



FUNDAÇÃO UNIVERSITÁRIA VIDA CRISTÃ  
**FUNVIC**

FACULDADE DE PINDAMONHANGABA



Organização  
das Nações Unidas  
para a Educação,  
a Ciência e a Cultura

Fundação Universitária  
Vida Cristã - Brasil  
Membro do Movimento de Clubes,  
Centros e Associações para a UNESCO

**Marcos Vinícius Salgado Barbosa**

**GERAÇÃO DE ENERGIA POR MEIO DE CÉLULAS  
FOTOVOLTAICAS: custo-benefício e alternativas para aumento  
da economicidade em instalações de eletrificação rural**

**Pindamonhangaba – SP  
2019**



FUNVIC  
FUNDAÇÃO UNIVERSITÁRIA VIDA CRISTÃ

FACULDADE DE PINDAMONHANGABA



Organização  
das Nações Unidas  
para a Educação,  
a Ciência e a Cultura

Fundação Universitária  
Vida Cristã - Brasil  
Membro do Movimento de Clubes,  
Centros e Associações para a UNESCO

**Marcos Vinícius Salgado Barbosa**

## **GERAÇÃO DE ENERGIA POR MEIO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS: custo-benefício e alternativas para aumento da economicidade em instalações de eletrificação rural**

Monografia apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Diploma de Bacharel pelo Curso de Engenharia de Produção da FUNVIC - Faculdade de Pindamonhangaba.

Orientador: Prof. Esp. Alessandra Maria Nerozi Aguiar.

**Pindamonhangaba – SP  
2019**



FUNDAÇÃO UNIVERSITÁRIA VIDA CRISTÃ  
**FUNVIC**

FACULDADE DE PINDAMONHANGABA



Organização  
das Nações Unidas  
para a Educação,  
a Ciência e a Cultura

Fundação Universitária  
Vida Cristã - Brasil  
Membro do Movimento de Clubes,  
Centros e Associações para a UNESCO

Barbosa, Marcos Vinícius Salgado.

Geração de energia por meio de células fotovoltaicas: custo-benefício e alternativas para aumento da economicidade / Marcos Vinícius Salgado Barbosa / FUNVIC Pindamonhangaba, 2019.  
49 f.: il.; 30 cm.

Monografia de Conclusão de Curso de graduação em Engenharia de Produção FUNVIC – Faculdade de Pindamonhangaba - SP

Orientador: Prof. Esp. Alessandra Maria Nerozi Aguiar.

1. Eletrificação. 2. Rural. 3. Fotovoltaica. 4. Custo-benefício. 5. Economicidade. II Título.

CDD 620.193



FUNDAÇÃO UNIVERSITÁRIA VIDA CRISTÃ  
**FUNVIC**

FACULDADE DE PINDAMONHANGABA



Organização  
das Nações Unidas  
para a Educação,  
a Ciência e a Cultura

Fundação Universitária  
Vida Cristã - Brasil  
Membro do Movimento de Clubes,  
Centros e Associações para a UNESCO

**MARCOS VINÍCIUS SALGADO BARBOSA**

**GERAÇÃO DE ENERGIA POR MEIO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS: CUSTO-  
BENEFÍCIO E ALTERNATIVAS PARA AUMENTO DA ECONOMICIDADE EM  
INSTALAÇÕES DE ELETRIFICAÇÃO RURAL**

Monografia apresentada como parte dos requisitos  
para obtenção do Diploma de Bacharel pelo Curso  
de Engenharia de Produção da FUNVIC -  
Faculdade de Pindamonhangaba

Data: \_\_\_\_\_

Resultado: \_\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

Prof. Esp. Alessandra Maria Nerozi Aguiar - FUNVIC - Faculdade de Pindamonhangaba

Prof. Dr. Claudio Augusto Kelly - FUNVIC - Faculdade de Pindamonhangaba

Prof. Esp. Rodrigo Ramos de Oliveira - FUNVIC - Faculdade de Pindamonhangaba

Dedico este trabalho  
primeiramente a Deus e  
a meus pais, por todos os  
ensinamentos.

Aos meus amigos,  
Márcio, Rafael e  
Ailton.

## **AGRADECIMENTOS**

À FUNVIC - Faculdade de Pindamonhangaba pela oportunidade de estudo que permitiu que eu atingisse meu objetivo.

A Profa. Esp. Alessandra Maria Nerozi Aguiar, pela maneira com que orientou meu trabalho de pesquisa.

"[...] o que prevemos raramente ocorre; o que menos esperamos geralmente acontece."

Benjamin Disraeli.

## RESUMO

A eletrificação rural é um ponto chave para o desenvolvimento de atividades ligadas aos nichos de mercado rurais nos países do mundo, devido à necessidade da produção de alimentos de origem vegetal e animal, e para a população rural. A geração de energia elétrica por meio de fontes alternativas de energia se apresenta como uma solução viável economicamente, tendo em vista a disponibilidade de recursos de fontes de energia, tais como a energia solar, a energia de biomassa e a energia eólica. Este trabalho de pesquisa se pautou em análises qualitativas e quantitativas relacionadas à geração de energia elétrica e por meio de células fotovoltaicas, e apresentou dados sobre a evolução da eletrificação rural dessas fontes de energia no Brasil e no mundo. Os resultados quantitativos sobre a real economicidade de sistemas de geração de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas foram obtidos por meio de consulta a sites de empresas especializadas na instalação e manutenção desses tipos de projetos. A constatação da necessidade de associação da fonte geradora de energia elétrica fotovoltaica a outras fontes de energia renovável oferece sustentabilidade comprovada em áreas rurais, e o retorno pelo investimento inicial de sistemas fotovoltaicos se processa em menos de dez anos, e isto se apresenta como um ponto forte para justificar tal investimento de excelente custo-benefício.

Palavras-Chave: Eletrificação. Rural. Fotovoltaica. Custo-benefício. Economicidade.

## **ABSTRACT**

Rural electrification is a key point for the development of activities related to rural market niches in the countries of the world due to the need to produce food of plant and animal origin and for the rural population. The generation of electricity through alternative sources of energy is presented as an economically viable solution, given the availability of resources from energy sources, such as solar energy, biomass energy and wind energy. This research was based on qualitative and quantitative analyzes related to the generation of conventional electric energy and through photovoltaic cells, and presented data on the evolution of the rural electrification of these energy sources in Brazil and in the world. The quantitative results on the real economicity of electric energy generation systems through photovoltaic cells were obtained by consulting sites of companies specialized in the installation and maintenance of these types of projects. The need to associate the source of photovoltaic energy with other sources of renewable energy offers proven sustainability in rural areas, and the return on the initial investment of photovoltaic systems takes place in less than ten years, and this is presented as a point to justify such an excellent cost-benefit investment.

Keywords: Electrification. Rural. Photovoltaic. Cost benefit. Economicity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Energias de gap de materiais.....	18
Figura 3.2 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica .....	21
Figura 3.3 - Diagrama esquemático de uma célula fotovoltaica .....	24
Figura 3.4 - Células, módulos e arranjos fotovoltaicos .....	27
Figura 3.5 - Célula fotovoltaica real .....	28
Figura 3.6 - Exemplo de sistema fotovoltaico .....	32
Figura 3.7 - Arranjo fotovoltaico de 236kWh .....	32
Figura 3.8 - Sistema fotovoltaico diretamente acoplado .....	35
Figura 3.9 - Sistema fotovoltaico independente híbrido .....	37

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 - Desempenho de uma célula fotovoltaica .....	24
Gráfico 3.2 - Desempenho de potência de uma célula fotovoltaica .....	30
Gráfico 3.3 - Associação de duas células fotovoltaicas em série .....	30
Gráfico 3.4 - Associação de duas células fotovoltaicas em paralelo .....	31
Gráfico 3.5 - Tensão x corrente em célula BP Solar .....	33
Gráfico 3.6 - Evolução da taxa de eletrificação rural e urbana entre 1970 e 2000 .....	39
Gráfico 3.7 - Eletrificação rural percentual dos Estados Brasileiros (Ano de 1999) .....	39
Gráfico 3.8- Potência gerada por células fotovoltaicas no mundo .....	40
Gráfico 3.9 - Preço de painéis solares no Japão .....	42
Gráfico 3.10 - Custos de produção de energia elétrica no Brasil .....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Energias de gap de materiais fotovoltaicos .....	22
Tabela 3.2 - O continuum eletromagnético e as faixas (regimes) .....	23
Tabela 3.3 - Especificações físicas da célula fotovoltaica.....	29
Tabela 3.4 - Especificações elétricas de classes de células fotovoltaicas.....	29
Tabela 3.5 - Especificações elétricas de classes de células fotovoltaicas BP Solar .....	33
Tabela 3.6 - Profundidade de descarga x quantidade de ciclos (East Penn Deka) .....	36
Tabela 3.7 - Maiores potências instaladas em células FV por país .....	40
Tabela 3.8 - Cotação de sistema de geração de energia elétrica de célula FV .....	43
Tabela 3.9 - Tabela de investimento descontado .....	45

## LISTA DE ABREVIATURAS

Ah	Ampère-hora
C	Coulomb
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Continua
$C_{KWp}$	Custo por Quilo Watt-pico
Corrente Pmpp (A)	Im Corrente elétrica na célula fotovoltaica na condição de máxima eficiência
E	Energia do fóton
Ev	elétron-volt
FV	Fotovoltaica
H	Constante de Planck
Hz	Hertz
IEA	Agência Internacional de Energia
Isc	Corrente de curto-circuito máxima gerada pela célula fotovoltaica
J	Joule
kWh	Quilo Watt-hora
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
MWp	Megawatt-pico
N	Negativo
N/C	newton por coulomb
P	Positivo
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
Pmpp	Potência na célula fotovoltaica na condição de máxima eficiência
Pd	Retorno de investimento descontado
Ps	Retorno de investimento
Tensão Vm @ Pmpp (V)	Tensão na célula fotovoltaica na condição de máxima eficiência
u.m.	Unidade de massa
US\$	Dólar
VAh	volt-ampère-hora
Voc	Tensão de saída da célula com circuito aberto
VPL	Valor presente líquido
W	Watt

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Coeficiente de temperatura para corrente elétrica
A	Ampère
Ag	Prata
As	Arsênio
B	Coeficiente de temperatura para tensão elétrica
B	Boro
C	Velocidade da luz no vácuo
Cd	Cádmio
Cu	Cobre
F	Frequência
$\Gamma$	Coeficiente de temperatura para potência elétrica
Ge	Germânio
K	Quilo
$\Lambda$	Comprimento de onda
Ni	Níquel
P	Potência elétrica
Po	Polônio
Sb	Antimônio
Se	Selênio
Si	Silício
Te	Telúrio
V	Volt

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2 MÉTODO</b> .....	16
<b>3.1 Materiais Semicondutores</b> .....	18
<b>3.2 Células Fotovoltaicas</b> .....	20
3.2.1 ENERGIA SOLAR.....	22
3.2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS RELACIONADOS À TECNOLOGIA SOLAR .....	26
3.2.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS .....	26
<b>3.3 Componentes Fotovoltaicos</b> .....	27
<b>3.4 Sistemas Fotovoltaicos</b> .....	31
<b>3.5 Eletrificação Rural</b> .....	37
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	47
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	48

# 1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica é essencial para o funcionamento de máquinas elétricas e de equipamentos elétricos utilizados em aplicações residenciais, comerciais e industriais. As modalidades de fontes de energia são variadas e pode-se citar: biomassa tradicional, biomassa moderna, hidrelétricas grandes, pequenas centrais hidrelétricas (PCH), nuclear, gasotérmica, geotérmica, eólica e marés (ZILLES, 2012, p. 51).

A área rural difere da área urbana em relação à distribuição de energia elétrica, pois via de regra, as subestações de alta e média tensão possuem suas instalações próximas às áreas urbanas (ZILLES, 2012, p. 52).

A questão central é o entendimento sobre a viabilidade econômica em função da economicidade após a implantação do projeto de geração de energia por meio de células fotovoltaicas, e se outro tipo de geração de energia renovável poderia trazer benefícios para o referido sistema.

