

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS – UNIS / MG**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**  
**LUIZ HENRIQUE PEREIRA RIBEIRO**

**ENERGIA SOLAR: importância, implantação, instalação, vantagens e durabilidade de  
um sistema de energia renovável**

**Varginha**  
**2018**

**LUIZ HENRIQUE PEREIRA RIBEIRO**

**ENERGIA SOLAR: importância, implantação, instalação, vantagens e durabilidade de um sistema de energia renovável**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – Unis / MG, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof. Sidnei Pereira.

**Varginha  
2018**

**LUIZ HENRIQUE PEREIRA RIBEIRO**

**ENERGIA SOLAR: importância, implantação, instalação, vantagens e durabilidade de um sistema de energia renovável**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – Unis/MG, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em     /     /

---

Prof.

---

Prof.

---

Prof.

OBS.:

Dedico este trabalho a Deus, por me guiar e me acompanhar ao longo da graduação, e aos meus pais e irmão, por tornar isso possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos mestres que compartilharam seu saber, aos profissionais com quem trabalhei e colegas de faculdade que me auxiliaram neste propósito.

“A persistência é o caminho do êxito.”  
Charles Chaplin

## RESUMO

Este trabalho trata-se, quase que de forma completa, sobre todas variáveis envolvidas no que diz respeito ao estudo da implantação de um sistema de captação de energia solar, sua transformação em energia elétrica e sua utilização nas mais variadas áreas do consumo humano. Através de leis da física, química e matemática explica o funcionamento de uma estação de captação de energia solar (painel fotovoltaico) e como de sua transformação em energia elétrica (princípio fotovoltaico). Aborda as vantagens econômicas, da segurança e do ramo da sustentabilidade que uma opção por este meio de geração de energia elétrica traria para seus consumidores, sejam eles domiciliares, industriais, do ramo do agronegócio ou até mesmo para empresas produtoras de energia elétrica. Através de uma abordagem de fácil compreensão conduz o leitor a entender o funcionamento de um sistema fotovoltaica, seu custo inicial, tempo de retorno de investimento, empresas capacitadas a vendê-la e instalá-la. São usadas ilustrações que mostram o princípio fotovoltaico em nível molecular, os diferentes tipos de materiais que compõem um painel fotovoltaico, suas vantagens e desvantagens. Faz estudo de caso de como o consumidor ganharia ao optar por esta forma de energia, apresentando cálculo de quanto tempo teria retorno de seu investimento, a durabilidade de uma central e se seria viável pela durabilidade, optar por esta fonte de energia. Compara esta forma de captação de energia com as tantas outras existentes nos dias de hoje levando em conta o investimento inicial, o tempo mínimo para obter retorno e o quão sustentável e bom para o planeta ela pode ser. Faz um estudo de que situação poderia pedir uma fonte de energia e finalmente, propõe discutir as vantagens de se implantar este sistema de geração de energia elétrica em larga escala, a ponto de resguardar as outras fontes de energia para situações sem precedentes ou para aquelas em que a produção de energia solar fosse insuficiente. Trata da possível comercialização da energia sobressalente ou sua estocagem e lembra que uma fonte de energia limpa e renovável é sempre mais viável.

**Palavras-Chave:** Energia solar. Sistema fotovoltaico. Consumidores.

## **ABSTRACT**

*This work deals, almost completely, with all variables involved in the study of the implantation of a solar energy capture system, its transformation into electric energy and its use in the most varied areas of human consumption. Through laws of physics, chemistry and mathematics explains the operation of a solar power station (photovoltaic panel) and how it is transformed into electrical energy (photovoltaic principle). It addresses the economic, safety and sustainability advantages that an option for electric power generation would bring to its consumers, be they domiciliary, industrial, agribusiness or even electric power companies. Through an easy-to-understand approach, the reader will understand how a photovoltaic system works, its initial cost, time to return investment, qualified companies to sell and install it. Illustrations are used which show the photovoltaic principle at the molecular level, the different types of materials that make up a photovoltaic panel, their advantages and disadvantages. It makes a case study of how the consumer would gain by choosing this form of energy, presenting calculation of how much time would return of his investment, the durability of a power plant and if it would be viable by the durability, opt for this energy source. Compare this form of energy capture with the many others that exist today taking into account the initial investment, the minimum time to obtain return and how sustainable and good for the planet it can be. It does a study of what situation could ask for a source of energy and finally, proposes to discuss the advantages of implementing this system of electric power generation on a large scale, to the point of protecting the other sources of energy for unprecedented situations or for those in that the production of solar energy was insufficient. It deals with the possible commercialization of spare energy or its stocking and recalls that a source of clean and renewable energy is always more viable.*

**Keywords:** *Solar energy. Photovoltaic cell. Consumers.*



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Matriz elétrica mundial 2015 .....	16
Figura 02 – Matriz elétrica brasileira 2016 .....	17
Figura 03 – Comparativo da utilização de fontes renováveis e não renováveis para a geração de energia elétrica no Brasil e no mundo .....	17
Figura 04 – Ciclo de algumas fontes de energia renováveis e não renováveis .....	17
Figura 05 – Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica através do petróleo.....	19
Figura 06 – Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do carvão mineral.....	19
Figura 07 – Tipos de carvão, reservas e usos .....	20
Figura 08 – Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do gás natural .....	21
Figura 09 – Perfil esquemático de uma usina nuclear .....	22
Figura 10 – Perfil esquemático de usina hidrelétrica .....	23
Figura 11 – Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do biogás .....	24
Figura 12 – Reservatório geotérmico de alta temperatura.....	25
Figura 13 – Geração de energia em usina maremotriz .....	26
Figura 14 – Aerogeradores .....	27
Figura 15 – Potencial eólico brasileiro .....	28
Figura 16 – Variação da radiação solar no Brasil.....	29
Figura 17 – Tipos de sistemas fotovoltaicos .....	32
Figura 18 – Sistema híbrido eólico fotovoltaico.....	33
Figura 19 – Sistema de bombeamento fotovoltaico .....	34
Figura 20 – Componentes de um sistema fotovoltaico autônomo.....	34
Figura 21 – Sistema conectado à rede .....	35
Figura 22 – Relação geométrica sol-Terra-painel solar.....	36
Figura 23 – Gráfico das horas de Sol pico .....	37
Figura 24 – Gap de energia nos semicondutores.....	38
Figura 25 – Comparativo do gap entre os tipos de matérias .....	39
Figura 26 – Cristal de Silício intrínseco (i) .....	39
Figura 27 – Silício dopado com fósforo .....	40
Figura 28 – Silício dopado com boro .....	40
Figura 29 – Difusão de elétrons na junção P-N.....	41
Figura 30 – Aproveitamento da radiação solar pelas células fotovoltaicas.....	41
Figura 31 – Representação de uma célula de silício cristalizado .....	42
Figura 32 – Células de silício monocristalino .....	44
Figura 33 – Células de silício policristalino .....	45
Figura 34 – Representação de uma célula de silício amorfo .....	46
Figura 35 – Módulo de silício amorfo .....	47
Figura 36 – Representação de uma célula CIS .....	47
Figura 37 – Célula CIS .....	48
Figura 38 – Representação de uma célula CdTe .....	49
Figura 39 – Módulo de CdTe .....	49
Figura 40 – Conexão de células fotovoltaicas em série.....	50
Figura 41 – Máquina para conexão automática de células .....	51
Figura 42 – Máquina de corte dos materiais.....	51
Figura 43 – Laminadora de módulos fotovoltaicos .....	52

