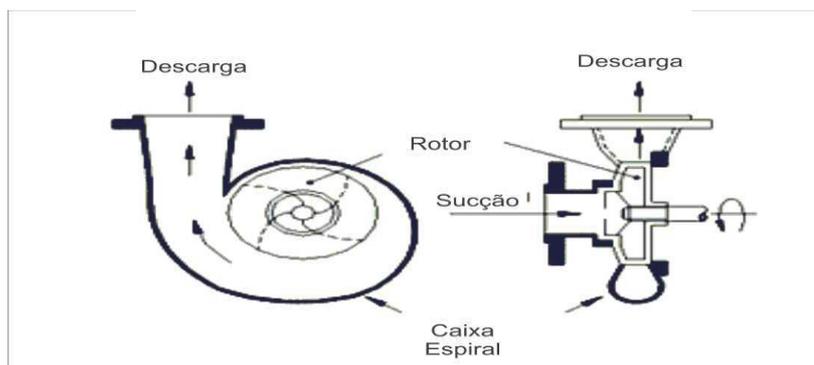
As bombas centrífugas atendem a aplicações que exigem grandes vazões e pequenas alturas manométricas, a altura é mantida constante ao projetar esse tipo de bomba. O afastamento do ponto ótimo de funcionamento, obtido no projeto, implica perdas significativas na eficiência.

A potência de partida desse tipo de bomba deve ser próxima da potência de funcionamento normal devido a sua mecânica, sendo essa característica bem adequada ao sistema de bombeamento FV.

Existem duas configurações principais, as submersíveis que trabalham “afogadas” e as de superfície que necessitam de um tubo de sucção, cuja altura máxima de sucção recomendável é de aproximadamente 6 metros (CRESESB, 2014).

As bombas centrífugas são adequadas a uma ampla faixa de valores de vazão. Existem sistemas instalados com capacidades que vão até cerca de 1000 m³/h (CRESESB, 2014).

Figura 4.2: Bomba Centrífuga



Fonte: VIANA E NOGUEIRA, 1990.

Bomba volumétrica

Também conhecidas como bombas de deslocamento positivo, tem por característica, que justifica esta segunda denominação, o comportamento do deslocamento do fluido. Onde o fluido na entrada do sistema tem aproximadamente a mesma direção que no ponto de saída do mesmo.

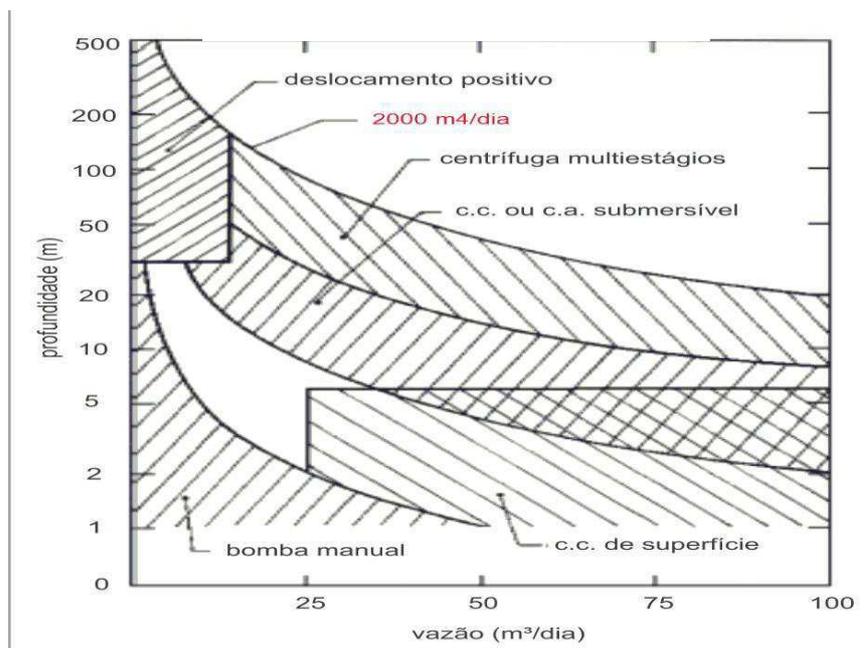
Esse tipo de bomba é adequado quando se quer atingir grandes alturas manométricas, com pequenos volumes de água, sem perder em eficiência. Mesmo com variação na irradiação solar o sistema continua alcançando a altura necessária, porém com menor vazão.

Os tipos de bombas volumétricas mais usadas são as de diafragma, para pequenas alturas, e as de pistão com contrapeso ou de cavidade progressiva para grandes alturas manométricas. A Figura 4.4 mostra um exemplo de bomba de deslocamento positivo do tipo diafragma.

As bombas de deslocamento positivo são adequadas a uma faixa de valores de vazão que vai de 0,3 a 40 m³/dia a alturas de 10 a 500 metros (CRESESB, 2014).