As fontes de energia podem ser primárias ou secundárias; renováveis ou não-renováveis. São primárias e renováveis as fontes: geotérmica, gravitacional e solar. As fontes oceânica, eólica e hidráulica são secundárias e renováveis e se originam das fontes primárias e renováveis. A fonte de energia nuclear é primária e não-renovável e os combustíveis fósseis, xisto e turfa são fontes secundárias e não-renováveis. As fontes de biomassas são secundárias e renováveis, e cana de açúcar e carvão vegetal são exemplos dessas fontes (ZILLES, 2012, p. 51).

O presente trabalho tem como objetivo apresentar a energia solar, utilizada como fonte para a geração de energia elétrica renovável e limpa, e foi proposto com os seguintes objetivos:

- a. Entender as vantagens e as limitações na geração de energia elétrica a partir da energia solar;
- b. Descrever o funcionamento e as questões ambientais relacionadas às células fotovoltaicas;
- c. Apresentar a relação custo-benefício da implantação de sistemas de geração de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas e as possíveis formas de gerar economia com a operação desses sistemas em pequenas propriedades rurais.

## 2 MÉTODO

Este trabalho de pesquisa se baseou no método da pesquisa bibliográfica de fontes primárias e secundárias, a fim de que fosse possível entender o funcionamento e o processo de manufatura das células fotovoltaicas, além de sua aplicação nos diversos tipos de sistemas de geração de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas. Além disto, foram pesquisados os assuntos relativos às instalações de eletrificação rural e projetos de sistemas fotovoltaicos em áreas rurais, em diversos livros.

Os métodos técnicos são utilizados para a realização de estudos científicos, e Gil (1991) define a pesquisa bibliográfica desta forma: “[...] quando elaborada por referências teóricas já divulgadas, por meio de livros, artigos de periódicos e, nos dias atuais, por teorias publicadas na Internet.”

Ainda, foram levantados os custos médios para a implantação de sistemas de baixa potência e as vantagens da implantação deste tipo de sistema, e o tempo de retorno médio do investimento inicial de implantação do sistema.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Este trabalho foi elaborado para que fosse possível entender o processo de produção de células fotovoltaicas, as quais são manufaturadas por meio de materiais semicondutores, os componentes fotovoltaicos e os tipos de sistemas fotovoltaicos.

A revisão de literatura foi baseada na análise quantitativa de dados relacionados à evolução da geração de energia fotovoltaica no Brasil e em países da Ásia, da Europa e da América do Norte, além da evolução da eletrificação rural no Brasil na década de 1990, e um comparativo entre os percentuais de eletrificação em áreas urbanas e rurais, com base em dois atlas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

A matriz energética brasileira corresponde a mais de 90% da energia demandada até o final da década de 1990 (REIS, 2011). É de entendimento geral por parte das entidades públicas e privadas e da ANEEL que existe a necessidade de diversificação dessa matriz energética, e fontes alternativas de energia, tais como a biomassa, a energia eólica e a energia elétrica por meio de células fotovoltaicas têm sido utilizadas na matriz energética brasileira. Sobre isto, a ANEEL (2008, p. 54) afirma:

Este valor vem reduzindo a cada ano devido a três principais razões: à necessidade da diversificação da matriz elétrica de forma a aumentar a segurança do abastecimento, da dificuldade em ofertar novos empreendimentos hidráulicos e do aumento de entraves jurídicos que protelam o licenciamento ambiental de usinas de fonte hídrica (ANEEL, 2008, p. 54).

Ainda, os sistemas de geração de energia fotovoltaica em seus diversos tipos foram descritos com base em fontes primárias constantes das referências deste trabalho de pesquisa e, ainda, os aspectos construtivos e técnicos das células fotovoltaicas. A mensuração de custos de um sistema de geração fotovoltaica foi realizada por meio da consulta em um site especializado em projetos de sistemas de geração desta natureza.

As abordagens sobre os aspectos pertinentes aos circuitos eletroeletrônicos constituintes nos sistemas de geração de energia fotovoltaica foram apresentados de forma teórica nas descrições dos diagramas de blocos dos sistemas apresentados, com a finalidade de proporcionar um entendimento global acerca desses sistemas.

O fornecimento de tensão CA realizado pelas concessionárias de energia elétrica foi realizada, a fim de que fosse possível entender a possibilidade de funcionamento concomitante com os sistemas de geração de energia elétrica por meio de células FV.

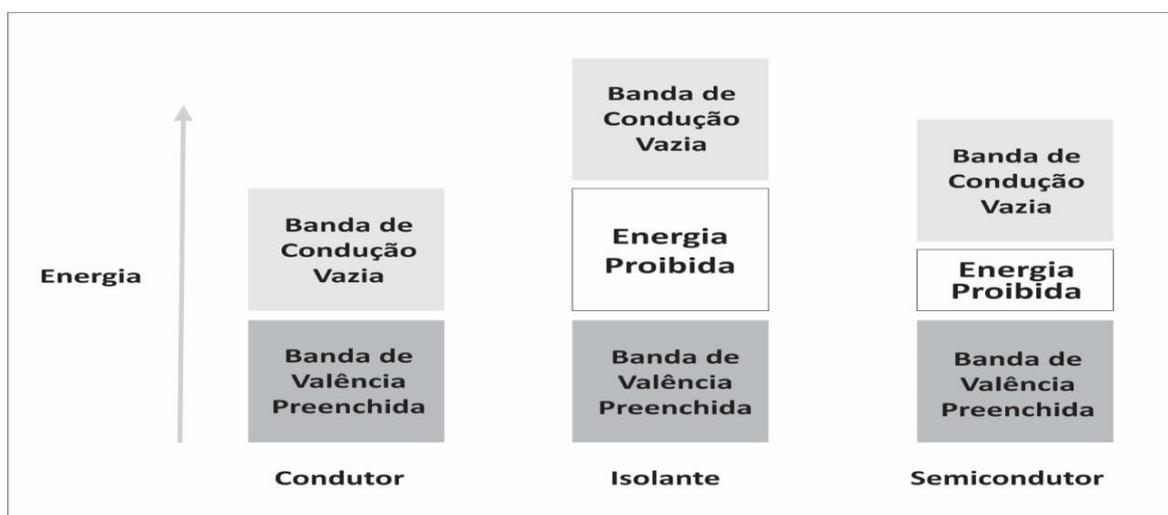
### 3.1 Materiais Semicondutores

Os elementos químicos encontrados na natureza possuem características peculiares e, no que se referem à condutividade elétrica, são classificados em três categorias: materiais condutores ou metálicos, materiais semicondutores e materiais isolantes.

Os materiais metálicos possuem condutividade elétrica elevada, pois em sua estrutura cristalina existe uma quantidade alta de elétrons livres, os quais são seus portadores de carga elétrica, além de energia de gap em eV (elétron-volt) muito baixa. Esses fatores propiciam valores elevados de corrente elétrica, mesmo com pequenas tensões aplicadas nas extremidades de uma peça metálica (HAYT JR, 2003, p. 103).

Os materiais isolantes possuem uma condutividade elétrica a muito baixa, da ordem de dezenas até centenas de eV, devido à ausência de portadores de carga em sua estrutura. A corrente elétrica aparece nos isolantes ou dielétricos somente quando ocorre o rompimento do dielétrico, com a sua conseqüente danificação. Diz-se nessa situação que o campo elétrico extrapolou a rigidez dielétrica do isolante.

A energia necessária para deslocar um elétron estático em sua banda de valência dentro do material para a banda de condução, com a conseqüente formação de corrente elétrica é chamada energia de gap, sendo medida em eV (elétron-volt), e corresponde à energia necessária para deslocar um elétron (carga de  $-1,6 \times 10^{-19}$  C, em coulombs), em um metro de distância com um campo elétrico uniforme de 1N/C, ou seja, uma energia igual a  $1,6 \times 10^{-19}$  joules. A Figura 3.1 apresenta um diagrama esquemático das energias de gap de condutores, isolantes e semicondutores.



**Figura 3.1** - Energias de gap de materiais  
Fonte: Adaptado de Hayt Jr. (2003, p. 103)

Os cristais de material semicondutor são encontrados na natureza sob a forma mineral, pois são do estado sólido e, nessa condição, são impuros ou extrínsecos, agregando outros elementos químicos e materiais orgânicos. Os cristais extrínsecos necessitam ser submetidos a processos de purificação para que sua condutividade elétrica seja obtida, e este cristal denomina-se por puro ou intrínseco (CALLISTER, 2008, p. 499-501).

Os semicondutores são denominados por semicondutores na tabela periódica de elementos, e são poucos: boro (B), silício (Si), germânio (Ge), arsênio (As), antimônio (Sb), telúrio (Te) e polônio (Po), sendo que aqueles mais utilizados na manufatura de dispositivos eletrônicos do estado sólido são o silício e o germânio, os quais são tetravalentes, e fazem parte da família 4A ou família do boro (USBERCO; SALVADOR, 2002, p. 78).

A estrutura cristalina do silício e do germânio, a exemplo dos outros semicondutores, forma-se por meio de ligações covalentes. Estes dois elementos se ligam a quatro outros átomos de silício e de germânio, respectivamente, para obter sua estabilidade eletrônica, de acordo com a teoria do octeto.

O número atômico do silício é 14 u.m. (unidades de massa) e o número atômico do germânio é 32 u.m. À medida que esta aumenta, a taxa de quebras de ligações covalentes aumenta mais no germânio que no silício, ou seja, o silício é mais estável que o germânio em condições severas em relação à temperatura (USBERCO; SALVADOR, 2002, p. 78).

A condutividade elétrica dos materiais semicondutores intrínsecos assume valores intermediários em relação aos metais e isolantes. Acerca disto, Hayt Jr (2003) afirma que:

Uma condição intermediária ocorre quando somente uma pequena região proibida separa as duas bandas [...] Pequenas quantidades de energia em forma de calor, luz, ou campo elétrico podem aumentar a energia do elétron no topo da banda completa e prover a base para a condução. Estes materiais são isolantes que dispõem de muitas propriedades dos condutores e são chamados semicondutores (HAYT JR, 2003, p. 103).

A característica que permite que os materiais semicondutores possam ser utilizados em dispositivos do estado sólido, células fotoelétricas, células fotovoltaicas, e outros dispositivos semicondutores é o controle da corrente gerada pelos dispositivos em função da tensão ou da corrente de entrada. Esta possibilidade de controle da corrente em função da tensão aplicada não é possível nos materiais metálicos, que possuem gap muito baixo, devido à grande quantidade de elétrons livres em sua estrutura cristalina, a qual, a exemplo dos semicondutores, possui geometria regular (HAYT JR, 2003, p. 103).

Os cristais semicondutores intrínsecos possuem baixa condutividade elétrica e, por

esse motivo, precisam ser dopados com impurezas próprias para a formação dos cristais extrínsecos do tipo P e do tipo N, os quais possuem valores mais elevados dessa grandeza. Desta forma, os cristais intrínsecos passam por um processo denominado dopagem, no qual átomos com valência específica substituem átomos de silício, por exemplo, em sua estrutura. (CAPUANO; MARINO, 1998, p. 212).

Nos materiais metálicos, os portadores de carga são os elétrons livres, enquanto os elétrons livres e as lacunas são os portadores de carga nos materiais semicondutores extrínsecos.

O material extrínseco tipo P é obtido por meio da inserção de átomos de impurezas trivalentes, como é o caso do boro. Nestas condições, cada átomo de boro inserido gera a ausência de um elétron para que o átomo de silício a ele ligado alcance sua estabilidade eletrônica, ou seja, para cada átomo inserido, uma lacuna é gerada (CAPUANO; MARINO, 1998, p. 212).

A estrutura do material do tipo P é constituída por íons negativos, lacunas, as quais são os portadores majoritários de carga e os elétrons livres são os portadores minoritários de carga.