Figura 44 – Máquina de molduragem de módulos fotovoltaicos .....	52
Figura 45 – Simulador solar .....	53
Figura 46 – Módulos fotovoltaicos comerciais .....	53
Figura 47 – Corte transversal de um módulo fotovoltaico .....	54
Figura 48 – Caixas de conexões de módulos fotovoltaicos.....	55
Figura 49 – Conectores MC3 e MC4 .....	55
Figura 50 – Conectores Tyco.....	55
Figura 51 – Curva I V de um módulo fotovoltaico comercial.....	57
Figura 52 – Fator de forma de um módulo comercial .....	58
Figura 53 – Variação de Voc e Isc de acordo à irradiação .....	59
Figura 54 – Variação de tensão e corrente de um módulo em função da temperatura....	59
Figura 55 – Comportamento de uma associação em série de módulos fotovoltaicos ....	61
Figura 56 – Comportamento de uma associação de módulos em paralelo.....	62
Figura 57 – Associação mista de módulos fotovoltaicos .....	62
Figura 58 – Ponto-quente em uma célula fotovoltaica .....	63
Figura 59 – Funcionamento normal de um conjunto de células fotovoltaicas .....	63
Figura 60 – Célula sombreada convertendo eletricidade em calor.....	64
Figura 61 – Fileiras de módulos com diodos de bloqueio.....	64
Figura 62 – Diodos de bloqueio e fusíveis de proteção na caixa de conexão dos módulos .....	65
Figura 63 – Diodos de derivação desviando a corrente reversa .....	65
Figura 64 – Diodos de by-pass nas caixas de conexão dos módulos .....	66
Figura 65 – Painel fotovoltaico montado em telhado.....	67
Figura 66 – Presilha para telhas de argila.....	68
Figura 67 – Presilha para telhas de metal .....	68
Figura 68 – Módulos montados sobre o perfil de suporte .....	69
Figura 69 – Detalhes das presilhas e perfil de suporte dos módulos para telhados.....	69
Figura 70 – Suporte com correção da inclinação, instalado em telhado metálico.....	70
Figura 71 – Painéis fotovoltaicos montados no chão, com inclinação adequada.....	70
Figura 72 – Suporte para instalação em plano horizontal .....	71
Figura 73 – Painel fotovoltaico com sistema de rastreo solar .....	73
Figura 74 – Painel fotovoltaico em mastro.....	73
Figura 75 – Diferenças na posição do sol nas diferentes estações do ano.....	74
Figura 76 – Relações geométricas entre possíveis geradores de sombra .....	75
Figura 77 – Distância mínima entre o painel e um obstáculo frontal.....	75
Figura 78 – Cálculo da distância entre painéis .....	76
Figura 79 – Diagrama de ligação com a rede, de um sistema PV on-grid .....	77
Figura 80 – Inversores Grid-Tie .....	77
Figura 81 – Inversor chaveado pela rede com ponte de tiristores .....	79
Figura 82 – Formato da tensão e da corrente de um inversor comutado pela rede .....	79
Figura 83 – Diagrama de ponte de MOSFET's em inversor chaveado.....	80
Figura 84 – Diagrama de um inversor com um transformador .....	81
Figura 85 – Curvas características de vários inversores (especificações do fabricante) 84	84
Figura 86 – Frequência e energia de diferentes classes de irradiação, baseado em um sistema inclinado em 30° em Munique, Alemanha .....	85
Figura 87 – Dispositivos de aquisição de dados para inversores SMA.....	86
Figura 88 – Caixa de junção comercial .....	89
Figura 89 – Sistema com inversor central com transformador.....	90
Figura 90 – Sistema com alta tensão de entrada (120 VCC) .....	91
Figura 91 – Sistema com configuração master-slave .....	92

Figura 92 – Sistemas de grupos de módulos .....	93
Figura 93 – Sistemas com módulos CA .....	94
Figura 94 – Micro inversores para módulos PV .....	94
Figura 95 – Pannel fotovoltaico 24 V de sistema autônomo.....	95
Figura 96 – Banco de baterias em uma grande central PV.....	96
Figura 97 – Bateria de chumbo-ácido .....	98
Figura 98 – Expectativa de vida útil de uma bateria pela profundidade de descarga.....	99
Figura 99 – Módulo de silício amorfo .....	101
Figura 100 – Bateria de eletrólito imobilizado (VRLA) .....	101
Figura 101 – Eletrodos positivos de uma bateria OPzS .....	102
Figura 102 – Placa positiva de bateria OGi .....	103
Figura 103 – Vaso de 2v e bateria monobloco de 12V .....	103
Figura 104 – Controladores de carga.....	108
Figura 105 – Esquema de funcionamento de um controlador de carga do tipo série....	110
Figura 106 – Esquema de funcionamento de um controlador de carga do tipo Shunt..	110
Figura 107 – Esquema de funcionamento de um controlador com MPPT.....	111
Figura 108 – Inversores para uso fotovoltaico .....	112
Figura 109 – Esquema de ligação simplificado.....	115

## LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Capacidade instalada das plantas termelétricas a derivados de petróleo e parcela da geração de eletricidade nos países da OCDE.....	18
Quadro 02 – Geração de energia elétrica a partir do carvão no mundo em 2006.....	20
Quadro 03 – Maiores consumidores de energia hidrelétrica (2006 e 2007) em TWh.....	23
Quadro 04 – Participação da hidroeletricidade na produção total de energia elétrica em 2006 .....	23
Quadro 05 – Capacidade geotérmica mundial instalada (2007) .....	25
Quadro 06 – Potência instalada em dez anos (MW) .....	26
Quadro 07 – Potência instalada em 2007.....	27
Quadro 08 – Aproveitamento da radiação solar pelas células de silício cristalino .....	42
Quadro 09 – Eficiência dos diferentes tipos de células fotovoltaicas .....	50
Quadro 10 – Tensões nominais e Voc de módulos Standard .....	56
Quadro 11 – Condições de teste e operação dos módulos fotovoltaicos.....	58
Quadro 12 – Coeficientes de temperatura de um módulo comercial .....	60
Quadro 13 – Coeficientes de temperatura de módulos fotovoltaicos .....	61
Quadro 14 – Comparação entre os tipos de inversores .....	82
Quadro 15 – Estado de carga de uma bateria pela densidade do eletrólito. ....	98
Quadro 16 – Estado de carga de uma bateria pela tensão entre os terminais .....	100