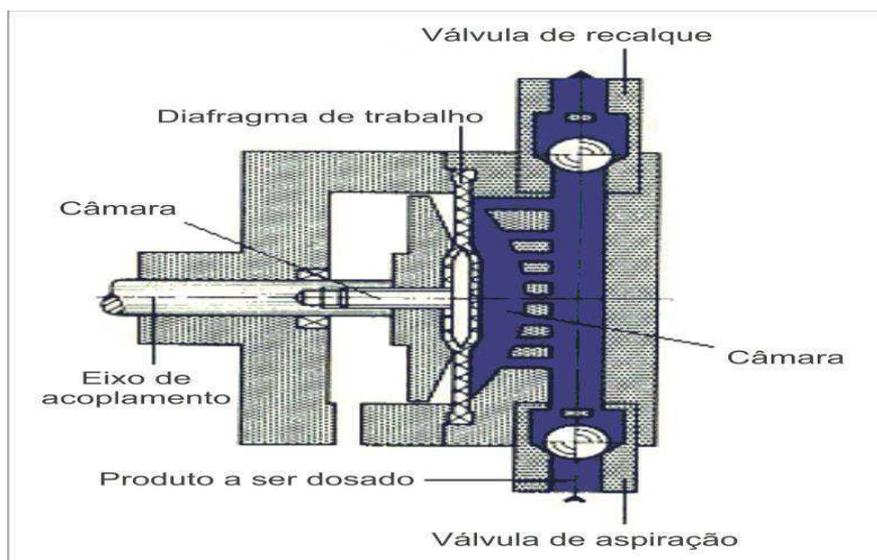
As bombas de deslocamento positivo atuam de forma mais eficiente para alturas manométricas elevadas e pequenas vazões. Pequenas alturas manométricas e maiores vazões é o perfil indicado para bombas centrífugas. A Figura 4.3 apresenta as faixas de operação para os tipos motobombas de sistemas de bombeamento FV.

Figura 4.3: tipos de bombas



Fonte: TIBA, 1998.

Figura 4.4: bomba tipo diafragma



Fonte: < <http://www.sera.de/pt/> >.

Motor c.c.

A eletricidade fornecida por módulos FV é na forma de corrente contínua. Assim os motores em c.c. são os mais adequados para o sistema FV. Estes motores são geralmente de menor potência, não sendo comercializado com valores maiores que 10 CV.

A eficiência deste tipo de motor é mais elevada se comparada aos motores de corrente alternada, porém seu custo inicial é maior além da necessidade de manutenção. A manutenção é periodical e core devido ao distaste das scopas que opera na comutação.

Existem motores c.c sem escovas que reduzem consideravelmente a sua taxa de manutenção. Em locais mais remotos é importante que se utilize motores sem escovas, graças à queda na manutenção. Entretanto os equipamentos eletrônicos que os constituem devem ser de alta confiabilidade, para que não se transfira a necessidade de manutenção devido às escovas para possíveis fontes de falhas destes equipamentos (CRESESB, 2014).

Motor c.a.

Os motores em corrente alternada são mais baratos e são facilmente encontrados no mercado em comparação aos motores em corrente contínua.

O conjunto motor bomba utilizando c.a não pode ser acoplado diretamente ao gerador fotovoltaico, pois deve haver um inversor que converta a corrente contínua gerada em alternada.

Os motores em c.a. são usados em conjunto com bombas submersíveis, atuando assim em grandes profundidades. Mostram-se adequados quando a aplicação requer grandes potências, pois atende a uma ampla faixa (CRESESB, 2014).