O material extrínseco tipo N é obtido por meio da inserção de átomos de impurezas pentavalentes, a exemplo átomo de fósforo. Assim, para cada átomo de boro inserido é gerado um elétron livre na estrutura cristalina, ou seja, para cada átomo inserido, um elétron livre fica disponível na estrutura (CAPUANO; MARINO, 1998, p. 212-213).

O nível de inserção de impurezas dopantes no cristal semicondutor intrínseco, as dimensões dos substratos desses materiais (sejam do tipo P ou N), a quantidade de substratos e a forma pela qual são ligados entre si determina o comportamento de cada dispositivo semicondutor.

A condução de elétrons livres do material N através do material P se dá por meio de suas lacunas, quando se existe a junção desses dois materiais extrínsecos. Como exemplo, tem-se a condução de elétrons livres em diodos retificadores e transistores bipolares.

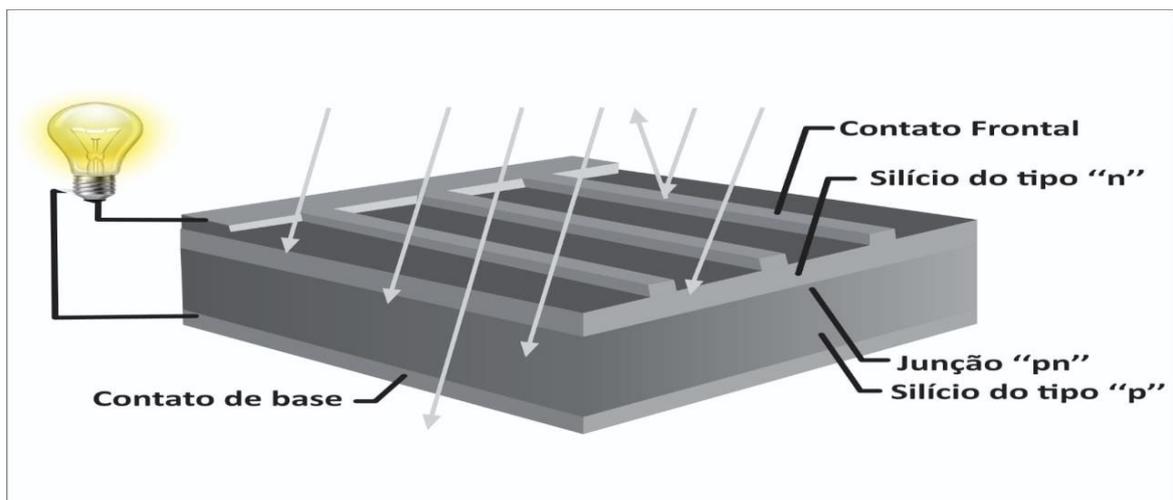
### **3.2 Células Fotovoltaicas**

Em 1839, Edmond Becquerel percebeu anteriormente á outros cientistas o efeito fotovoltaico, a qual tem como princípio que os elétrons necessitam receber energia para migrarem da banda de valência para a banda de condução, na qual há a geração de corrente elétrica, por meio de energia luminosa (ZILLES, 2012, p. 13).

Os materiais semicondutores estão sujeitos ao efeito fotoelétrico e, por esse motivo, são utilizados para a fabricação de células fotovoltaicas. De acordo com Thomazini (2008), o funcionamento da célula fotovoltaica de silício com junção PN baseia-se no seguinte princípio forma na junção PN de silício utilizada na célula fotovoltaica:

Se uma junção pn for exposta a fótons com energia maior que o gap, ocorre a geração de pares elétron-lacuna. Se isso acontecer na região em que o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando uma corrente através da junção. O deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial à qual chamamos *efeito fotovoltaico*. Se as extremidades do “pedaço” de silício forem conectadas por um fio, haverá uma circulação de elétrons [...] (THOMAZINI, 2008, p. 75).

Desta forma, pode-se afirmar que as células fotovoltaicas são dispositivos que convertem energia luminosa em energia elétrica por meio do efeito fotoelétrico, sendo que uma camada de material semicondutor PN é responsável por tal conversão. A Figura 3.2 apresenta um corte transversal de uma célula fotovoltaica.



**Figura 3.2** - Corte transversal de uma célula fotovoltaica  
Fonte: THOMAZINI (2008, p. 75).

Ainda, é importante frisar que a liberação dos elétrons da banda de valência para a banda de condução é proporcional à intensidade e ao comprimento de onda da luz incidente na célula fotovoltaica.

[...] A célula fotovoltaica ideal é uma fonte de corrente variável, em que a corrente fotogeradora varia de acordo com a mudança do nível de radiação no plano da célula. (ZILLES, 2012, p. 22).

A Tabela 3.1 apresenta as energias de gap em elétron-volt de alguns materiais fotovoltaicos representativos. Pode-se visualizar na tabela que, com exceção do silício, todos os outros materiais são ligas semicondutoras.

**Tabela 3.1** - Energias de gap de materiais fotovoltaicos

<b>Material</b>	<b>Gap de Energia (eV)</b>
Si, silício	1,11
CdTe, telureto de cádmio	1,44
CdS, sulfeto de cádmio	2,42
CuInSe, disseleneto de cobre e índio	1,01
GaAs, arsenieto de gálio	1,40
GaP, fosfeto de gálio	2,24
InP, fosfeto de índio	1,27

Fonte: HODGE (2011, p. 172)

### 3.2.1 ENERGIA SOLAR

A energia solar é utilizada como fonte de energia para a geração de energia de várias formas de sistemas de energias alternativas como, por exemplo, os coletores solares de placas planas para sistemas solares térmicos e os sistemas fotovoltaicos.

O entendimento sobre este tipo de energia requer um conhecimento prévio sobre a análise espectral da energia solar. A transferência de calor de uma fonte luminosa para uma superfície depende do comprimento de onda da radiação e das características dessa superfície. Sobre isto, Hodge (2011) afirma: “Do ponto de vista da energia solar, duas áreas interessantes são as características da energia proveniente do Sol e a resposta de uma superfície a esta energia [...]” (HODGE, 2011, p. 84).

O comprimento de onda de uma radiação se relaciona com a velocidade da luz no vácuo de acordo com a seguinte expressão, de acordo com a Equação, que representa a equação fundamental da ondulatória:

$$\lambda = c/f \quad (1)$$

$\lambda$ : comprimento de onda [m];

$c$ : velocidade da luz no vácuo ( $\approx 3 \times 10^8$  m/s);

$f$ : frequência em Hz (hertz).

Ainda, de acordo com a lei de Planck, a energia de um fóton emitido sobre um certo

material é igual ao produto da constante de Planck pela sua frequência, de acordo com a Equação, desta forma:

$$E = h \cdot f \quad (2)$$

Sendo:

E: energia do fóton em Joules (J);

h: constante de Planck ( $6,625 \times 10^{-34}$  J.s);

f: frequência em Hz (hertz).

A equação de Planck pode ser relacionada com a equação fundamental da ondulatória, de acordo com a Equação, da seguinte forma:

$$f = \frac{E}{h} = \frac{c}{\lambda} \therefore E \cdot \lambda = h \cdot c \text{ (constante)} \quad (3)$$

O espectro ou *continuum* eletromagnético das radiações é dividido em função do comprimento de onda por faixas. A faixa visível do espectro está acima de  $0,4 \mu\text{m}$  e abaixo de  $0,7 \mu\text{m}$ , e tais limites englobam a radiação térmica do Sol, a qual está na faixa compreendida entre  $0,1 \mu\text{m}$  e  $0,01 \mu\text{m}$ . A Tabela 3.2 apresenta as faixas do continuum eletromagnético.

**Tabela 3.2** - O continuum eletromagnético e as faixas (regimes)

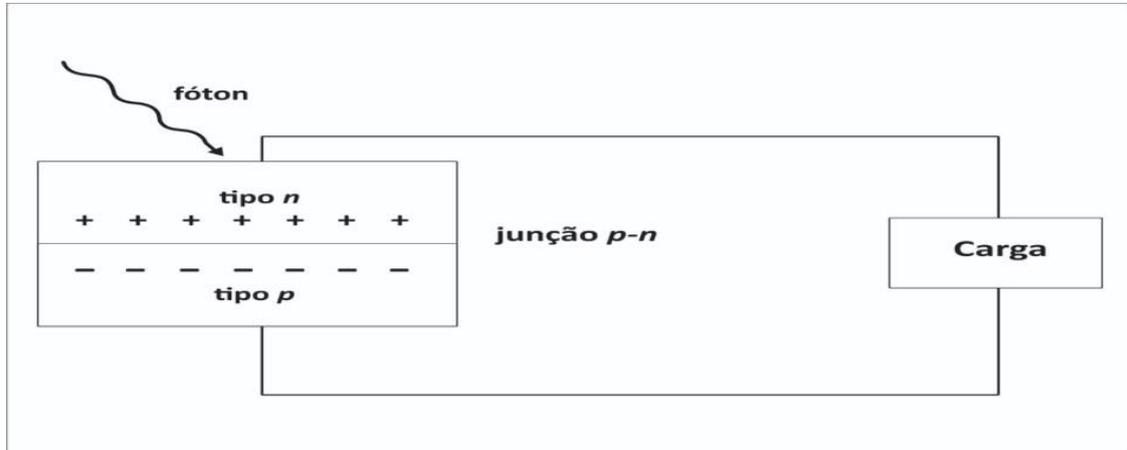
<b>Regime</b>	<b>Faixa</b>
Raios gama	$\lambda < 10^{-4} \mu\text{m}$
Raios X	$10^{-4} \mu\text{m} < \lambda < 10^{-2} \mu\text{m}$
Ultravioleta	$10^{-2} \mu\text{m} < \lambda < 0,4 \mu\text{m}$
Radiação térmica	$10^{-1} \mu\text{m} < \lambda < 10^{-2} \mu\text{m}$
Infravermelho	$0,7 \mu\text{m} < \lambda < 10^2 \mu\text{m}$
Micro-ondas	$\lambda > 10^2 \mu\text{m}$

Fonte: Adaptado de HODGE (2011, p. 84)

Como exemplo, tem-se a resolução de um problema, no qual foi determinado o comprimento de onda para excitar uma célula fotovoltaica de silício, o qual possui energia de gap de 1,1 eV, de acordo com a Equação.

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} = \frac{6,625 \times 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8}{1,1 \times 1,6 \times 10^{-19}} \approx 1,13 \mu\text{m} \quad (4)$$

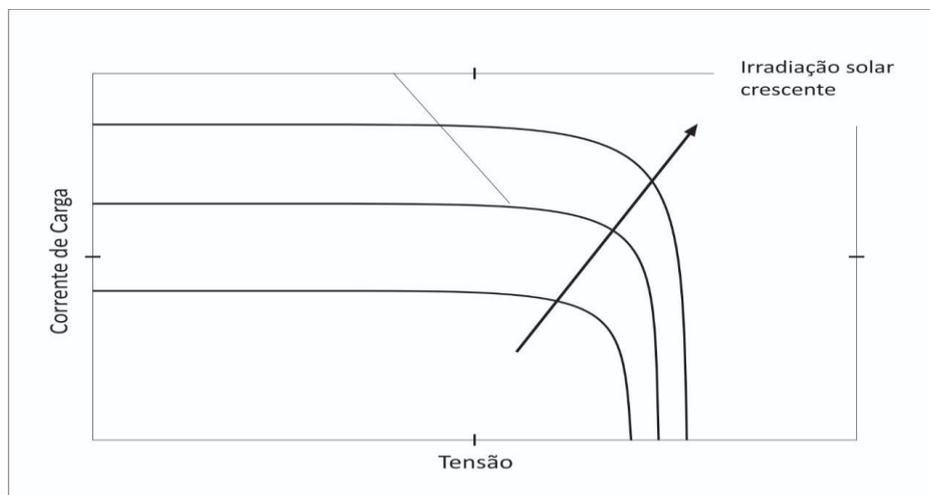
O comprimento de onda de  $1,13\mu\text{m}$  está na faixa de radiação de infravermelho, a qual é emitida pelo Sol. A Figura 3.3 mostra um diagrama esquemático de uma célula fotovoltaica, no qual um fóton excita a célula, e gera corrente elétrica.