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Panorama energético atual .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Energias não-renováveis .....</b>	<b>18</b>
2.2.1 Energia elétrica através do petróleo.....	18
2.2.2 Energia elétrica através do carvão mineral.....	19
2.2.3 Energia elétrica através do gás natural .....	20
2.2.4 Energia elétrica através da energia nuclear .....	21
<b>2.3 Energias renováveis.....</b>	<b>22</b>
2.3.1 Energia hidráulica.....	22
2.3.2 Biomassa.....	24
2.3.3 Energia geotérmica .....	24
2.3.4 Energia das marés .....	25
2.3.5 Energia eólica.....	26
2.3.6 Energia solar .....	28
<b>3 METODOLOGIA E FUNCIONAMENTO .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1 Panorama da energia solar .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2 Sistemas fotovoltaicos.....</b>	<b>31</b>
3.2.1 Classificação dos sistemas fotovoltaicos.....	32
3.2.1.1 Sistemas isolados.....	33
3.2.1.1.1 Sistemas híbridos.....	33
3.2.1.1.2 Sistemas autônomos puros .....	33
3.2.1.1.3 Sistemas autônomos sem armazenamento.....	34
3.2.1.2 Componentes de um sistema fotovoltaico autônomo.....	34
3.2.1.3 Sistemas conectados à rede (On-Grid) .....	35
<b>3.3 Geometria solar.....</b>	<b>36</b>
3.3.1 Horas de sol pico .....	37
<b>3.4 Efeito fotovoltaico .....</b>	<b>38</b>
3.4.1 Princípios de funcionamento .....	38
<b>3.5 Células fotovoltaicas .....</b>	<b>42</b>
3.5.1 Tipos de células fotovoltaicas.....	43
3.5.1.1 Silício cristalino.....	43
3.5.1.1.1 Silício monocristalino.....	43
3.5.1.1.2 Silício policristalino.....	44
3.5.1.2 Células de película fina .....	45
3.5.1.2.1 Silício amorfo (a-Si) .....	46
3.5.1.2.2 Disseleneto de Cobre e Índio (CIS) .....	47
3.5.1.2.3 Telureto de Cádmio (CdTe) .....	48
3.5.1.3 Tabela de eficiências .....	50
<b>3.6 Módulos fotovoltaicos .....</b>	<b>50</b>
3.6.1 Características dos módulos fotovoltaicos .....	54
3.6.1.1 Características físicas e mecânicas .....	54
3.6.1.2 Características elétricas .....	56
3.6.2 Condições de teste e operação .....	58
3.6.3 Associação de módulos fotovoltaicos .....	61
3.6.4 Sombreamento, pontos quentes e diodos de proteção .....	62

3.6.4.1 Diodos de By-Pass.....	64
3.6.4.2 Diodos de bloqueio.....	64
<b>3.7 Painel e arranjo fotovoltaico.....</b>	<b>66</b>
3.7.1 Estruturas de suporte e ancoragem .....	67
3.7.1.1 Suportes para telhado.....	68
3.7.1.2 Suportes para instalação em plano horizontal .....	70
3.7.1.2.1 Orientação do painel fotovoltaico .....	71
3.7.1.2.2 Inclinação do painel fotovoltaico .....	72
3.7.1.3 Suporte em forma de mastro .....	73
3.7.2 Cálculos de sombreamento .....	74
<b>3.8 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede .....</b>	<b>76</b>
3.8.1 Inversores On-Grid .....	77
3.8.1.1 Classificação e tipo de inversores Grid-Tie .....	78
3.8.1.1.1 Inversores controlados/ Chaveados pela rede.....	78
3.8.1.1.2 Inversores autorregulados (auto chaveados) .....	80
3.8.1.1.2.1 Inversores auto chaveados com transformador de baixa frequência (LF) ....	81
3.8.1.1.2.2 Inversores com transformadores de alta frequência (HF) .....	81
3.8.1.1.2.3 Inversores sem transformadores .....	82
3.8.1.1.3 Características e propriedades dos inversores Grid-Tie .....	82
3.8.1.1.4 Eficiência de conversão (Conversion Efficiency) – $\eta_{CON}$ .....	83
3.8.1.1.5 Eficiência de Rastreamento (Tracking Efficiency) – $\eta_{TR}$ .....	83
3.8.1.1.6 Eficiência Estática (Static Efficiency) – $\eta_{INV}$ .....	84
3.8.1.1.7 Eficiência Européia (Euro Efficiency) – $\eta_{EURO}$ .....	85
3.8.1.1.8 Comportamento em sobrecarga .....	86
3.8.1.1.9 Registro de dados operacionais .....	86
3.8.1.1.10 Outras Características dos Inversores Grid-Tie.....	87
3.8.2 Painel fotovoltaico para sistemas On-Grid.....	88
3.8.2.1 Caixas de junção.....	89
3.8.2.2 Configurações e conceitos .....	90
3.8.2.2.1 Sistemas com inversor central .....	90
3.8.2.2.1.1 Sistema com baixa tensão de entrada (<120 VCC) .....	90
3.8.2.2.1.2 Sistemas com Alta Tensão de Entrada (>120 VCC) .....	91
3.8.2.2.1.3 Sistema Mestre-Escravo (Master-Slave) .....	91
3.8.2.2.2 Sistemas de grupos de módulos.....	92
3.8.2.2.3 Sistemas com módulos CA.....	93
<b>3.9 Sistemas fotovoltaicos autônomos .....</b>	<b>94</b>
3.9.1 Painel fotovoltaico.....	95
3.9.2 Banco de baterias.....	95
3.9.2.1 Funções do banco de baterias .....	96
3.9.2.2 Baterias para sistemas fotovoltaicos.....	97
3.9.2.2.1 Constituição e funcionamento de uma Bateria de Chumbo Ácido.....	97
3.9.2.2.2 Tipos de baterias de Chumbo-Ácido .....	100
3.9.2.3 Desempenho e Características das Baterias de Chumbo-Ácido .....	104
3.9.2.4 Efeitos do envelhecimento nas baterias.....	106
3.9.2.5 Cuidados com baterias estacionárias .....	107
3.9.3 Controlador/regulador de cargas .....	108
3.9.3.1 Formas de controle de carga.....	109
3.9.3.1.1 Controladores Série .....	109
3.9.3.1.2 Controladores Shunt .....	110
3.9.3.1.3 Controladores com MPPT .....	110

3.9.3.2 Critérios de seleção de um controlador .....	111
3.9.4 Inversores autônomos .....	112
3.9.4.1 Características dos inversores autônomos .....	112
3.9.4.2 Critérios de Seleção de Inversor Autônomo.....	114
<b>4 LEVANTAMENTOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>116</b>
<b>4.1 Preço, como e onde comprar .....</b>	<b>116</b>
4.1.1 Qual é o preço das placas solares hoje?.....	116
4.1.2 Preço da placa solar em 2018 = U\$ por Watt.....	116
4.1.3 O preço da placa solar varia de acordo com a quantidade, fabricante e local .....	116
4.1.4 O preço da placa solar para consumidores finais .....	116
4.1.5 O preço da placa solar varia de acordo com a sua eficiência .....	117
4.1.6 Onde comprar placas solares .....	117
<b>4.2 Economia de energia com usina solar fotovoltaica pode chegar a 12% .....</b>	<b>117</b>
<b>4.3 Iniciativas estrangeiras.....</b>	<b>118</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>119</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>120</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um bem de consumo superimportante nos dias de hoje, quase que essencial. Ela garante conforto, praticidade, acesso à tecnologia e informação e suporte para viver o dia a dia com dignidade. Sem ela o ser humano ficaria à margem do progresso e voltaria a viver como nos tempos das cavernas. Baseado nisso cabe a nós garantir que este produto não venha a faltar nunca, criando meios de criá-la e distribuí-la a todos os seus consumidores.