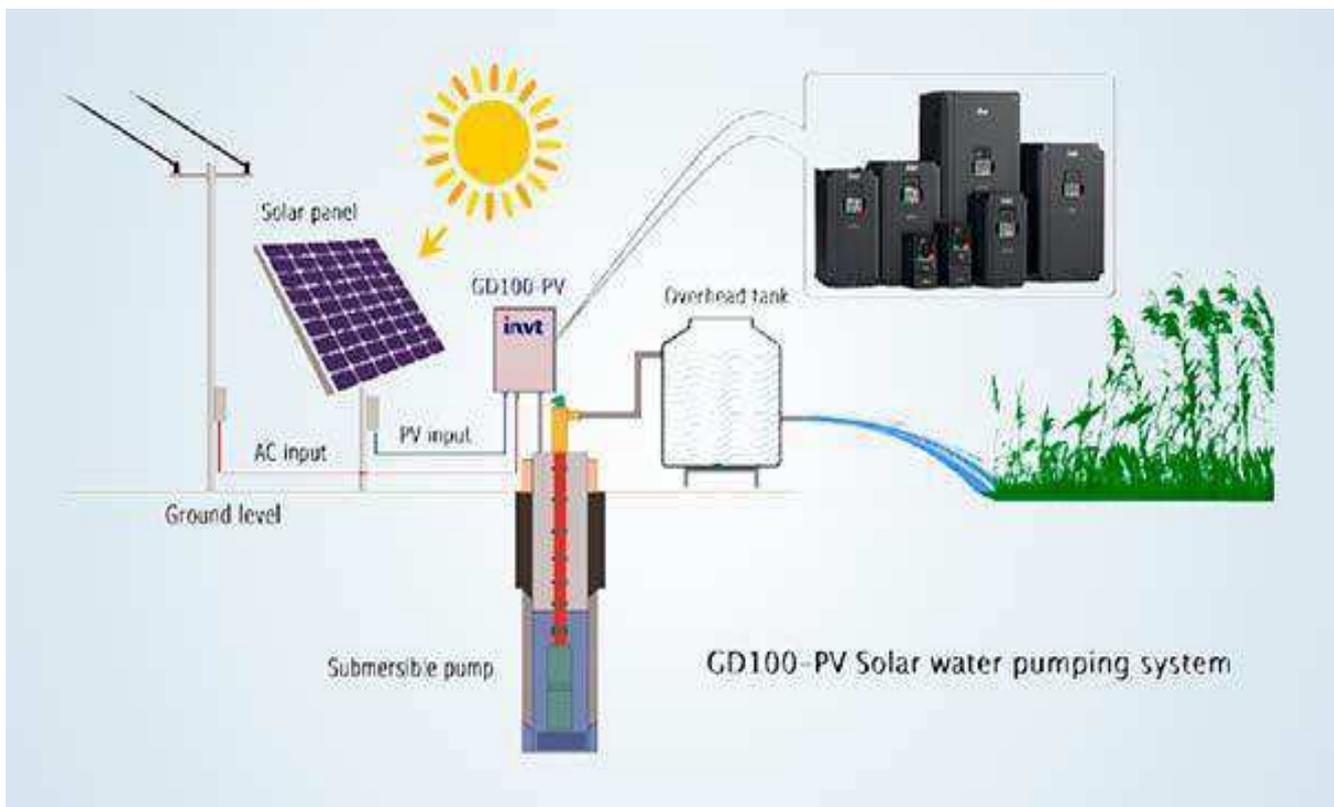
4.3 BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO

Nessa sessão iremos tartar das partes integrantes desse processo, suas tecnologias, custos e utilizações.

4.3.1 ELEMENTOS DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO

Um sistema de bombeamento FV é constituído de módulos FV, mecanismo de condicionamento de potência (inversor, controlador, seguidor do ponto de máxima potência), grupo motobomba, sistema de armazenamento (opcional) e sistema de distribuição (FEDRIZZI, 2003), conforme ilustra a Figura 4.5.

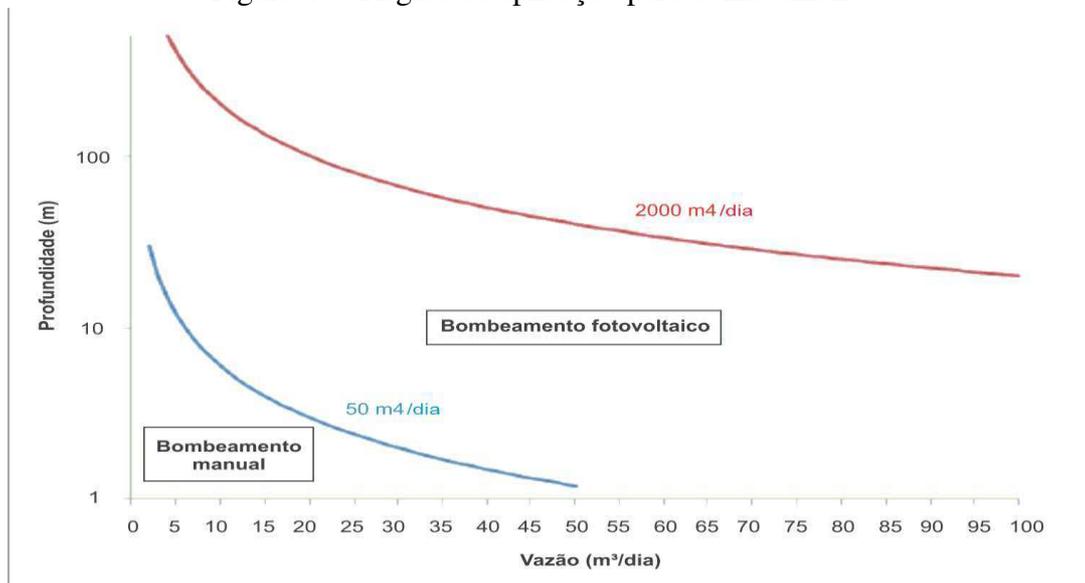
Figura 4.5: Diagrama fotovoltaico de bombeamento



Fonte: BlueSun Technologies

A Figura 4.6 representa o gráfico da vazão vs. profundidade. Através desses termos é classificado o sistema de bombeamento FV como viável ou não. A faixa ótima para a aplicação de sistemas de bombeamento FV encontra-se entre 50 e 2.000 m⁴/dia.

Figura 4.6: Região de aplicação para bombeamento



Fonte: Adaptado de TIBA, 1998.