**Figura 3.3** - Diagrama esquemático de uma célula fotovoltaica  
Fonte: THOMAZINI (2008, p. 173)

A máxima transferência de potência para a carga conectada a uma célula fotovoltaica de silício ocorre com 0,5 V de tensão na saída da célula, considerando-se a temperatura de 300K (23°C) (HODGE, 2011, p. 176). A matemática que determina esse valor é de sobremaneira complexa, e não foi abordada neste trabalho de pesquisa.

Ainda, com o aumento da intensidade da irradiação solar na célula fotovoltaica, ocorre um aumento da corrente elétrica na saída da célula. O Gráfico 3.1 mostra este comportamento, no qual a energia crescente irradiada posterga o decaimento da tensão na saída da célula e, desta forma, influencia no seu desempenho.



**Gráfico 3.1** - Desempenho de uma célula fotovoltaica  
Fonte: HODGE (2011, p. 177)



### 3.2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS RELACIONADOS À TECNOLOGIA SOLAR

As fontes geradoras de energia térmica, elétrica, de biomassa, ou outras, geram impactos ambientais no meio ambiente, mesmo que de forma mínima. Os estudos de impactos ambientais são regulados por legislação específica, e devem ser realizados por empresas que se propõem a compor o nicho de mercado de geração de energia.

As certificações, a exemplo da ISO 14001<sup>1</sup> e da ISO 50001<sup>2</sup>, são importantes para a verificação de requisitos relacionados ao meio ambiente e à gestão de energia, respectivamente. A geração de energia fotovoltaica é limpa, e não gera efluentes durante a geração de energia elétrica, nem ruídos, como no caso de usinas hidrelétricas de grande porte.

A questão relacionada aos sistemas de energia fotovoltaica se concentra no processo de produção dos módulos das células fotovoltaicas, o qual se utiliza de produtos nocivos ao meio ambiente, a exemplo de metais pesados como o níquel e o chumbo, em virtude de sua toxicidade e sobre a possibilidade de reciclagem dos módulos de energia solar, os quais são de material semicondutor, e possuem uma vida útil relativamente alta.

### 3.2.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

A primeira preocupação das empresas que produzem componentes fotovoltaicos para a geração de energia elétrica é a manutenção da preservação da imagem de indústria limpa e amiga do meio ambiente, e deve possuir estratégia de emissão de poluentes (GOLDEMBERG, 2012, p. 36).

O segundo ponto que deve ser levado em consideração é o processo de fabricação das células e a montagem dos módulos, os quais devem ser limpos e controlados, devido aos processos de purificação e dopagem dos materiais semicondutores.

A produção de células fotovoltaica se utiliza de gases tóxicos e explosivos e líquidos corrosivos em suas linhas de produção, dependendo do tipo de célula que está sendo produzida. São exemplos desses elementos: Cd, Pb, Se, Cu, Ni e Ag (GOLDEMBERG, 2012, P. 37). O chumbo (Pb) chama a atenção nesta relação por ser um metal pesado e de alta

<sup>1</sup> Especifica os requisitos de um Sistema de Gestão Ambiental com o objetivo de propiciar um desempenho ambiental adequado ao meio ambiente.

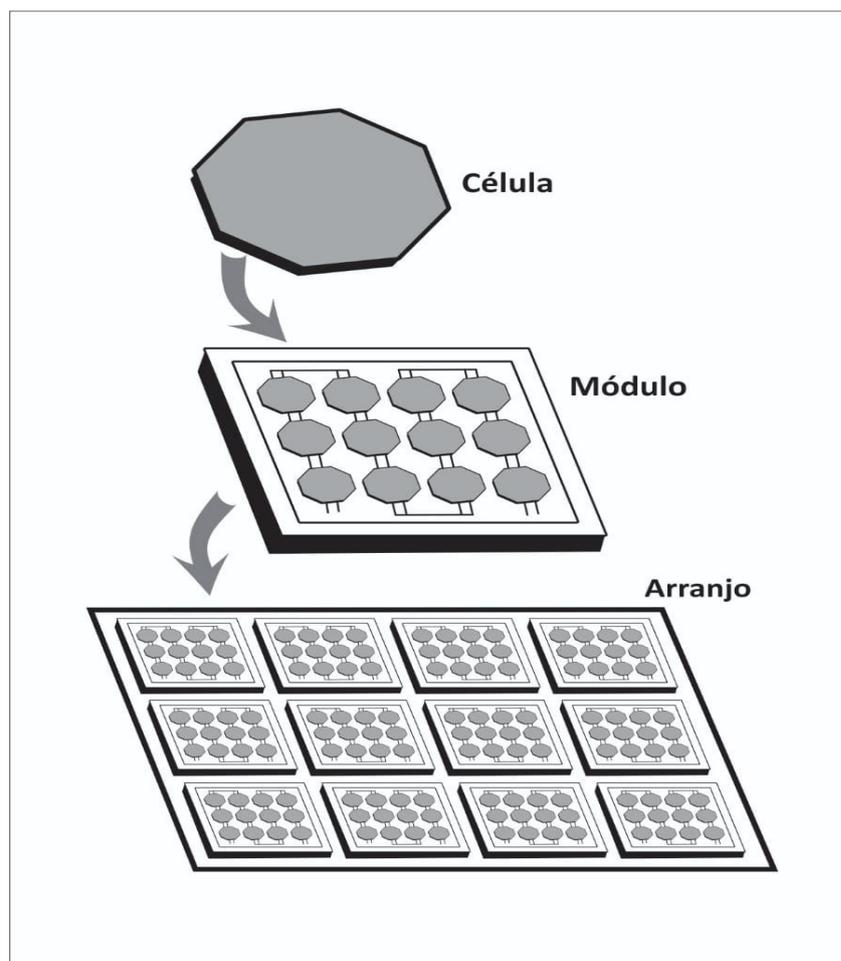
<sup>2</sup> Visa a implementação, manutenção, revisão e melhoria de um sistema de gerenciamento de energia.

toxicidade.

A reciclagem dos arranjos fotovoltaicos não é um problema crônico, pois já é um procedimento com técnica e economicidade viável, sendo realizado em vários países do mundo e em larga escala, com a finalidade de aplicações concentradas em fins específicos.

### 3.3 Componentes Fotovoltaicos

Hodge (2011, p. 171) afirma que “O termo “fotovoltaico” refere-se à geração direta de eletricidade pela radiação solar [...]”. As células fotovoltaicas são o elemento fundamental dos sistemas fotovoltaicos. A partir delas, são montados os módulos e, em sequência, o arranjo de módulos de células fotovoltaicas. A Figura 3.4 mostra a sequência de desenvolvimento para manufatura de um arranjo fotovoltaico.



**Figura 3.4** - Células, módulos e arranjos fotovoltaicos  
Fonte: HODGE (2011, p. 177)

As informações sobre as características dimensionais e elétricas das células

fotovoltaicas estão geralmente disponíveis nos manuais fornecidos por seus fabricantes. Sobre isto, Hodge (2011) cita que:

[...] Embora a Internet contenha informações relevantes sobre as células fotovoltaicas individuais, grande parte das informações são qualitativas e não quantitativas, não fornecendo as especificações completas de uma determinada célula fotovoltaica. O *website* da Photowatt Internacional, uma empresa francesa, é um *quw* contém as especificações técnicas detalhadas das células FV Photowatt (HODGE, 2011, p. 177).

Os módulos de células fotovoltaicas associadas formam os geradores fotovoltaicos. Sobre isto, Pereira e Oliveira (2012) afirmam que o gerador fotovoltaico é formado por um conjunto desses módulos, que é a primeira parte do sistema, responsável por captar a irradiação solar e transformá-la em energia elétrica.

A Figura 3.5 reproduz uma imagem de uma célula fotovoltaica real da empresa Photowatt.



**Figura 3.5** - Célula fotovoltaica real  
Fonte: HODGE (2011, p. 178)

As especificações das dimensões físicas da célula fotovoltaica são úteis para o dimensionamento físico do projeto. A Tabela 3.3 apresenta essas especificações.

**Tabela 3.3** - Especificações físicas da célula fotovoltaica

<b>Especificações de uma Célula Solar de Alta Eficiência</b>	
Produto	Célula solar de silício multicristalino
Tamanho	125,5 mm x 125,5 mm
Espessura	220 $\mu m \pm 40 \mu m$
Superfície Frontal (-)	Padrão de grade com linhas retas paralelas e barramentos de 2 x 2 mm
Polaridade negative	
Superfície Frontal (+)	Campo da superfície traseira (Alumínio)
Polaridade positive	com barramentos de 2 x 4 mm

Fonte: HODGE (2011, p. 178)

As características elétricas das células fotovoltaicas são realizadas por meio de ensaios em laboratório, e seguem um padrão para a obtenção dos parâmetros. Sobre os ensaios com as classes de células Photowatt, Hodge (2011, p. 178) afirma: [...] O nível de irradiação geral utilizado na testagem da célula fotovoltaica é de 1.000W/m<sup>2</sup>; os dados da Photowatt estão em conformidade com este nível. A Tabela 3.4 apresenta os parâmetros de células fotovoltaicas das classes de Aa a Ah da empresa Photowatt.

**Tabela 3.4** - Especificações elétricas de classes de células fotovoltaicas

Classe	Voc	Isc	Tensão Vm	Corrente Im	Pmpp	Eficiência
			@ Pmpp (V)	Pmpp (A)		
Ah	0,608	5,65	0,493	5,13	2,53	16,1
Ag	0,607	5,57	0,491	5,06	2,49	15,8
Al	0,636	5,49	0,489	4,98	2,45	15,5
Ae	0,605	5,41	0,487	4,91	2,40	15,2
Ad	0,604	5,33	0,485	4,84	2,36	15,0
Ac	0,603	5,24	0,483	4,77	2,31	14,7
Ab	0,602	5,16	0,481	4,70	2,27	14,4
Aa	0,601	5,09	0,479	4,63	2,23	14,1

Irradiação solar = 1000 W/m<sup>2</sup>

Fonte: HODGE (2011, p. 178)

Legenda:

**V<sub>oc</sub>**: tensão de saída da célula com circuito aberto;

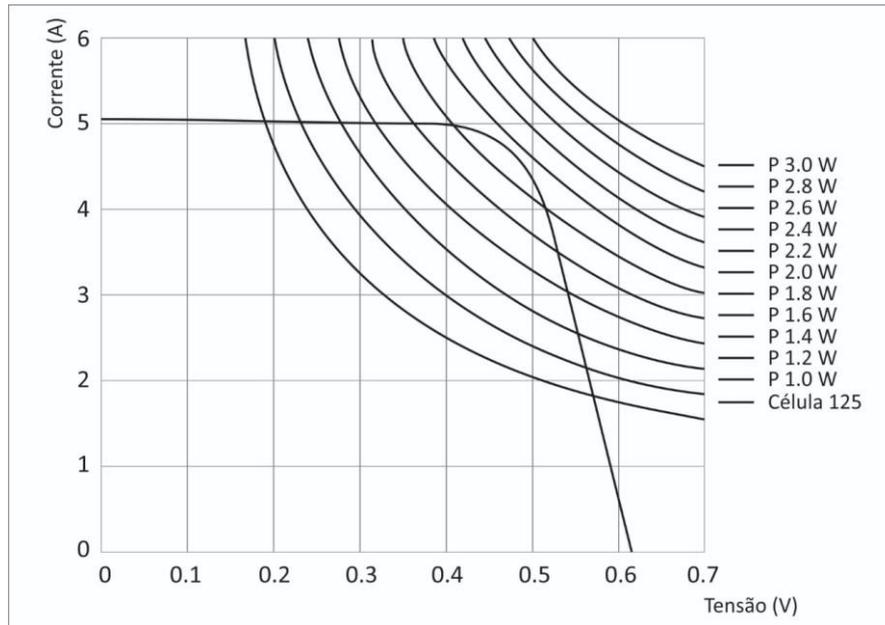
**I<sub>sc</sub>**: corrente de curto-circuito máxima gerada pela célula fotovoltaica;

**Tensão V<sub>m</sub> @ P<sub>mp</sub> (V); Corrente I<sub>m</sub> P<sub>mp</sub> (A); P<sub>mp</sub>**: parâmetros de tensão, corrente e potência na célula fotovoltaica na condição de máxima eficiência;

**Eficiência**: percentual de eficiência da célula fotovoltaica.

A Tabela 3.4 permite visualizar que a tensão Voc média é de aproximadamente 0,6V e que a corrente Isc média é de aproximadamente 5A.