Em tempos de tecnologia avançada, globalização, capitalismo e preocupação com o meio ambiente, torna-se crucial acharmos meios de evoluirmos como raça humana sem colocar em risco nossa sobrevivência. Atrelando-se isso à questão energética percebemos que devemos sempre procurar meios de suprir nossas necessidades gastando o mínimo possível e sem prejudicar o meio ambiente.

Nesta direção surgem diversas opções conhecidas pelo homem até os dias de hoje, sendo as principais: energia hidráulica, energia fóssil, energia solar, energia de biomassa, energia eólica, energia nuclear, energia geotérmica e energia maremotriz.

É complicado dizer que uma é mais vantajosa que outra porque em cada caso específico uma pode se sobressair e se tornar mais viável que outra, dependendo da localidade e da existência da matéria prima em abundância. Porém de um modo geral podemos classificar umas melhores que outras se levarmos em conta alguns parâmetros como a questão se a energia é renovável, se não causa danos ao meio ambiente e custo na implantação do sistema de captação.

Tendo estes parâmetros podemos classificar a energia solar como uma fonte de energia das mais compensatórias, pois sua fonte é a energia solar que incide a todo momento sobre o solo da Terra sem cobrar nada por isso e sem pedir permissão, seu custo de instalação que é devido à compra das células fotovoltaicas (equipamento que transforma a energia solar em energia elétrica) é compensada pela economia das futuras contas de energia e devido ao tempo de duração de uma placa fotovoltaica, tendo o dinheiro para fazer a aplicação, torna-se um investimento e ainda contribui para o bem do meio ambiente.

Este trabalho apresenta ainda o funcionamento de uma usina de energia solar através do princípio da célula fotovoltaica que transforma energia solar em energia elétrica, uma breve comparação deste sistema de energia com os outros mais comuns e utilizados, sua instalação e opções de placa através do material que a compõe, o custo de cada uma, suas vantagens e desvantagens.

Ao final propor uma análise das vantagens de se optar por este tipo de geração de energia levando em conta as questões ambientais.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Abaixo segue referencial teórico abordando o panorama geral de geração de energia elétrica no mundo, a parcela de cada fonte de energia na formação do conjunto, importância de cada uma e explicação sucinta do funcionamento das mesmas. Apresentação da energia solar, funcionamento básico e potencial energético brasileiro.

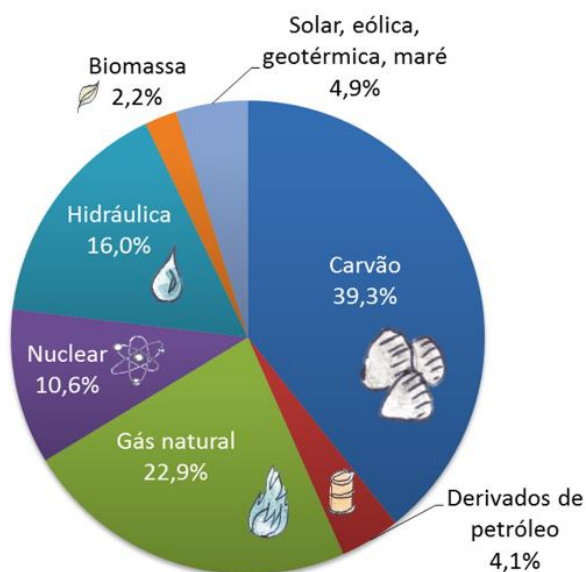
### 2.1 Panorama energético mundial

“As fontes de energia renováveis, são aquelas em que a sua utilização e uso é renovável e pode-se manter e ser aproveitado ao longo do tempo sem possibilidade de esgotamento dessa mesma fonte, exemplos deste tipo de fonte são a energia eólica e solar.” (PORTAL ENERGIA, 2015).

“Por outro lado, as fontes de energias não renováveis têm recursos teoricamente limitados, sendo que esse limite depende dos recursos existentes no nosso planeta, como é o exemplo dos combustíveis fósseis.” (PORTAL ENERGIA, 2015).

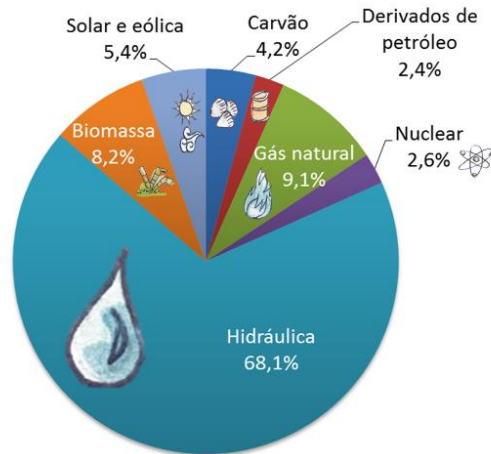
Muitas pessoas confundem a matriz energética com a matriz elétrica, mas elas são diferentes. Enquanto a matriz energética representa o conjunto de fontes de energia disponíveis para movimentar os carros, preparar a comida no fogão e gerar eletricidade, a matriz elétrica é formada pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica. Dessa forma, podemos concluir que a matriz elétrica é parte da matriz energética. (EPE, 2016).

Figura 01: Matriz elétrica mundial 2015



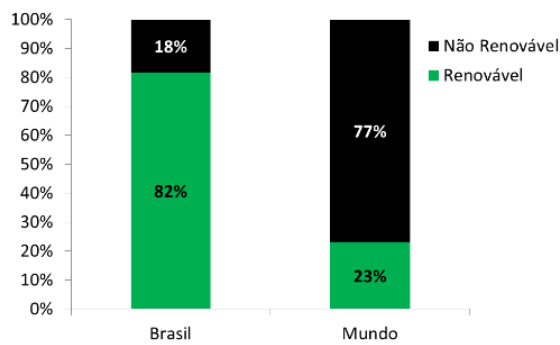
Fonte: (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016).

Figura 02: Matriz elétrica brasileira 2016



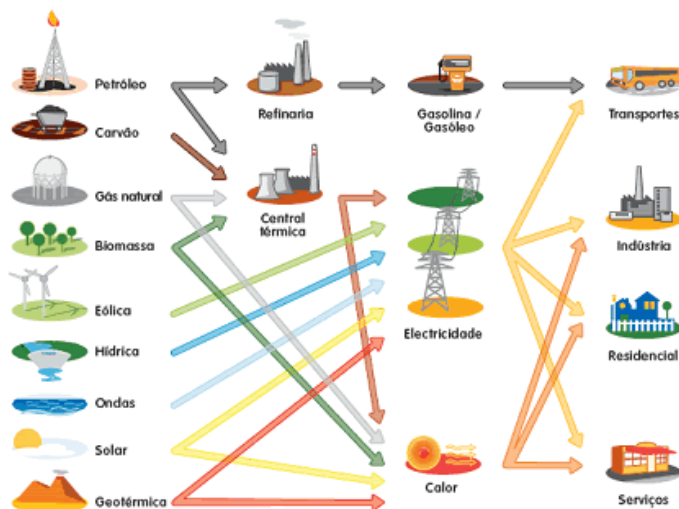
Fonte: (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016).