Para aplicações de até 250Wp são utilizadas bombas de deslocamento positivo de diafragma ou bombas centrífugas de estágio único ou poucos estágios. Acima desta potência são adotadas bombas centrífugas de multiestágio e as de deslocamento positivo helicoidal (CRESESB, 2014).

4.3.2 CONSIDERAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento de um sistema de bombeamento de água consiste na determinação do tipo e tamanho do sistema que satisfará as necessidades do usuário.

Deve-se buscar um correto dimensionamento, não somente para evitar custos desnecessários acarretados por possível sobredimensionamento, ou problemas decorrentes de um subdimensionamento, mas também, para que a instalação funcione no seu ponto ótimo de trabalho e tenha uma longa vida útil de cada uma de suas partes.

O passo preliminar é definir a demanda de água e as vazões requeridas, limitadas pela capacidade do poço. O primeiro passo desse processo é feito através de um balanço de energia,

isto é, a energia demandada deve ser igual a energia gerada. As formas de calcular este balanço variam basicamente nos parâmetros a serem utilizados e nos critérios a serem adotados como podem ser: confiabilidade de funcionamento do sistema, eficiência do mesmo, custo da energia gerada ou ainda uma relação entre todos os critérios.

Em qualquer sistema energético adotado para solucionar a problemática do fornecimento de água, o processo de dimensionamento começa com o cálculo básico da potência hidráulica (P_H) requerida, para elevar a água a uma certa altura manométrica (H_m), uma determinada vazão (Q_m). Este cálculo é fundamental para a determinação do tipo e tamanho do sistema.

A potência hidráulica pode ser calculada diretamente através da equação

$$P_H = 2,725 \cdot Q_m \cdot H_m \quad (4.1)$$

P_H - Potência hidráulica (W).

Q_m - Vazão (m³/h).

H_m - Altura manométrica (m).

Sendo altura manométrica (H_m) dada por:

$$H_m = H_v + h_f + h_e \quad (4.2)$$

Onde:

H_v - Altura vertical (m).

h_f - Perda de carga ao longo da tubulação (m).

h_e - Perda de carga em pontos singulares (m).

A altura vertical (H_v) é a soma das alturas dinâmica (H_{DT}) e do reservatório (H_R).

$$H_v = H_{DT} + H_R \quad (4.3)$$

As perdas de carga na tubulação (h_f) e nos pontos singulares (h_e) (juntas, curvas, válvulas, etc.) são obtidas nas equações 4.4 e 4.5 respectivamente. O fator f da equação 4.4, é determinado através do diagrama de *Moody*, o qual é obtido em função da rugosidade das paredes da tubulação e do número de *Reynolds* que determina as características do regime do fluido.

Sendo as perdas de carga na tubulação (h_f) dada por:

$$h_f = \frac{f * L * V^2}{D * 2g} \quad (4.4)$$

Onde:

f - Coeficiente de atrito ou perda de carga adimensional.

L - Comprimento da tubulação (m).

D - Diâmetro interno da tubulação (m).

V - Velocidade média do fluido (m/s).

g - Aceleração da gravidade (9,81 m/s²).

E as perdas nos pontos singulares como sendo :

$$h_e = \frac{K * V^2}{2g} \quad (4.5)$$

Onde:

K - Coeficiente para o cálculo das perdas singulares.

V - Velocidade média do fluido (m/s)

g - Aceleração da gravidade (9,81 m/s²).

No dimensionamento propriamente dito, a potência e a energia hidráulica são dadas pelas equações vistas, enquanto que a potencia elétrica propriamente dita é dada pela equação:

$$P_{el} = \frac{2,725.Q_m*H_m}{\varphi_{MBE-pv}} \quad (4.6)$$

Onde:

P_{el} – Potencia Eletrica

Q_m – Vazão (m^3/h)