O Gráfico 3.2 apresenta a curva tensão versus corrente em função da potência produzida pela célula fotovoltaica Photowatt 125.



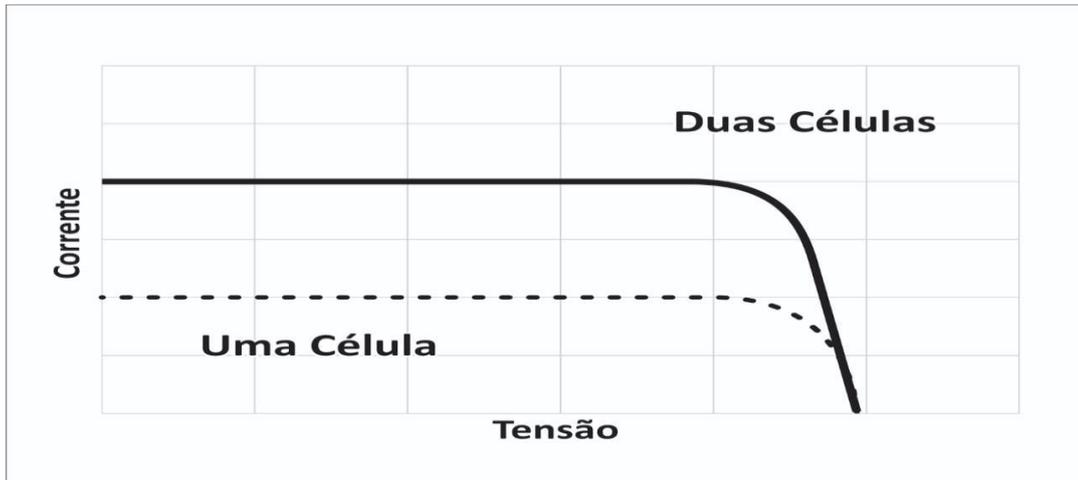
**Gráfico 3.2** - Desempenho de potência de uma célula fotovoltaica  
Fonte: HODGE (2011, p. 178)

O Gráfico 3.2 permite a visualização da corrente máxima fornecida pela célula 125 (5A); e a tensão de 0,55V, quando a corrente é de 3A e a potência fornecida pela célula é de aproximadamente 1,6W.

O Gráfico 3.3 apresenta a associação de duas células idênticas em série, e o Gráfico 3.4 apresenta a associação de duas células idênticas em paralelo. As células solares fotovoltaicas obedecem às mesmas regras para fontes CC associadas em série ou em paralelo.



**Gráfico 3.3** - Associação de duas células fotovoltaicas em série  
Fonte: HODGE (2011, p. 179)



**Gráfico 3.4** - Associação de duas células fotovoltaicas em paralelo  
 Fonte: HODGE (2011, p. 179)

Na associação em série, pode-se observar que a tensão gerada aumenta, e na associação em paralelo, pode-se observar que a corrente gerada aumenta, porque, em série, a tensão é somada proporcionalmente ao número de células associadas dessa forma e, em paralelo, a corrente das células é somada proporcionalmente ao número de células.

### 3.4 Sistemas Fotovoltaicos

A geração de economia para o cliente após a implantação do sistema de geração fotovoltaica leva um certo período de tempo, devido ao investimento financeiro inicial no referido sistema, o qual geralmente é conectado à rede da concessionária. Sobre isto, Goldemberg (2012) afirma:

Atualmente, considerando a conexão à rede de sistemas instalados sobre edificações, um sistema fotovoltaico levará entre 2,5 e 3 anos para restituir toda a energia gasta na produção dos módulos, isso considerando sua aplicação em localidades com níveis médios de irradiação solar,  $1700\text{kWh/m}^2$  ano [...] (GOLDEMBERG (2012, p. 36).

Um ponto importante sobre a viabilidade do projeto de geração de energia elétrica fotovoltaica é o conjunto ou banco de baterias, o qual representa uma parcela considerável do custo final do projeto.

A Figura 3.6 apresenta um arranjo fotovoltaico de placa plana de 18kW com acompanhamento da trajetória solar em dois eixos.



**Figura 3.6** - Exemplo de sistema fotovoltaico  
Fonte: HODGE (2011, p. 171)

A Figura 3.7 apresenta um arranjo fotovoltaico de um sistema de geração de energia por meio de células FV, capaz de gerar um trabalho elétrico de 236kWh.



**Figura 3.7** - Arranjo fotovoltaico de 236kWh  
Fonte: HODGE (2011, p. 183)

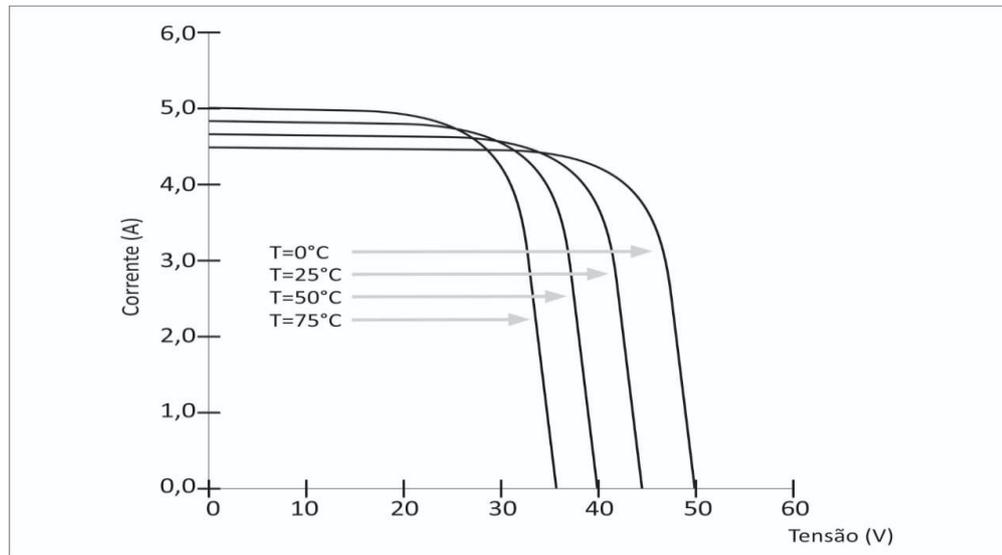
O dimensionamento de um projeto de sistema fotovoltaico deve levar em consideração potência necessária a ser fornecida, a corrente máxima e a tensão máxima fornecidas pela célula fotovoltaica.

Na prática, a fim de se evitar tensões com polaridades trocadas nas saídas das células fotovoltaicas, são utilizados diodos bloqueadores (HODGE, 2011, p. 179). Esses diodos são do tipo retificador, e só permitem a passagem da corrente em uma direção, e devem ser conectados individualmente, em paralelo com a célula, de forma que seu anodo seja conectado ao material N da célula fotovoltaica e seu catodo ao material P da célula fotovoltaica.

A temperatura produz influência real e deve ser considerada em relação ao desempenho em projetos de sistemas de células fotovoltaicas. Uma célula fotovoltaica da BP

Solar, a qual fornece 160W, para o modelo BP 3160; e 150W, para o modelo BP 3150, considerando-se o nível de irradiação igual a  $1000\text{W}/\text{m}^2$ .

O aumento de temperatura provoca uma diminuição da corrente na saída da célula fotovoltaica e, para um mesmo valor de corrente de saída, um aumento na tensão de saída da célula fotovoltaica, o que pode se visualizar no Gráfico 3.5.



**Gráfico 3.5** - Tensão x corrente em célula BP Solar  
Fonte: HODGE (2011, p. 180)

A corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ), a tensão de saída ( $V_{oc}$ ) e a potência ( $P_{m\acute{a}x}$ ) máximas da célula fotovoltaica são dependentes da temperatura e se relacionam a coeficientes de temperatura para cada um desses parâmetros. As especificações elétricas e de comportamento em relação à temperatura podem ser visualizados na Tabela 3.5.

**Tabela 3.5** - Especificações elétricas de classes de células fotovoltaicas BP Solar

PARÂMETRO	BP 3160	BP 3150
Potência máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ )	160W	150W
Tensão na $P_{m\acute{a}x}$ ( $V_{mp}$ )	35,1V	34,5V
Corrente na $P_{m\acute{a}x}$ ( $I_{mp}$ )	4,55A	4,35A
$P_{m\acute{a}x}$ mínima garantida	150W	140W
Corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ )	4,8A	4,75A
Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ )	44,2V	43,5V
Coeficiente de temperatura de $I_{sc}$	$(0,065 \pm 0,015)\%/^{\circ}\text{C}$	
Coeficiente de temperatura de tensão	$-(160 \pm 20)\text{mV}/^{\circ}\text{C}$	
Coeficiente de temperatura de alimentação	$(0,5 \pm 0,05)\%/^{\circ}\text{C}$	
NOCT	$47 \pm 2^{\circ}\text{C}$	

Fonte: Adaptado de HODGE (2011, p. 180)

Os coeficientes de temperatura relacionados à  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  e  $P_{m\acute{a}x}$  são fornecidos em função

da temperatura em °C, e possuem comportamento linear para variação de temperatura, de acordo com as equações a seguir.

$$I_{SC} = I_0 [1 + \alpha \Delta T] \quad (5)$$

Os sistemas fotovoltaicos podem ser independentes ou integrados à rede elétrica, sendo estas as duas classificações desses sistemas de geração de energia renovável. De acordo com Hodge (2011):

[...] Os sistemas fotovoltaicos independentes não são conectados à rede elétrica. Os usos funcionais de uma hierarquia de complexidade crescente dos sistemas fotovoltaicos são: 1. Diretamente acoplado. 2. Sistemas com armazenamento em baterias. 3. Sistemas com energia de reserva (gerador). 4. Sistemas de energia híbrida. 5. Sistemas conectados à rede elétrica. 6. Sistemas para a produção de energia elétrica (HODGE, 2011, p. 183).

Existem outros equipamentos capazes de realizar a função de armazenamento da energia, porém, As baterias são os dispositivos de armazenamento de energia ainda mais utilizados em larga escala, pelo motivo de possuírem eficiência elevada. Outro exemplo de elemento de armazenamento de carga são os capacitores elétricos. As baterias são definidas por Pinho e Galdino (2014) da seguinte forma:

[...] um conjunto de células ou vasos eletroquímicos, conectados em série e/ou paralelo, capazes de armazenar energia elétrica na forma de energia química por meio de um processo eletroquímico de oxidação e redução que ocorre em seu interior (PINHO; GALDINO, 2014, p.164).

Os sistemas enumerados de 1 a 4 são independentes e, portanto, não conectados à rede elétrica. Os sistemas diretamente acoplados operam somente quando a energia solar encontra-se disponível e, o sistema com armazenamento em baterias supre a deficiência do primeiro sistema, pelo fato de, além de armazenar energia tensão contínua (CC), ainda possui um sistema para inversão de tensão, o qual possui um inversor de frequência ou conversor CC-CA, que gera tensão alternada (AC) em sua saída, a qual pode ser monofásica ou trifásica, por meio da variação de frequência.

Os inversores trifásicos operam com base na conversão da tensão contínua das baterias em corrente alternada trifásica. Internamente, possuem uma ponte trifásica que gera tensão em três saídas, as quais são defasadas de 120°, uma em relação às outras duas, ao passo que nos

inversores monofásicos existe apenas uma saída (AHMED, 2000, p. 371-373).

A Figura 3.8 apresenta o diagrama esquemático de um sistema fotovoltaico independente diretamente acoplado.