Figura 03: Comparativo da utilização de fontes renováveis e não renováveis para a geração de energia elétrica no Brasil e no mundo



Fonte: (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016).

Figura 04: Ciclo de algumas fontes de energia renováveis e não renováveis



Fonte: (PORTAL ENERGIA, 2015).

## 2.2 Energias não-renováveis

De acordo com Miranda (2009), fontes de energia não-renováveis são limitadas e demoram milhões de anos para se formar, isto é, se esgotarão e não serão repostas. Por exemplo: o petróleo, o gás natural, o carvão mineral e o urânio.

### 2.2.1 Energia elétrica através do petróleo

A principal fonte de energia existente hoje é o petróleo, mas além de não ser renovável, e ser um dos principais responsáveis pelo efeito estufa o petróleo ainda será motivo de muitas guerras e conflitos entre os países, principalmente aqueles países que dependem muito dessa fonte energética como os Estados Unidos. Diversas nações do mundo inteiro estão investindo muito dinheiro em projetos que utilizam as fontes de energia alternativa como a energia solar, a energia eólica, a energia geotérmica, o biodiesel, a energia obtida através do hidrogênio, a energia das marés, o etanol e a biomassa. Essas fontes de energia alternativas citadas são as mais abordadas em projeto para uma menor contribuição para o aquecimento da Terra e também para tentar alcançar cada vez mais uma independência com relação ao petróleo. (PORTAL ENERGIA, 2015).

A geração de energia elétrica a partir de derivados de petróleo ocorre por meio da queima desses combustíveis em caldeiras, turbinas e motores de combustão interna. O caso das caldeiras e turbinas é similar ao dos demais processos térmicos de geração e mais usado no atendimento de cargas de ponta e/ou aproveitamento de resíduos do refino de petróleo. Os grupos geradores a diesel são mais adequados ao suprimento de comunidades e de sistemas isolados da rede elétrica convencional. Com exceção de alguns poucos países da OCDE, o uso de petróleo para geração de eletricidade tem sido decrescente desde os anos 1970. O obsolescimento das plantas de geração, os requerimentos de proteção ambiental e o aumento da competitividade de fontes alternativas são os principais responsáveis por isso. Contudo, o petróleo continua sendo muito importante na geração de energia elétrica nesses países, principalmente no suprimento de cargas de pico e no atendimento a sistemas isolados. (ANEEL, 2003).

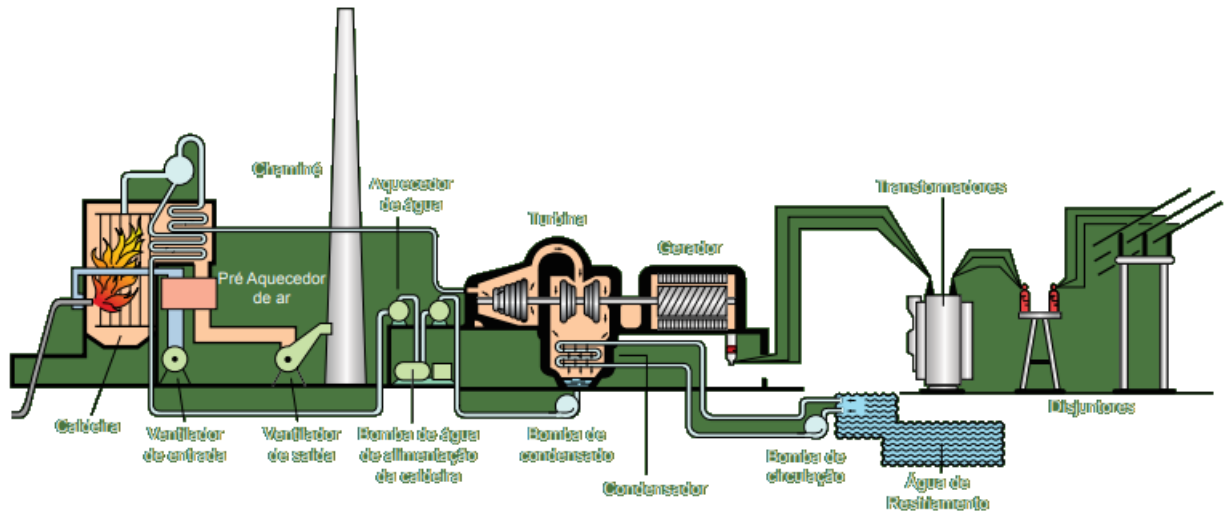
“Em 2001 a participação relativa do petróleo na geração de eletricidade situou-se em torno de 7,5%, segundo a Agência Internacional de Energia (2003).” (ANEEL, 2003).

Quadro 01: Capacidade instalada das plantas termelétricas a derivados de petróleo e parcela da geração de eletricidade nos países da OCDE

País	Energia Gerada (TWh)	Parcela da Geração Mundial (2001)
Estados Unidos	134	11%
Japão	117	10%
México	93	8%
Arábia Saudita	87	7%
Itália	75	6%
China	47	4%
Outros países	615	53%
Mundo	1168	100%

Fonte: (ANEEL, 2003).

Figura 05: Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica através do petróleo

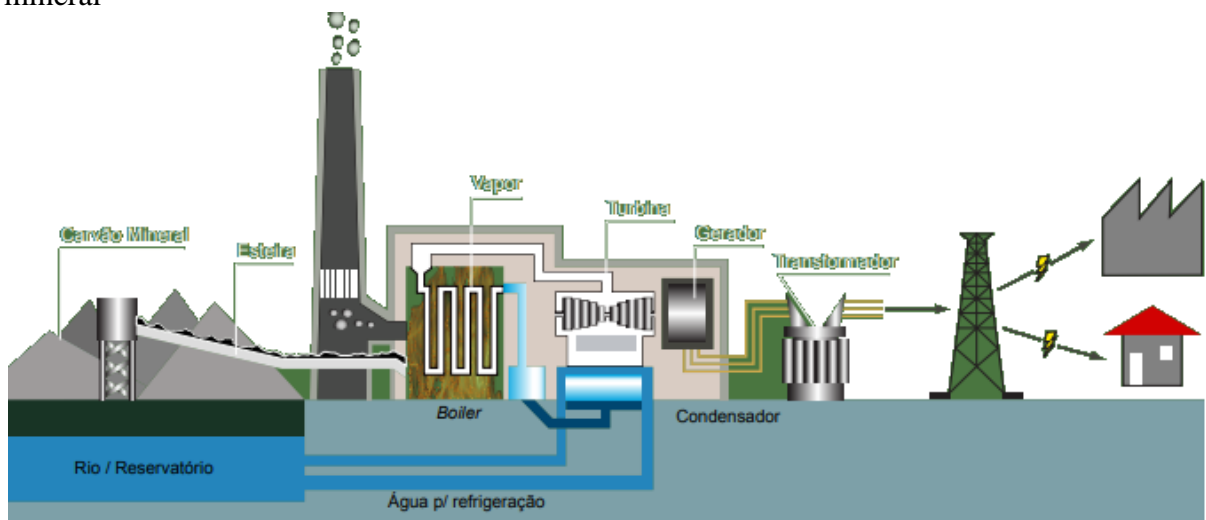


Fonte: (ANEEL, 2008).