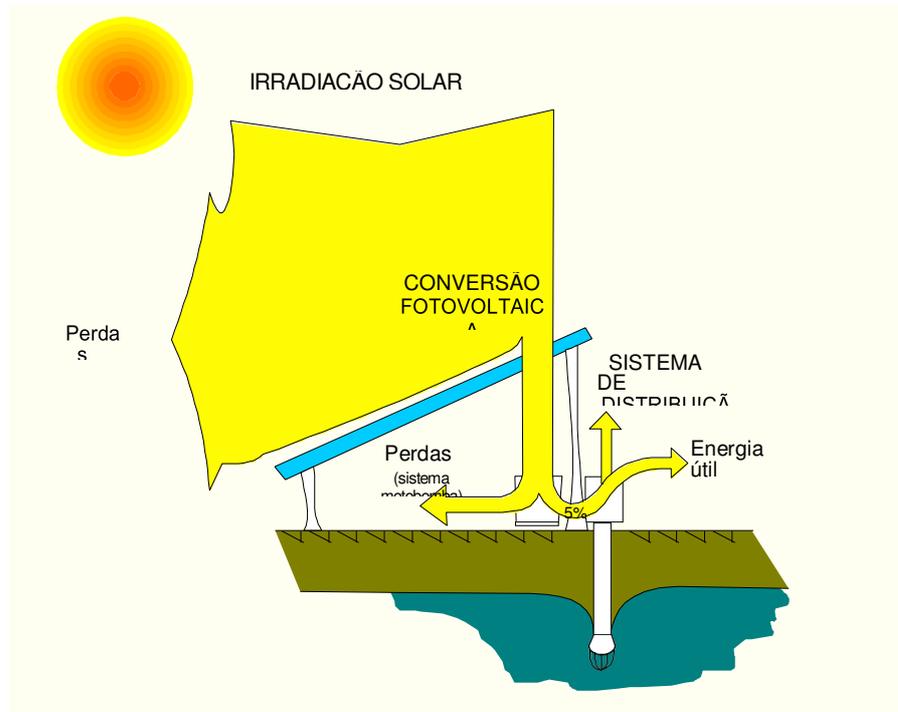
H_m – Altura manométrica e

φ_{MBE-pv} – Eficiencia do conjunto motobomba elétrico

Uma vez conhecida a potência mecânica (nominal) do grupo motobomba, determina-se o tipo e modelo da mesma utilizando-se de catálogos técnicos proporcionados pelas empresas especializadas. A título de ilustração a figura 4.6 apresenta um tipo de bomba e seus detalhes técnicos:

A eficiência média de um sistema fotovoltaico é ilustrado a seguir:

Figura 4.8: Eficiência Média de um sistema

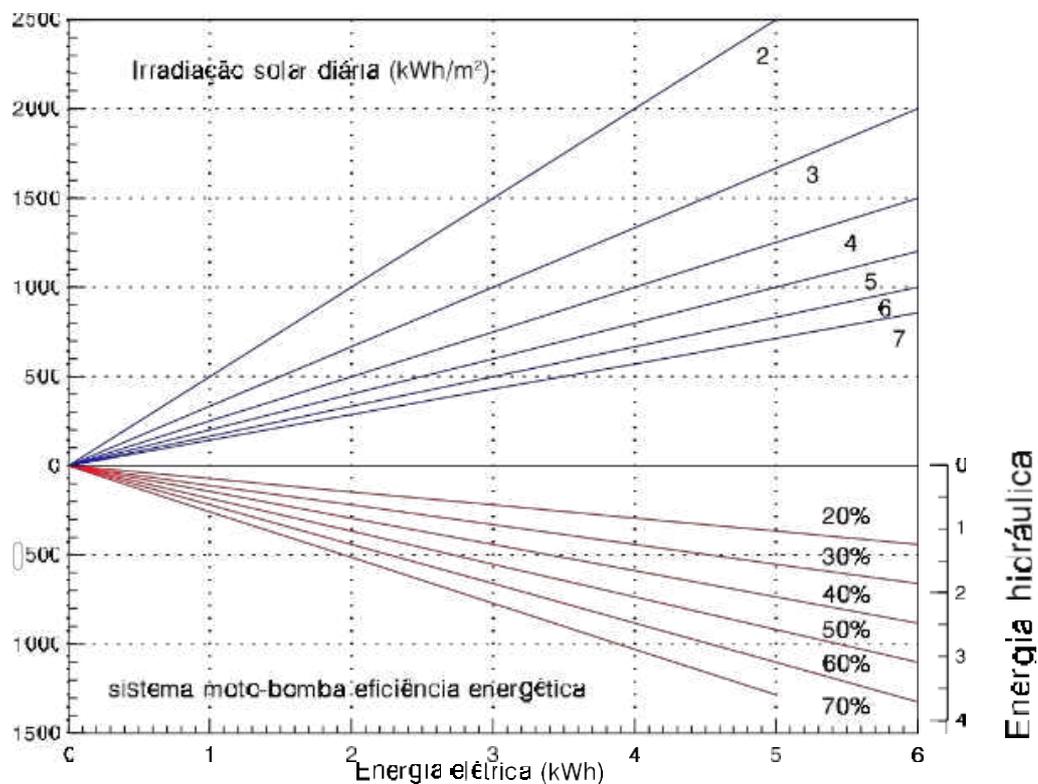


Fonte: Modificado de FRAENKEL

Somente a partir da quantificação da disponibilidade média diária mensal de energia local e desta ao longo do ano, executa-se, em função de sua demanda, o dimensionamento do sistema fotovoltaico propriamente dito.

A figura 4.8 ilustra a demanda em termos de W_p , segundo a eficiência dos sistemas fotovoltaicos. Ela pode ser utilizada como um ábaco de dimensionamento para uma primeira aproximação da determinação da potência nominal. Para uma demanda de “X” m^4 /dia localizada no eixo da esquerda, encontra-se a energia hidráulica necessária no eixo da direita, indo-se às linhas vermelhas de eficiência do grupo motobomba e descendo-se ao eixo horizontal, obtém-se a energia elétrica necessária. A partir desta, sobe-se até as linhas azuis de irradiação solar no plano dos módulos, e desta indo-se ao eixo da esquerda, determina-se a potência nominal do sistema.