**Figura 3.8** - Sistema fotovoltaico diretamente acoplado

Fonte: HODGE (2011, p. 183)

As características das baterias utilizadas em sistemas independentes com armazenamentos em baterias devem ser levadas em consideração, pois fazem parte do sistema de células fotovoltaica, o qual deve suprir a demanda da instalação elétrica ao qual está conectado. De acordo com Hodge (2011):

[...] As métricas típicas da bateria incluem a tensão, a capacidade de carga, a capacidade de ciclo e a profundidade de descarga. As duas primeiras métricas, tensão e capacidade de carga, são utilizadas para especificar o potencial de armazenamento/recuperação de energia da bateria. A tensão através do terminal da bateria é especificada em volts (V), e a capacidade de carga de uma bateria é classificada em unidades de ampères-horas (Ah). O produto da tensão e da capacidade de carga produz a energia armazenada na bateria. Por exemplo, uma bateria de 12 V com uma capacidade de carga de 50 Ah armazena  $600 \text{ VAh} = 0,6 \text{ KWh}$  de energia (HODGE, 2011, p. 183).

A vida útil das baterias se relacionam com suas características relacionadas a sua capacidade de ciclo e sua profundidade de descarga. É importante ressaltar que as baterias utilizadas em sistemas fotovoltaicos exigem altos valores relacionados a esses dois parâmetros, que se relacionam à eficiência dessas baterias.

A capacidade de ciclo da bateria se relaciona à sua vida útil, pois se refere à quantidade de ciclos de carga e descarga previstos para a bateria, ao passo que a profundidade de descarga prevê o quanto de energia pode ser retirada da bateria em plena carga (corrente e tensão máximas) sem que a danifique.

A profundidade de carga se relaciona à capacidade de ciclo de forma inversamente

proporcional, ou seja, quanto mais percentual de carga é retirado da bateria, menos ciclos de carga esta suportará.

A Tabela 3.6 elucida este comportamento da bateria para conjuntos de baterias da empresa americana East Penn Deka.

**Tabela 3.6** - Profundidade de descarga x quantidade de ciclos (East Penn Deka)

<b>Profundidade de Descarga (%)</b>	<b>Ciclos</b>
10	5700
25	2100
50	1000
80	600
100	450

Fonte: HODGE (2011, p. 184)

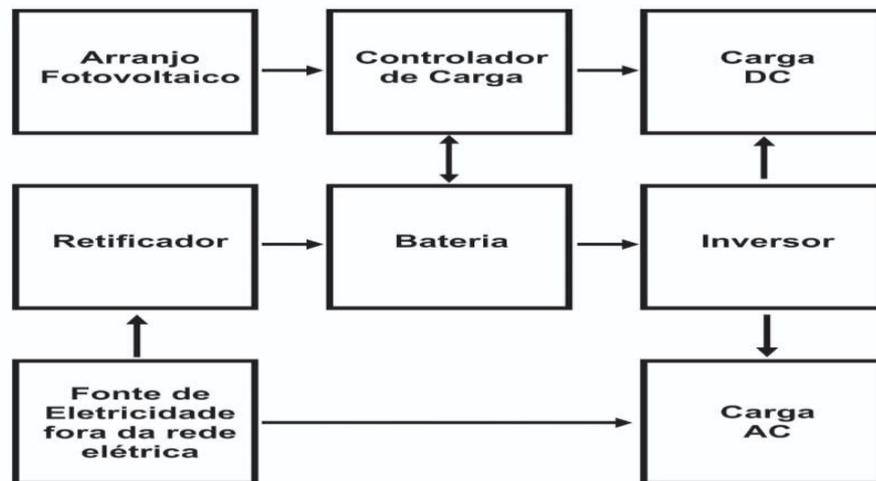
O dimensionamento dos conjuntos de baterias deve levar em conta a profundidade de descarga e a capacidade de ciclo.

A Figura 3.14 apresenta o diagrama em blocos de um sistema fotovoltaico independente com armazenamento em baterias. Pode-se visualizar que não há bloco que se relacione à rede de distribuição de energia elétrica. Sobre a utilização deste sistema fotovoltaico, Villalva e Gazoli (2012) afirmam que: “[...] pode ser utilizado em carregamento de baterias de veículos elétricos, em iluminação pública e, até mesmo, em pequenos aparelhos portáteis.

O sistema híbrido é implementado por meio de armazenamento de energia em conjuntos de baterias e de uma fonte de energia elétrica não oriunda da rede elétrica, por exemplo, um gerador a diesel. O retificador é um conversor CA-CC, e faz o papel de converter o sinal CA da fonte CA em corrente contínua, a fim de carregar a bateria em conjunto com as células fotovoltaicas, sob gerenciamento do controlador de carga.

Pereira e Oliveira (2011) afirmam que os controladores de carga têm a função de proteção dos acumuladores, ou seja, as baterias do sistema de geração fotovoltaica e, ainda, de aumentar a eficiência desses sistemas.

A Figura 3.9 apresenta o diagrama em blocos de um sistema fotovoltaico independente híbrido, no qual tensões CC e CA são fornecidas.



**Figura 3.9** - Sistema fotovoltaico independente híbrido  
 Fonte: HODGE (2011, p. 185)

Um sistema FV pode estar conectado à rede de distribuição de energia elétrica, e disponibilizar energia para esta rede. Dois sistemas são classificados nesta categoria, segundo Hodge (2011, p. 183): sistemas conectados à rede elétrica (baixa potência gerada) e sistemas para a produção de energia elétrica.

O condicionador de potência tem a função de tornar o sinal CA de tensão produzida pelo sistema conectado à rede elétrica compatível com a tensão da rede elétrica, no que se refere à amplitude, frequência e fase. Do contrário, a tensão do sistema provocará um curto-circuito na rede da concessionária de energia elétrica.

Os sistemas fotovoltaicos para a produção de energia elétrica geram valores elevados de potência elétrica. Sobre isto, Hodge (2011, p. 186) afirma: “[...] Os sistemas fotovoltaicos de alta capacidade instalada de kW podem pertencer às concessionárias, mas os sistemas residenciais e comerciais com baixa capacidade de kW provavelmente são de propriedade de particulares [...]”.

### 3.5 Eletrificação Rural

A eletrificação rural no Brasil teve início na década de 1920, mais exatamente no Estado de São Paulo. Tendrih (1990) afirma que: “A eletrificação rural no Brasil começa no ano de 1923, quando é registrada a primeira ligação em uma propriedade rural, no município de Batatais, no estado de São Paulo.”

As criações de programas relacionados à eletrificação rural têm por finalidade atender à população rural, a fim de que possam usufruir das benesses provenientes da energia elétrica.

Camargo e Ribeiro (2013) descrevem o Programa “Luz para Todos” da seguinte forma:

Lançado em 11 de novembro de 2003, por meio da Lei 10.762, o Programa “Luz para Todos” incluiu no serviço público de distribuição de energia elétrica mais de quinze milhões de pessoas, e mais de 3.2 milhões de ligações efetuadas. Após mais de treze anos de seu início no final do ano de 2014, por meio do Decreto 8.387, de 30 de dezembro de 2014, restou definido que o término do programa será em dezembro de 2018. Com isso se pretende atender a cerca de 228 mil domicílios ainda não atendidos, em sua maioria nas regiões norte e nordeste (CAMARGO; RIBEIRO, 2013, p. 4).

O Programa “Luz para Todos” foi prorrogado até dezembro de 2018, por meio do Decreto nº 8.387, de 30 de dezembro de 2014, a fim de atender cerca de 228 mil ligações pendentes, de acordo com cálculos da ANEEL (CAMARGO; RIBEIRO, 2013, p. 5).

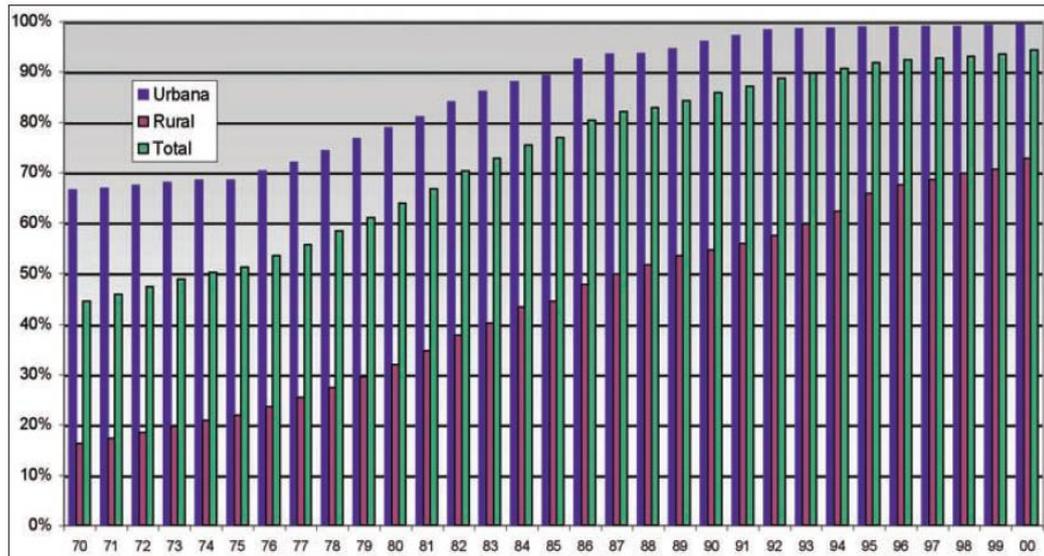
A população atendida pelo referido programa é de origem carente. Sobre esta situação, Camargo e Ribeiro (2013) afirmam:

A realidade do morador das áreas rurais brasileiras, elegíveis para o atendimento nos moldes do Programa “Luz para Todos” é de extrema pobreza. Pesquisa efetuada no ano de 2009, para avaliar o Programa, revelou um perfil no qual mais de 90% dos atendidos possuem renda familiar de, no máximo, três salários mínimos, sendo que mais de 60% não ultrapassam um salário mínimo de renda familiar (CAMARGO; RIBEIRO, 2013, p. 9).

Os percentuais de aumento de eletrificação em áreas rurais são menores que nas áreas urbanas do Brasil. Sobre esta análise, a ANEEL (2002, p. 120) destaca seus aspectos econômicos:

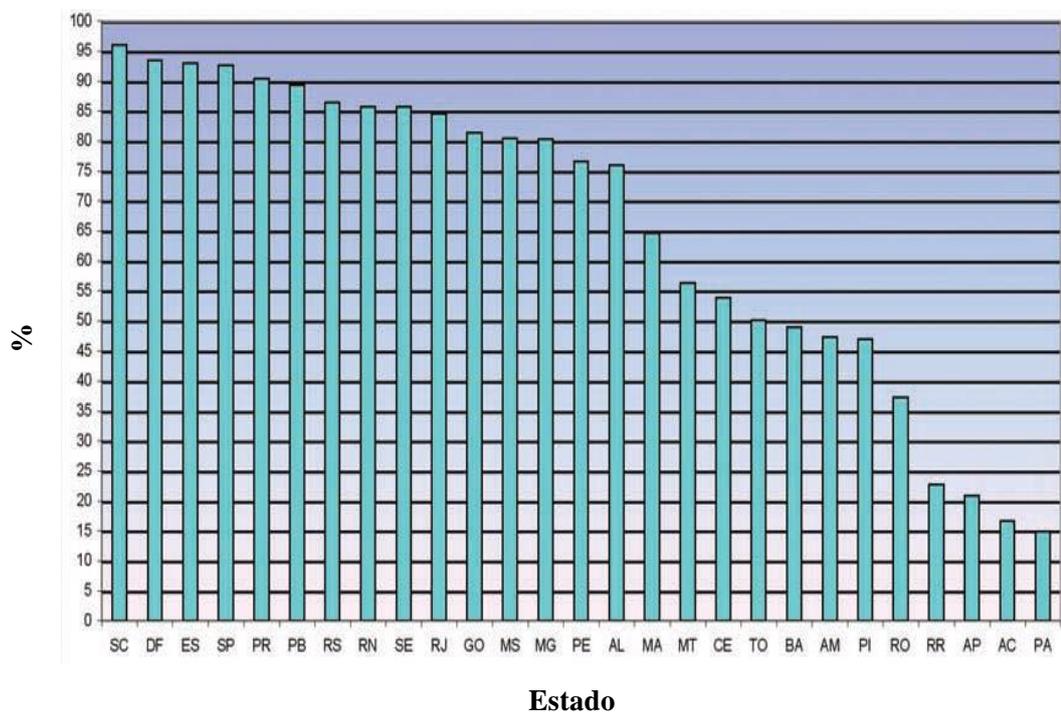
[...] Uma análise desses dados indica que o período de maior crescimento da taxa de eletrificação no Brasil foi entre 1975 e 1985, quando o índice de atendimento dos domicílios passou de 51% para 77% (na área rural, passou de 22% para 45%). Nos anos 1990, cresceu 8,4 pontos percentuais e, nos últimos cinco anos, apenas 2,5 pontos percentuais.