### 2.2.2 Energia elétrica através do carvão mineral

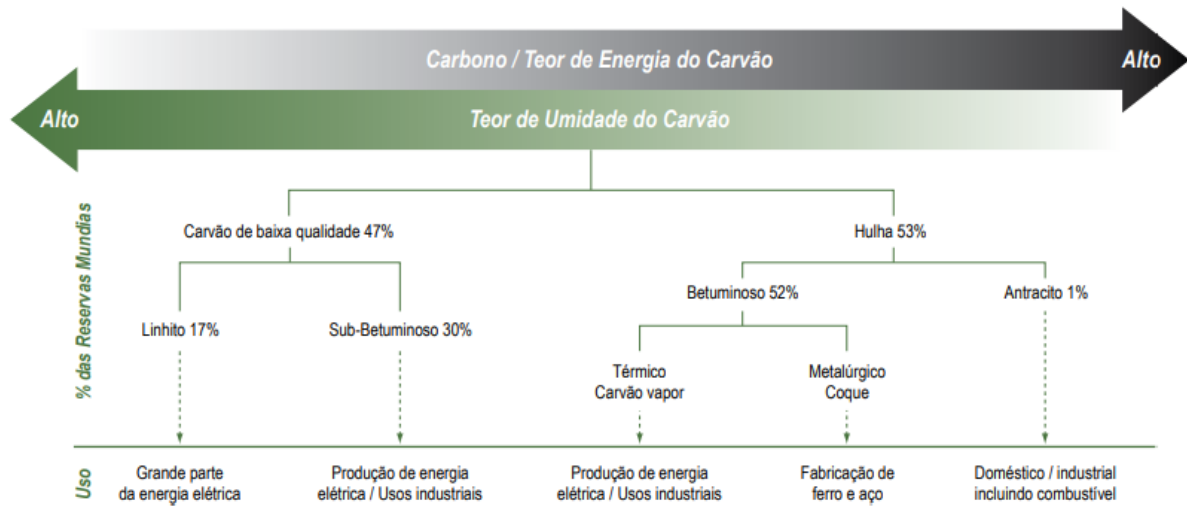
O carvão é uma complexa e variada mistura de componentes orgânicos sólidos, fossilizados ao longo de milhões de anos, como ocorre com todos os combustíveis fósseis. Sua qualidade, determinada pelo conteúdo de carbono, varia de acordo com o tipo e o estágio dos componentes orgânicos. A turfa, de baixo conteúdo carbonífero, constitui um dos primeiros estágios do carvão, com teor de carbono na ordem de 45%; o linhito apresenta um índice que varia de 60% a 75%; o carvão betuminoso (hulha), mais utilizado como combustível, contém de 75% a 85% de carbono; e o mais puro dos carvões, o antracito, apresenta um conteúdo carbonífero superior a 90%. (MIRANDA, 2009).

Figura 06: Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do carvão mineral



Fonte: (ANEEL, 2008)

Figura 07: Tipos de carvão, reservas e usos



Fonte: (WCI, 2006).

Quadro 02: Geração de energia elétrica a partir do carvão no mundo em 2006

Carvão Mineral	TWh
China	2.301
Estados Unidos	2.128
Índia	508
Alemanha	302
Japão	299
África do Sul	236
Austrália	199
Rússia	179
Coréia do Sul	153
Reino Unido	152
Outros Países	1.298
Mundo	7.755

Fonte: (IEA, 2008).

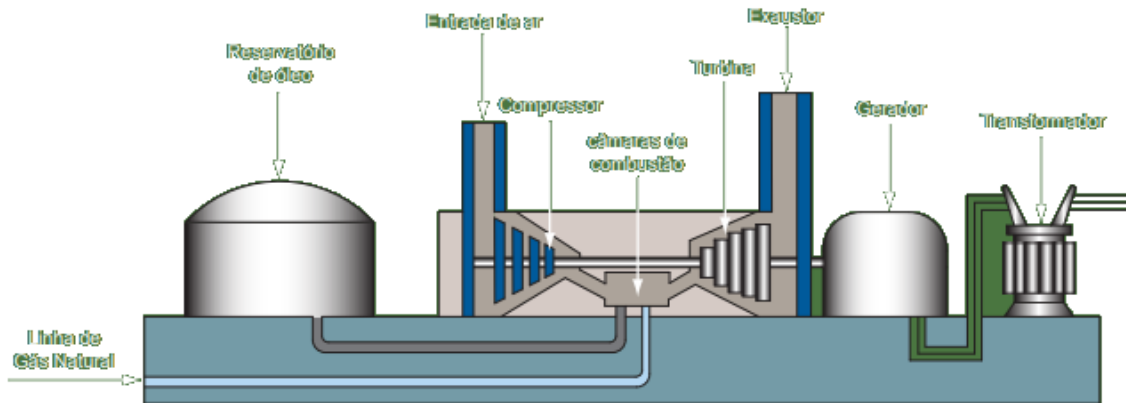
O carvão é uma das formas de produção de energia mais agressivas ao meio ambiente. Ainda que sua extração e posterior utilização na produção de energia gere benefícios econômicos (como empregos diretos e indiretos, aumento da demanda por bens e serviços na região e aumento da arrecadação tributária), o processo de produção, da extração até a combustão, provoca significativos impactos socioambientais. (ANEEL, 2008, p. 140).

### 2.2.3 Energia elétrica através do gás natural

O gás natural nada mais é do que a mistura de hidrocarbonetos leves na forma gasosa, tais como o metano, etano, propano, butano e outros. Suas reservas encontram-se

quase sempre disponibilizadas nas áreas onde se extrai o petróleo, passando pelo mesmo processo de constituição. No entanto, ao contrário do petróleo e do carvão mineral, o gás natural é menos poluente, embora a sua combustão ainda sim apresente alguns níveis de poluição que causam danos à atmosfera. (PENA, 2008).