Demanda em Watt-Pico pela Eficiência

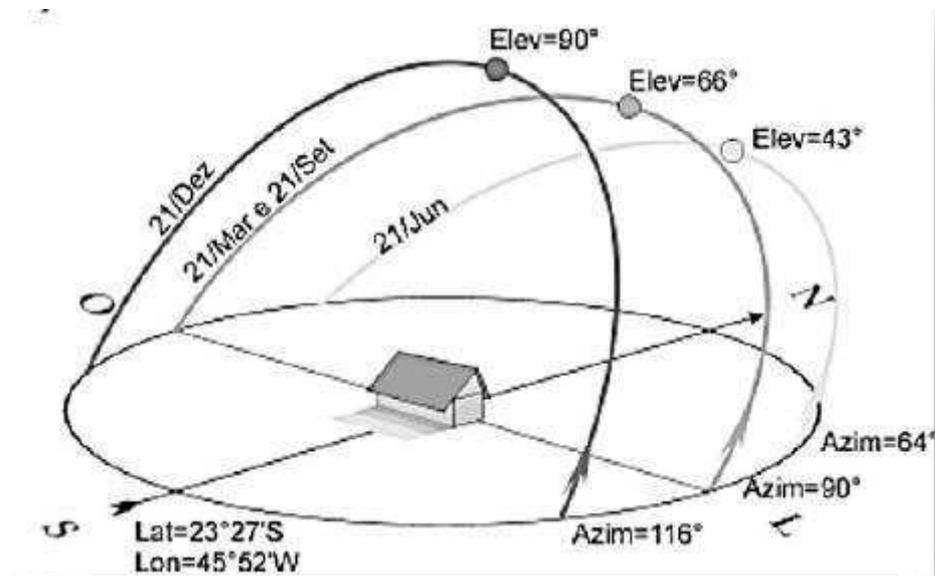


Fonte: Fedrizzi, 2008

A energia solar captada por uma superfície varia em função de inúmeros parâmetros como a orientação da superfície em relação ao sol, a hora do dia, o dia do ano, a latitude e as condições atmosféricas. Para uma maior captação da irradiação solar, os coletores devem ter uma certa orientação em relação ao azimute γ do local e uma certa inclinação β , em relação a horizontal (ver figura 4.10).

Esta inclinação em geral se reduz proporcionalmente à latitude do local de tal forma que para pequenas latitudes a melhor inclinação pode ser até mesmo de 0° (zero) graus.

Figura 4.10: Orientação do sol para Efeitos de Irradiância



Fonte: Fedrizzi, 2003

O ângulo de Azimute é o ângulo formado entre a projeção da normal à superfície do coletor no plano horizontal e o meridiano local. Sendo 0° para o Sul, e 180° para o Norte e Leste positivo, Oeste negativo ($-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$).

Além disso, deve-se ter em mente que alguns outros fatores influenciam o processo de conversão energética como mostra a tabela 4:

Tabela 4: fatores que influenciam a conversão e distribuição da irradiação solar

Material	Eficiência em Laboratório	Eficiência em produção	Eficiência em produção em série
Silício Mono	24,7%	18%	14%
Silício Poly	19,8%	15%	13%
Silício Amorfo	13%	10,5%	7,5%
CIS, CIGS	18,8%	14%	10%
CdTe	16,4%	10%	9%

100%	Irradiação Solar Total
-3,0%	Reflexão e sombreamento dos contatos frontais
-23,0%	Fótons com energia insuficiente na Irradiância de ondas compridas
-32,0%	Fótons com energia excedente na Irradiância de ondas curtas
-8,5%	Recombinação de elétrons
-20,0%	Gradiente elétrica, especialmente na região do campo elétrico
-0,5%	Resistência em série (perdas térmicas na condução elétrica)
= 13,0%	Energia elétrica utilizável.

Fonte : Frontin,2017

A precisão do dimensionamento deve ocorrer, não somente na determinação correta da potência necessária mas em grande medida, na determinação da radiação disponível no local, em função do melhor ângulo de inclinação dos coletores para que haja uma otimização da energia ao longo do ano e em relação a sua demanda.

Para a determinação da potência elétrica (P_{EL}) do sistema de bombeamento, faz-se uso da vazão (Q_m) que satisfaça as necessidades diárias, das eficiências (ψ) dos mecanismos envolvidos e da altura manométrica (H_m) ou altura manométrica equivalente (H_{TE}). A potência elétrica de um sistema é expressa pela equação (4.6)

Tendo-se o teste de capacidade do poço, pode-se utilizar a altura equivalente (H_{TE}) determinada no lugar da altura manométrica (H_m).

A potência elétrica de um sistema fotovoltaico formado por um gerador (módulo fotovoltaico) e um inversor pode ser expressa pela equação (4.7).

$$P_{el-pv} = P_{nom} * \frac{G_{dm}(\mu,j)}{G_{ref}} * \psi_g * \psi_I \quad (4.7)$$

Onde:

P_{el-pv} - Potência elétrica do equipamento fotovoltaico (W).