O Gráfico 3.6 elucidava essas afirmações, relacionadas à eletrificação urbana e rural nos domicílios brasileiros, no período dos anos de 1970 a 2000.



**Gráfico 3.6** - Evolução da taxa de eletrificação rural e urbana entre 1970 e 2000  
Fonte: ANEEL (2000, p. 120)

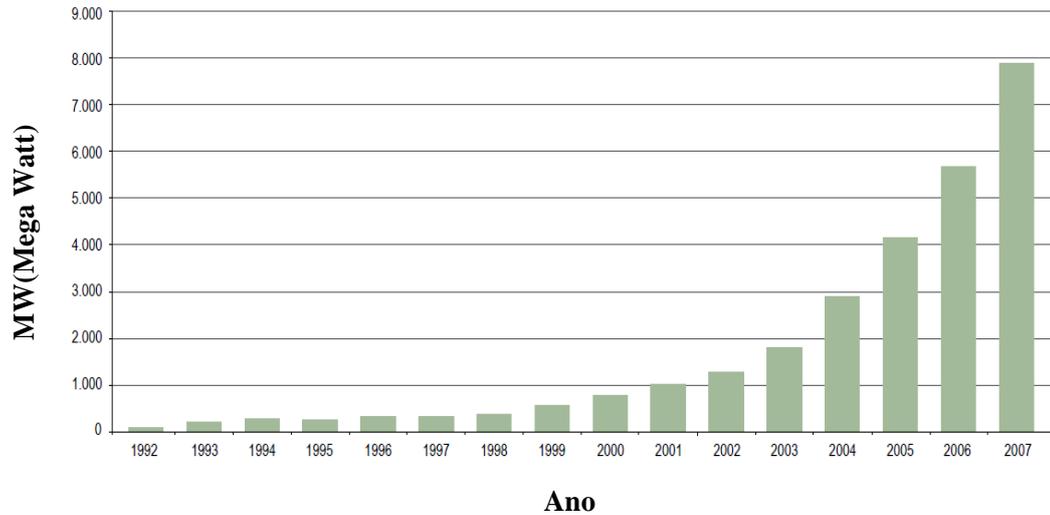
A eletrificação rural, de forma mais pontual, é abordada no Atlas de Energia Elétrica da ANEEL do ano de 2000. Percebe-se pelo Gráfico 3.7 que os estados brasileiros da região Norte possuíam uma taxa baixa de eletrificação



**Gráfico 3.7** - Eletrificação rural percentual dos Estados Brasileiros (Ano de 1999)  
Fonte: ANEEL (2000, p. 121)

A Agência Internacional de Energia (IEA) publicou um gráfico que mostra a evolução da potência instalada em MW gerada por células fotovoltaicas no mundo, entre os anos de 1992 e 2007 (ANEEL, 2008). O crescimento é exponencial no referido período, e pode ser

visualizado no Gráfico 3.8.



**Gráfico 3.8-** Potência gerada por células fotovoltaicas no mundo.  
Fonte: Adaptado de ANEEL (2008, p. 83)

A Tabela 3.7 mostra os países com maior geração por células FV, computados até o ano de 2007. A Alemanha é o país que possui maior potência instalada até o referido ano.

**Tabela 3.7 -** Maiores potências instaladas em células FV por país

	<b>País</b>	<b>Potência (MW)</b>	<b>% em relação ao total</b>
1°	Alemanha	3.862,0	49,3
2°	Japão	1.918,9	24,5
3°	Estados Unidos	830,5	10,6
4°	Espanha	655,0	8,4
5°	Outros países	454,4	5,7
6°	Itália	120,2	1,5
	<b>Total</b>	<b>7.841,0</b>	<b>100</b>

Fonte: ANEEL (2008, p. 83)

A eletrificação rural no Brasil segue o modelo convencional previsto nas NBR ABNT 5422 e NBR ABNT 15688, as quais versam sobre Projeto de Redes Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica e Redes de Distribuição Aérea Rural de Energia Elétrica com condutor nu, respectivamente. A geração de energia elétrica por células FV se restringe a locais de difícil acesso para as redes de transmissão de energia elétrica. Sobre isto, Goldemberg (2012) afirma que:

[...] Esses nichos, hoje em dia, restringem-se às diferentes situações de eletrificação

rural de países em desenvolvimento, onde os altos custos de expansão das linhas de transmissão e distribuição ou as restrições ambientais encarecem e dificultam significativamente a eletricidade proveniente da rede elétrica. Nesses locais, as opções concorrentes aos sistemas fotovoltaicos, como a geração de energia a diesel, por exemplo, também enfrentam fatores limitadores que aumentam seus custos de geração, principalmente relacionados à dificuldade de acesso às localidades (GOLDEMBERG, 2012, p. 37).

Mas projetos governamentais visam melhorar situações com relação a eletrificação rural, segundo metas da ANEEL (2015). As situações diversas em áreas rurais tais como acesso, distância em relação a distribuidoras de combustível, a exemplo do diesel utilizados em geradores elétricos, dificultam uma opção imediata por geração por células fotovoltaicas ou outras fontes geradoras de energia renovável, como a biomassa, células coletoras de energia solar, células combustíveis, etc. Goldemberg (2012, p. 37) reafirma este ponto de vista em relação aos sistemas fotovoltaicos rurais isolados da rede, os quais não devem ser substituídos de forma imediata ao uso de outras fontes geradoras, tendo em vista a necessidade da discussão e estudo da viabilidade da aplicação dos sistemas fotovoltaicos em casos particulares.

A Resolução Normativa nº 482/2012 foi publicada pela ANEEL, e criou o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, o qual permite que o consumidor instale pequenos geradores com o objetivo de reduzir o pagamento pela energia elétrica. Até o mês de outubro de 2015, foram instaladas 1.285 centrais geradoras, sendo 1.233 com a fonte solar fotovoltaica e 13 híbridas solar/eólica (ANEEL, 2015).

Em relação à classificação das centrais geradoras de energia de pequeno porte, entende-se por microgeração distribuída as centrais com potência instalada de até 75 kW (quilowatts) e minigeração distribuída as com potência instalada acima de 75 kW e menor ou igual 5 MW (ANEEL, 2015).

Em relação aos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, é importante verificar se há disponibilidade para tal conexão e, ainda, a realização de um comparativo entre os custos da energia elétrica convencional da rede de distribuição, verificadas as perdas na transmissão e os custos para propiciar esta transmissão e a geração por células FV (GOLDEMBERG, 2012, p. 37-38).

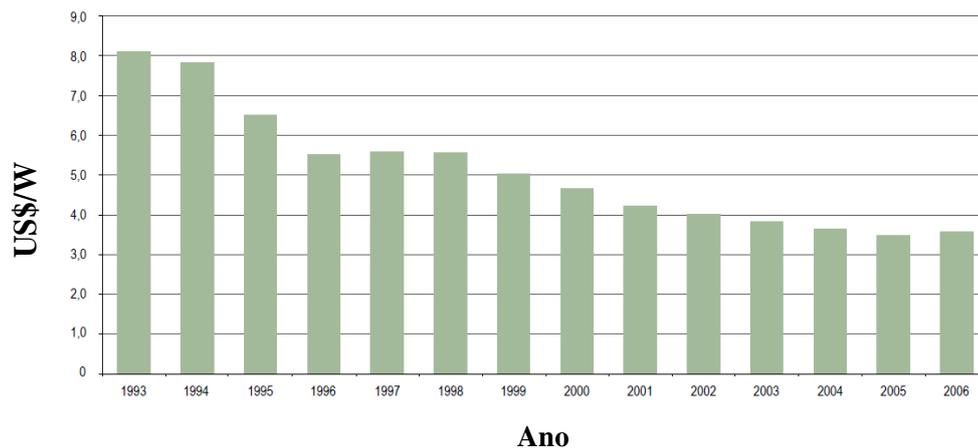
O custo da energia fotovoltaica também deve ser levado em consideração por ser muito maior que o custo da energia convencional por MWh. Goldemberg (2012) cita que:

[...] Do ponto de vista do consumidor, a comparação deve ser feita com a tarifa elétrica aplicada. Atualmente o custo médio de produção de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos conectados à rede está entre R\$650 e R\$900/MWh, ou seja,

entre duas e três vezes a tarifa aplicada ao consumidor residencial (GOLDEMBERG, 2012, p. 38).

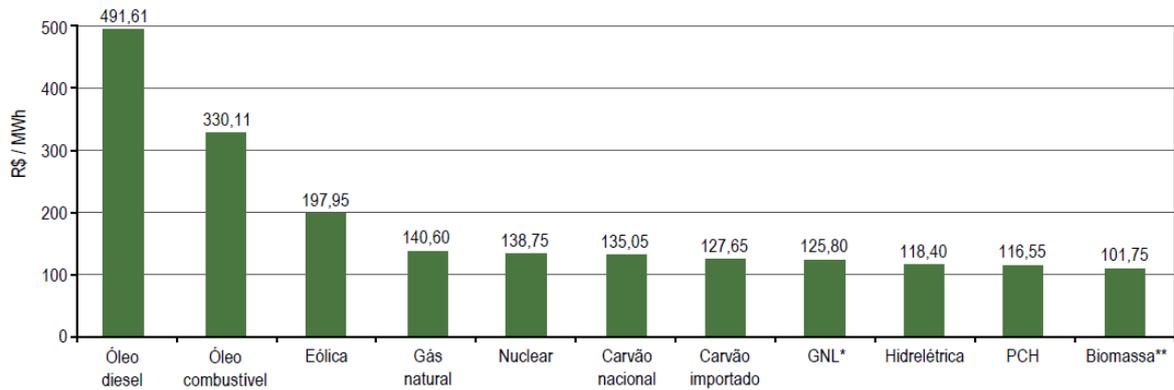
Um contra-argumento em relação aos custos elevados para a geração de energia elétrica por meio de células FV é a diminuição dos custos do projeto destinado a este fim, tendo em vista a evolução tecnológica, que propicia uma diminuição dos custos relacionados às células fotovoltaicas e às baterias dos conjuntos utilizados no armazenamento de energia. Além disto, a energia convencional vem aumentando de valor de forma significativa (GOLDEMBERG, 2012, p. 38).

Este cenário de decréscimo da tarifa de energia elétrica fotovoltaica e o aumento na tarifa elétrica convencional projeta um momento em que os custos se equipararão. Neste caso, a opção pela primeira forma de geração se torna clara. O Gráfico 3.9 mostra a evolução em relação ao decréscimo do custo de painéis solares no Japão, no período compreendido entre os anos de 1993 e 2006, em dólares por Watt produzido de energia elétrica fotovoltaica.



**Gráfico 3.9** - Preço de painéis solares no Japão.  
Fonte: ANEEL (2008, p. 85)

O Gráfico 3.10 apresenta os custos da produção de energia elétrica no Brasil em reais por megawatt hora, relativos ao ano de 2008, para fontes diversas da energia fotovoltaica. É possível visualizar que a produção da energia eólica possui um custo superior à produção da energia hidrelétrica, e que as energias elétricas provenientes de combustíveis fósseis possuem um custo muito mais elevado.