Figura 08: Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do gás natural



Fonte: (ANEEL, 2008)

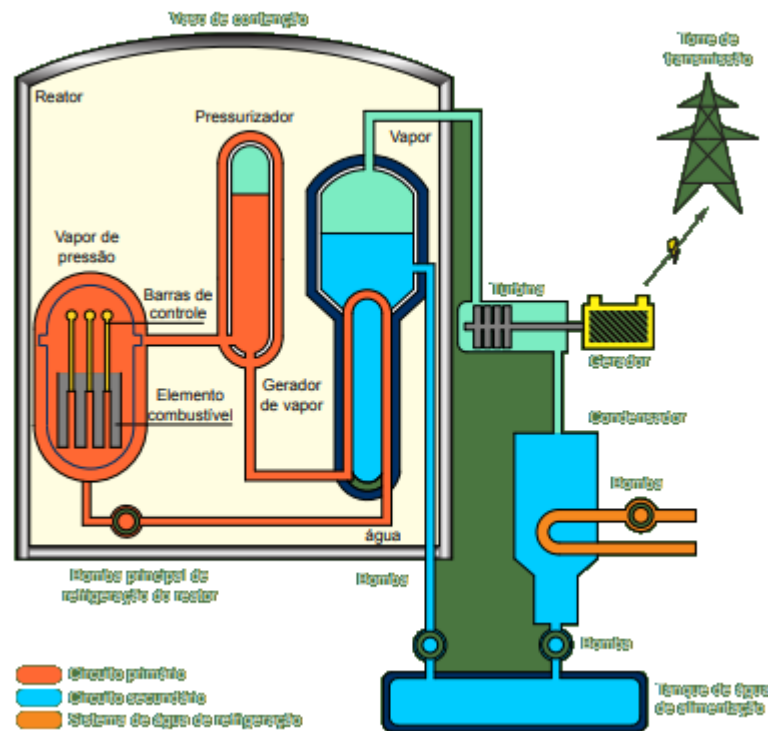
O gás natural é muito utilizado em usinas termoeletricas, sendo considerado como uma fonte mais vantajosa por apresentar menor impacto ambiental, maior facilidade de transporte, além de uma necessidade quase nula de armazenamento. É também utilizado como fonte de energia em indústrias, residências (gás de cozinha) e também em alguns tipos de veículos com adaptação para esse tipo de combustível. (PENA, 2008).

#### 2.2.4 Energia elétrica através da energia nuclear

A energia nuclear é obtida a partir do processo de fissão nuclear de átomos de urânio, que é considerado uma fonte esgotável de energia. Quando ocorre a fissão do núcleo desse material, libera-se uma grande quantidade de energia, que é utilizada para a produção, principalmente, de eletricidade. Trata-se de um recurso energético estratégico, principalmente para países ou regiões que apresentam um baixo potencial hidrelétrico, além de ser menos dependente de outras fontes de energia. As energias nucleares contam com reservas maiores, utilizam menores áreas e não emitem poluentes gasosos na atmosfera. Por outro lado, existem muitas críticas direcionadas à energia nuclear em razão de suas desvantagens, a saber: a destinação nem sempre eficaz do lixo atômico (radioativo e muito perigoso) das usinas nucleares, os elevados custos de produção, os altos riscos ambientais e sociais em casos de acidentes e também o fato de essa ser a mesma tecnologia utilizada para a fabricação de armamentos nucleares. (PENA, 2008).

“Em 2007, Angra I e Angra II responderam por 2,5% da produção total de energia elétrica no país, que foi de 12,3 terawatts-hora (TWh).” (ANEEL, 2008, p. 126).

Figura 09: Perfil esquemático de uma usina nuclear



Fonte: (ANEEL, 2008)

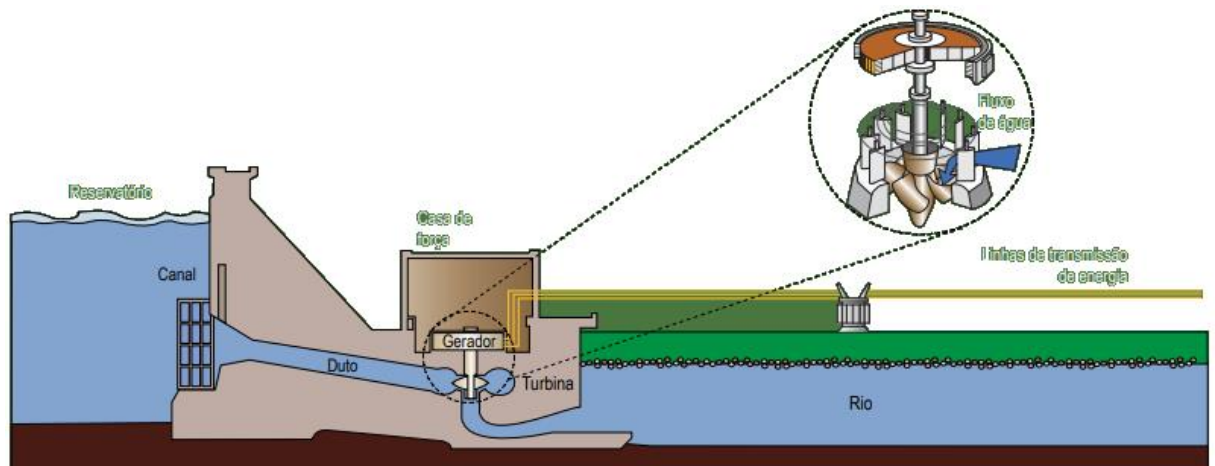
## 2.3 Energias renováveis

Renováveis são aquelas que continuam disponíveis depois de utilizadas, isto é, que não se esgotam. Como exemplo, temos a energia solar, a energia dos vegetais (biomassa), da correnteza dos rios (hidráulica), dos ventos (eólica), do calor interno do planeta Terra (geotérmica), das marés, entre outras. (MIRANDA, 2009).

### 2.3.1 Energia hidráulica

A geração de energia hidrelétrica é realizada em barragens, dentro das quais se encontram geradores, cujas hélices são movidas pela água que escoá sob forte pressão. A eletricidade produzida pelos geradores é transmitida por cabos até os centros consumidores. Ao contrário das demais fontes renováveis, a hidrelétrica representa uma parcela significativa da matriz energética mundial e possui tecnologias de aproveitamento devidamente consolidadas. Atualmente, é a principal fonte geradora de energia elétrica para diversos países e representa cerca de 17% de toda a eletricidade gerada no mundo. A produção da energia elétrica não é poluente, mas a construção de usinas pode causar profundos impactos sociais e ambientais na região. Como exemplo, temos a inundação de grandes áreas, o deslocamento de comunidades ribeirinhas, a mudança de curso de rios, etc. (MIRANDA, 2009).

Figura 10: Perfil esquemático de usina hidrelétrica



Fonte: (ANEEL, 2008)

Quadro 03: Maiores consumidores de energia hidrelétrica (2006 e 2007) em TWh

	País	2006	2007	Variação	Participação
1ª	China	435,8	482,9	10,8%	15,4%
2ª	Brasil	348,8	371,5	6,5%	11,9%
3ª	Canadá	355,4	368,2	3,6%	11,7%
4ª	Estados Unidos	292,2	250,8	-14,2%	8,0%
5ª	Rússia	175,2	179,0	2,2%	5,7%
6ª	Noruega	119,8	135,3	12,9%	4,3%
7ª	Índia	112,4	122,4	8,9%	3,9%
8ª	Venezuela	82,3	83,9	1,9%	2,7%
9ª	Japão	96,5	83,6	-13,4%	2,7%
10ª	Suécia	61,7	66,2	7,3%	2,1%

Fonte: (BP, 2008).