P_{nom} - Potência dos módulos fotovoltaicos (Wp). A potência nominal é determinada nas Condições Padrão de Medida (CPM), dadas por uma irradiância de 1.000 W/m², a uma temperatura de célula de 25°C.

$G_{dm}(\mu, j)$ - Irradiância incidente no plano do gerador fotovoltaico (W/m²),

G_{ref} - Irradiância de referência em CPM (W/m²).

ψ_g - Eficiência do gerador fotovoltaico.

ψ_I - Eficiência do inversor.

No processo de bombeamento, a água tende a baixar de nível e, conseqüentemente, quanto maior a vazão, maior será o descenso da água e maior será a altura dinâmica (HDT). Tendo em vista

que a irradiação solar varia ao longo do dia, a potência, a altura manométrica (Hm) e a vazão média (Qm), variam também com o tempo. Sendo assim, a vazão média (m³ /h) é dada pela seguinte equação:

$$Q_m = 0,4. Q_d * \frac{G_{ref}}{G_{dm}} \quad (4.8)$$

Onde: Q_m - Vazão média (m³/h).

Q_d - Vazão diária (m³/d).

$G_{dm}(\mu, j)$ - Irradiância incidente no plano do gerador fotovoltaico (W/m²)

G_{ref} - Irradiância de referência em CPM (W/m²)

No entanto, sempre que se tenha o resultado do teste de capacidade do poço deve-se utilizar a altura equivalente (HTE) no lugar da altura manométrica (Hm). A altura equivalente é a altura constante na qual se obtém um certo volume de água diário a uma vazão média (Qm), respeitando a vazão máxima (QM) do poço.

A vazão máxima é dada pelo teste de capacidade do poço, o qual, determina o limite máximo de extração de água em função de sua reposição, ou seja, é determinada pelo regime de reposição do poço. Este cuidado evita que a bomba trabalhe em “seco”, protegendo-a assim do processo de cavitação²⁰ e de sobreaquecimento, além de evitar uma possível desestruturação das paredes de poços sem revestimento. A altura equivalente (HTE) é dada por:

$$H_{TE} = H_{ST} + H_R + \left(\frac{H_{DT} - H_{St}}{Q_M} \right) \cdot Q_M + h_f(Q_m) + h_e(Q_m) \quad (4.9)$$

Onde:

H_{TE} - Altura equivalente (m)

H_{ST} - Altura estática (m).

H_R - Altura do reservatório (m).

H_{DT} - Altura dinâmica (m).

Q_m - Vazão média para obter o volume diário (m³/h).

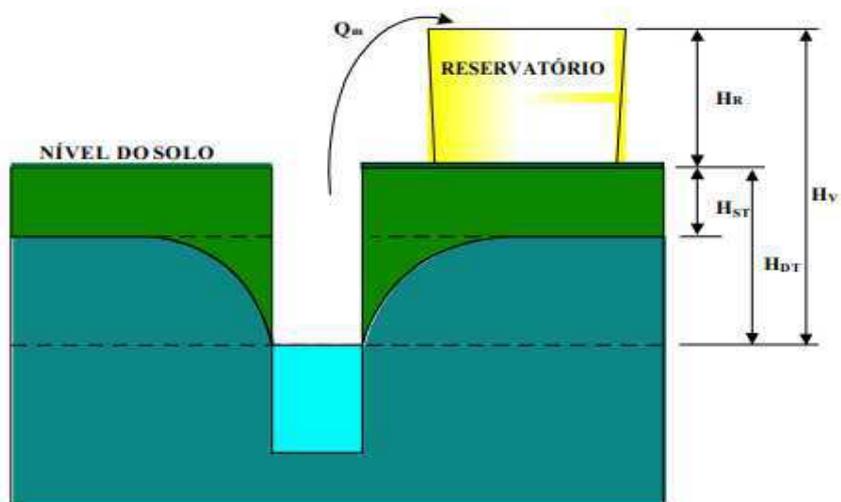
Q_M - Vazão máxima dada pelo teste do poço (m³/h).

$h_f(Q_m)$ - Perda de carga na tubulação (m).

$h_e(Q_m)$ - Perda de carga nos pontos singulares (m)

Para uma melhor compreensão das equações acima, a figura 4.8 ilustra os principais parâmetros de um poço durante um turno de bombeamento.

Figura 4.11: Parâmetro de um poço durante bombeamento



Fonte : Fedrizzi, 2003

5 CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

Durante todo o trabalho, foram expostas as vantagens e tecnologias e em alguns casos aplicações do uso de sistemas fotovoltaicos.

O intuito maior desse trabalho foi trazer para o leitor informações necessárias para se compor um bom projeto com uso de tecnologias fotovoltaicas.

Como foi dito no início, um excelente uso se faz na agricultura, onde tem-se a perspectiva de melhorar a economia das populações rurais que nem sempre tem acesso à energia elétrica para facilitar o trabalho no campo e seus desdobramentos. Essas tecnologias estão cada vez mais acessíveis à população e tendem a terem seus preços cada vez mais reduzidos, pelos incentivos governamentais, políticas públicas e até mesmo pelo interesse privado em pesquisa tecnológica, para aumento de eficiência e redução de custo.