**Gráfico 3.10** - Custos de produção de energia elétrica no Brasil.

Fonte: ANEEL (2008, p. 30)

A mensuração dos custos reais de sistemas de geração de energia elétrica convencional e de energia elétrica por meio de células FV é essencial para a escolha entre um ou outro sistema, e envolve vários fatores, os quais já foram citados neste Capítulo.

A Tabela 3.8 apresenta a cotação de um sistema de geração de energia elétrica por meio de células FV da empresa PowerPod, realizada no ano de 2008. Nesse ano, a cotação média do dólar foi de R\$ 1,83, de acordo com a cotação média mensal fornecida pelo Banco Central do Brasil. O valor à época ficava compreendido entre R\$ 15.307,95 e R\$ 20.679,00.

**Tabela 3.8** - Cotação de sistema de geração de energia elétrica de célula FV  
US\$ 8.365 a US\$ 11.300 (2008)

24 V DC de potência com inversor AC  
4-6 arranjos FV de 64 W  
2 conjuntos de baterias com 600 Ah de armazenamento  
Controlador de carga  
Inversor de 1.500 para 2.400 W

Fonte: Adaptado de HODGE (2011, p. 185)

O sistema da Tabela 3.8 gera o valor máximo de 2.400W, o que representa um trabalho elétrico de 2,4kWh.

Os valores atuais de custos para os projetos de sistemas de geração elétrica por energia fotovoltaica tendem a decrescer com o passar do tempo. Isto, devido à maior difusão e desenvolvimento desta tecnologia e, ainda da evolução dos conjuntos de baterias de alto desempenho.

A necessidade de cotação de valores atuais desses sistemas de geração de energia se fez necessária, a fim de se traçar um comparativo dos valores médios de mercado. Os valores de trabalho elétrico em kWp (quilowatts pico) foram pesquisados, com a regra de serem próximos ao valor de potência mostrado na Tabela 3.8 (2,4kWh).

De acordo com Sunergia (2018), um sistema de geração para uma casa média de três a quatro pessoas, o qual fornece 2,2kWp é instalado por valores entre R\$ 14.740,00 a R\$ 18.040,00, com valor médio de **R\$ 16.390,00**. Um outro projeto para suprir uma casa com as mesmas características, com potência gerada de 2,64kWp custa **R\$ 17.570,00** (SOLARPRIME, 2018).

O valor médio do projeto apresentado na Tabela 8 é de **R\$ 17.993,48**, e fica próximo aos dois outros orçamentos pesquisados. A média dos três valores cotados, sendo que foram utilizados os valores médios da primeira e da segunda cotações é **R\$ 17.317,83**. A média para as potências geradas pelos sistemas é de aproximadamente 2,41kWp, e será considerado o valor de 2,5kWp.

A vida média dos painéis fotovoltaicos é de 25 anos, com manutenção anual baixa, realizada com a troca eventual dos painéis ou de baterias do conjunto armazenador de carga. Utilizou-se um valor estimado de manutenção de 22,7%. Desta forma, o custo com manutenção será de R\$ 3.931,15. O valor total investido em 25 anos será, portanto, de R\$ 21.248,98.

Em 25 anos de uso, a energia gerada será de aproximadamente 75.800kWp. Então, o custo por kWp será de:

$$C_{\text{kWp}} = \frac{\text{R\$ } 21.248,98}{75.800\text{kWh}} \approx 0,28\text{R\$/kWp} \quad (6)$$

As áreas rurais possuem eletrificação para atender à demanda de energia elétrica, e as concessionárias fornecem energia elétrica tanto em áreas urbanas quanto nessas áreas. As concessionárias fornecem energia com tarifas diferenciadas em áreas urbanas e rurais que variam entre as concessionárias e de acordo com a área atendida. Por exemplo, o kWh em área urbana fornecido pela Elektro em 2018 era cotado em R\$ 0,4125. Este valor excede o valor em kWp em R\$ 0,1325/kWh.

A propriedade rural tomada como referência hipotética para cálculo possui uma bomba hidráulica de 1,5 HP e a carga instalada no interior da casa é de 1.400W. O chuveiro é aquecido por caldeira (boiler), e dispensa o uso de energia elétrica. Desta forma, a carga total instalada é de:

$$P = 1,5 \times 746 + 1400 = 2519\text{W} \quad (7)$$

Com base no valor de R\$ 0,1325/kWh foi tomado como base para se calcular a economia na propriedade rural. Suponha-se que o consumo mensal na propriedade seja de 2000kWh por mês, sendo 24000kWh por ano, por conta da bomba hidráulica, a qual é utilizada para recalque da água para irrigação e para a residência. O investimento inicial para a compra dos painéis fotovoltaicos será de R\$ 17.317,83, com custo anual de manutenção de R\$ 897,77, o que se reverterá numa economia anual de energia de R\$3.180,00, considerando uma taxa mínima de atratividade de 5% ao ano, tem-se um valor presente líquido (VPL) de R\$ 14.847,79, com um tempo de retorno de investimento de 9,72 anos, levando-se em consideração o valor do dinheiro no tempo.

A Tabela 3.9 apresenta os cálculos para a determinação do valor de retorno de investimento descontado ( $P_d$ ).

**Tabela 3.9** - Tabela de investimento descontado

ANO	FLUXO	FLUXO DESCONTADO	SALDO
0	-R\$ 17.317,83	-	- R\$ 17.317,83
1	R\$ 2282,23	R\$ 2.173,55	- R\$ 15144,28
2	R\$ 2282,23	R\$ 2.070,05	- R\$ 13074,23
3	R\$ 2282,23	R\$ 1.971,48	- R\$ 11102,75
4	R\$ 2282,23	R\$ 1.877,60	- R\$ 9225,15
5	R\$ 2282,23	R\$ 1.788,19	- R\$ 7436,96
6	R\$ 2282,23	R\$ 1.703,04	- R\$ 5733,92
7	R\$ 2282,23	R\$ 1.621,94	- R\$ 4111,98
8	R\$ 2282,23	R\$ 1.544,70	- R\$ 2567,28
9	R\$ 2282,23	R\$ 1.471,15	- R\$ 1096,19
10	R\$ 2282,23	R\$ 1.401,09	R\$ 304,19

Fonte: autor

A viabilidade econômica é dada através do fluxo, considerando o valor presente de retornos futuros descontados levando em conta uma taxa de juros apropriada (SANTOS, 2016, P. 23), os cálculos do retorno financeiro descontado ( $P_d$ ) e do valor presente líquido (VPL) estão descritos nas Equações (8) e (9), respectivamente.

$$P_d = 9 - \frac{(-R\$1.482,04)}{R\$2049,85} = 9,72 \text{ anos} \quad (8)$$

$$VPL = \sum_{n=1}^t \frac{FC}{(1+i)^n} = R\$32.165,62 - R\$17.317,83 = R\$14.847,83 \text{ (positivo)} \quad (9)$$

A economia no consumo pode, ainda, ser aumentada com a implantação de sistemas alternativos de geração de energia limpa, como é o caso de geração por meio de biomassa, o qual em áreas rurais tem viabilidade facilitada pela disponibilidade de produtos orgânicos de origem animal e vegetal.

## **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A pesquisa realizada neste trabalho se propôs a entender o panorama da geração de energia fotovoltaica, de forma mais pontual, no Brasil. Faz-se necessário citar que neste país a irradiação solar possui níveis elevados, em especial nas regiões do Centro-Oeste, Norte e Nordeste, o que torna viável a implantação de sistemas geradores desse tipo.

Os resultados apresentados no Capítulo 3 facilitaram o entendimento quantitativo sobre a viabilidade de implantação dos sistemas de geração de energia por meio de células fotovoltaicas.

O aumento da economicidade dos sistemas de geração de energia elétrica por meio de células FV instalados em áreas rurais deve ser apoiada em sistemas de geração alternativa, tais como, painéis coletores solares, eólica, biomassa, PCH de baixa capacidade, entre outras. Ainda, pode ser realizado o armazenamento de águas pluviais; e aumento do nível de iluminação natural diurna no interior das instalações da propriedade rural.

## REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2002. 153 p.
- \_\_\_\_\_. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: ANEEL, 2008. 236 p.
- \_\_\_\_\_. **ANEEL amplia possibilidades para micro e minigeração distribuída**. Brasília: ANEEL, 2015. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output\\_Noticia.s.cfm?Identidade=8955&id\\_area=90](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticia.s.cfm?Identidade=8955&id_area=90)>. Acesso em: 27 jun. 2019.
- AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. Tradução: Bazán Tecnologia e Linguística. Revisão técnica: João Antonio Martino. 1 ed. São Paulo: Prentice Hall, 2000. 479 p.
- CAMARGO, E. J. S.; RIBEIRO, F. S. **Programa Luz para Todos: avanços e retrocessos – um novo estoque de excluídos**. 10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural. São Paulo: Universidade de São Paulo, USP, 2013.
- CALLISTER, JR. W. D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 7. ed. Tradução: Sérgio Murilo Stamile Soares. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- CAPUANO, F. G.; MARINO, M. A. M. **Laboratório de Eletricidade e Eletrônica**. 3. ed. São Paulo: Érica, 1998. 302 p.
- GOLDEMBERG, J. et al. **Série Energia e Sustentabilidade: Energias Renováveis**. São Paulo: Blucher, 2012. 110 p.
- HAYT JR, W. H. **Eletrromagnetismo**. 4. ed. Livros Técnicos e Científicos, 2003. 403 p.
- HODGE, B. K. **Sistemas de Aplicações de Energia Alternativa**. Tradução: Luiz Claudio de Queiroz Faria. Revisão técnica: Marco Aurélio dos Santos. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 309 p.
- PEREIRA, F.; OLIVEIRA, M. **Curso técnico instalador de energia solar fotovoltaica**. Porto: Publindústria, 2011.
- PINHO, J.; GALDINO, M. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel-Cresesb, 2014.
- REIS, L. B. **Geração de energia elétrica**. Barueri, São Paulo Manole, 2011.
- SANTOS, M. A. **Dimensionamento e retorno de investimento de geração de energia solar residencial: um estudo de caso no município de Lagoa Santa - MG**. 2016. 44 p. Monografia (Especialização) - Universidade Federal do Paraná. Curso de pós-graduação em mudanças climáticas, projetos sustentáveis e mercado de carbono do programa de educação continuada em ciências agrárias da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná, 2016.
- SOLARPRIME. **Entenda a relação custo-benefício da energia solar**. Disponível em: <<https://solarprime.com.br/blog/entenda-a-relacao-custo-beneficio-da-energia-solar/>>. 2018. Acesso em: 13 abr. 2019.

SUNERGIA. **Energia Solar. Economia na sua Conta:** Quanto custa a energia fotovoltaica. Disponível em: <<https://sunergia.com.br/blog/energia-solar-economia-na-sua-conta-quanto-custa-a-energia-solar-fotovoltaica/>>. 2018. Acesso em: 13 abr. 2019.

TENDRIH, L. **Experiências com sistemas de eletrificação rural de baixo custo:** uma análise dos impactos socioeconômicos. 1990. 171 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Ciências Humanas e Sociais. Curso de pós-graduação em desenvolvimento agrícola da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Itaguaí, Rio de Janeiro, 1990.

THOMAZINI, D. **Sensores industriais:** fundamentos e aplicações. 5 ed. São Paulo: Erica, 2008. 222 p.

USBERCO, J.; SALVADOR, E. **Química.** 5. ed. São Paulo: Saraiva, 2002, 672 p.

VILLALVA, M.; GAZOLI, J. **Energia solar fotovoltaica:** conceitos e aplicações. São Paulo: Erica, 2012.

ZILLES, R. et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

Autorizo cópia total ou parcial desta obra, apenas para fins de estudo e pesquisa, sendo expressamente vedado qualquer tipo de reprodução para fins comerciais sem prévia autorização específica do autor. Autorizo também a divulgação do arquivo no formato PDF no banco de monografias da Biblioteca institucional.

Marcos Vinícius Salgado Barbosa

Pindamonhangaba, junho de 2019.