Evidenciou-se ao longo do trabalho a evolução da tecnologia no cenário mundial, o que por si só já nos mostra que o mundo inteiro tem voltado atenção a esse modo de produzir energia, assim sendo, o Brasil deve cada vez mais investir também nesse tipo de produção energética se quiser manter-se competitivo e desonerar os custos com o modelo atual de produção de energia, libertando-se também da irregularidade do regime de chuvas, uma vez que o sol é fonte praticamente inesgotável de recursos.

Assim sendo, conclui-se que o mercado de tecnologia fotovoltaico, tem pela frente um grande campo para ser explorado. O uso de geração alternativa vem para somar aos recursos da matriz energética que já existe atualmente e é uma solução viável para o problema da crise hídrica que atualmente muitas regiões atravessam. Espera-se que esse trabalho sirva de orientação para aqueles que buscam executar um projeto de irrigação com bombeamento fotovoltaico, utilizando-se desse material para servir de guia.

O campo das energias renováveis, em especial o da fotovoltaica é sem sombra de dúvidas de grande importância para o desenvolvimento energético das futuras gerações, por isso merece bastante atenção por parte de nós profissionais, e de maneira geral, da população como um todo.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se elencar algumas atividades, como descrito a seguir:

Implantação de horta comunitária no Campus da UFCG para abastecimento do Restaurante Universitário, irrigada por sistema de bombeamento fotovoltaico. Projeto e execução de obra de iluminação pública do Campus também utilizando painéis fotovoltaicos.

Ação conjunta com os cursos de Engenharia Agrícola para se desenvolverem atividades em laboratório para que os alunos pudessem se familiarizar com a tecnologia e assim otimizar esse tipo de recurso energético.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PINHO, J. T., & GALDINHO, M. A. (2014). **Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos**. (CEPEL- CRESESB, Ed.) Rio de Janeiro.

GHENSEV, A. (2006). **Materiais e processos de fabricação de células fotovoltaicas**. Dissertação, Universidade Federal de Lavras.

EPE. (2012). **Análise da inserção da geração solar na matriz energética brasileira**. Nota técnica, EPE, Rio de Janeiro. Fonte: www.epe.gov.br

KRETER, A.; VECCHIO, R; STADUTO, J., **Pobreza rural no nordeste brasileiro**: problemas e opções metodológicas. Texto para Discussão n. 45, Rio de Janeiro: Centro de Estudos Sobre Desigualdade e Desenvolvimento, Universidade Federal Fluminense, 2011.

CASTRO, C. N., **A agricultura no nordeste brasileiro**: oportunidades e limitações ao desenvolvimento. Texto para Discussão n. 1786. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2012.

EMBRAPA, **A Embrapa no Ano Internacional da Agricultura Familiar**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/2014-ano-internacional-da-agricultura-familiar>>. Acesso em: 01 nov 2014.

GOMES, K., **Para evitar crise, Brasil precisa diversificar matriz energética**. Disponível em: <<http://dw.de/p/1B3Fq>>. Acesso em: 01 nov 2014.

FEDRIZZI, M. C., **Sistemas de abastecimento de água para uso comunitário: Lições aprendidas e procedimentos para potencializar sua difusão.** 2003. 201 p. Tese (Doutorado em Energia) - Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2003.

MME, **Manual de Projetos Especiais.** Disponível em: <<http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/asp/>>. Acesso em: 05 mar 2014.

ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL. 3. ed. Brasília: ANEEL, 2008.

RELATÓRIO SOBRE O DESENVOLVIMENTO MUNDIAL DE 2008 Nova Iorque: Banco Mundial, 2008.

CRESESB/CEPEL; **Sistemas Fotovoltaicos: Manual de Engenharia.** Grupo de trabalho de Energia Solar Fotovoltaica, Versão 3.0, Brasil, 2014.

HALCROW, W. et al. *Handbook on Solar Water Pumping. Intermediate Technology Power. Inglaterra, Reading & Swindon, 1984*

ALVARENGA, C. A. **Bombeamento de água com energia solar fotovoltaica.** Disponível em: <<http://www.solenerg.com.br>>. Acesso em: 07 abr. 2014.

GTZ. **Ex-post Evaluation 2007 Resource-conserving Irrigation with Photovoltaic Pumping Systems,** Chile Brief Report. GTZ. Frankfurt, 2008.

KELLEY, L. C.; GILBERTSON, E. **On the feasibility of solar-powered irrigation.**
Elsevier, 2010.

MÜLLER, C. **Aprovechamiento de la energía solar para el mejoramiento de las condiciones de vida en el altiplano argentino,** 2004. Disponível em: <<http://www.hcsolar.de/Argentina%202003.pdf>>. Acesso em: 06 jun. 2014.

BRAGA, R. P. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos e aplicações.** 2008. 80 p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

BORGES NETO, M.; CARVALHO, P., **Geração de energia elétrica: Fundamentos.** 1ª ed. São Paulo: Érica Ltda, 2012.