Quadro 04: Participação da hidroeletricidade na produção total de energia elétrica em 2006

	País	%
1ª	Noruega	98,5
2ª	Brasil	83,2
3ª	Venezuela	72,0
4ª	Canadá	58,0
5ª	Suécia	43,1
6ª	Rússia	17,6
7ª	Índia	15,3
8ª	China	15,2
9ª	Japão	8,7
10ª	Estados Unidos	7,4
	Outros países	14,3
	Mundo	16,4

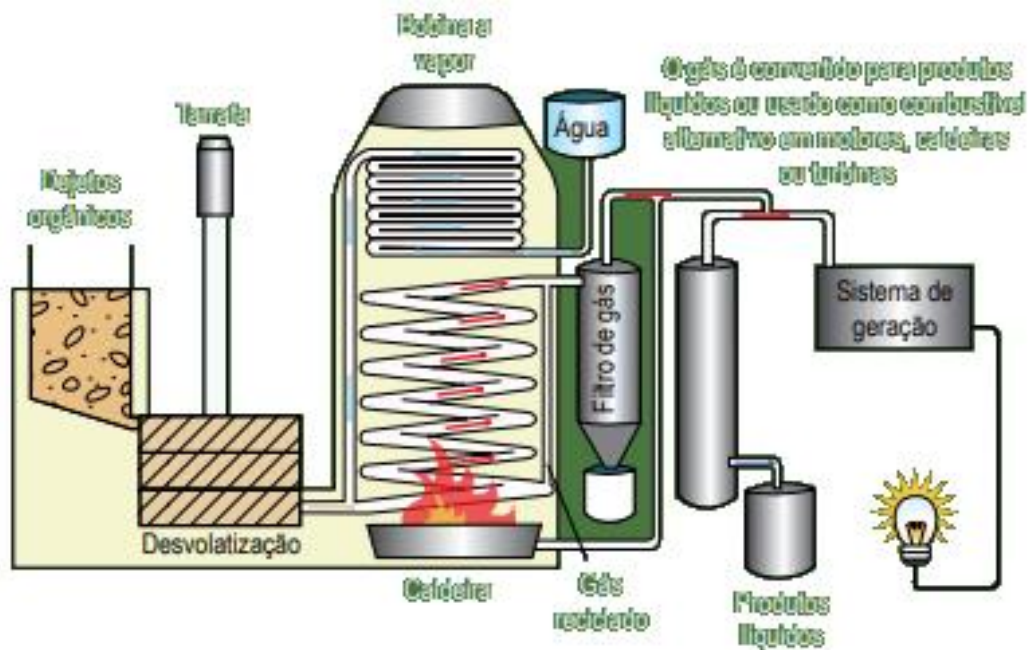
Fonte: (IEA, 2008).



### 2.3.2 Biomassa

Qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica é classificada como biomassa. De acordo com a sua origem, pode ser: florestal (madeira, principalmente), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos, como o lixo). Os derivados obtidos dependem tanto da matéria-prima utilizada (cujo potencial energético varia de tipo para tipo) quanto da tecnologia de processamento para obtenção dos energéticos. (ANEEL, 2008, p. 67).

Figura 11: Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do biogás



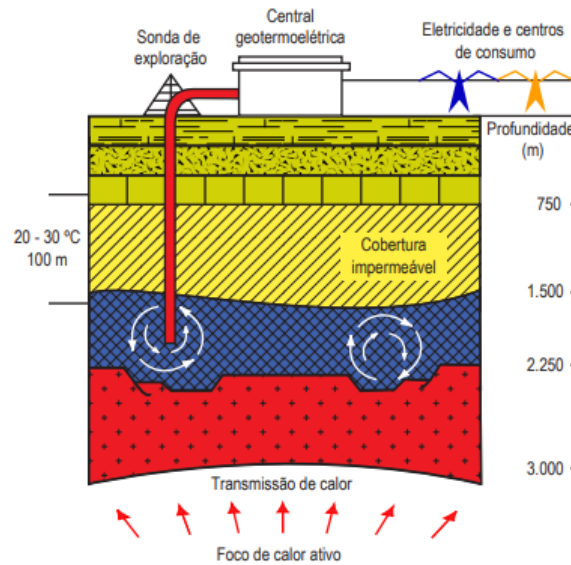
Fonte: (ANEEL, 2008).

### 2.3.3 Energia geotérmica

A energia geotérmica é aquela obtida pelo calor que existe no interior da Terra. Neste caso, os principais recursos são os gêiseres (fontes de vapor no interior da Terra que apresentam erupções periódicas) e, em localidades onde eles não estão presentes, o calor existente no interior das rochas para o aquecimento da água. A partir desta água aquecida é produzido o vapor utilizado em usinas termelétricas, como ilustrado pela figura a seguir. Outra possibilidade é a utilização de vapor quente seco para movimentar as turbinas. Esta última tecnologia é pouco aplicada, mas pode ser encontrada na Itália e no México. (ANEEL, 2008, p. 87).

Embora conhecida desde 1904 – ano da construção da primeira usina, logo depois destruída por um acidente –, a evolução deste segmento foi lenta e se caracterizou pela construção de pequeno número de unidades em poucos países. No Brasil, por exemplo, não há nenhuma unidade em operação, nem sob a forma experimental. O porte dos empreendimentos atuais, porém, é significativo. A potência instalada no campo de gêiseres da Califórnia é de 500 MW. (ANEEL, 2008, p. 87).

Figura 12: Reservatório geotérmico de alta temperatura



Fonte: (ANEEL, 2008).

Quadro 05: Capacidade geotérmica mundial instalada (2007)

País	Potência (MW)	% em relação ao total
Estados Unidos	2.936,5	30,2
Filipinas	1.978,0	20,3
México	959,5	9,9
Itália	810,5	8,3
Indonésia	807,0	8,3
Japão	537,3	5,5
Islândia	456,0	4,7
Nova Zelândia	434,0	4,5
El Salvador	204,0	2,1
Costa Rica	162,5	1,7
Quênia	127,0	1,3
<b>Total</b>	<b>9.720,4</b>	<b>100,0</b>

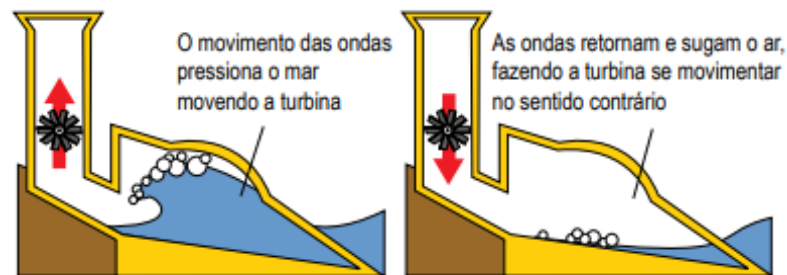
Fonte: (BP, 2008).

### 2.3.4 Energia das marés

O potencial de geração de energia elétrica a partir do mar inclui o aproveitamento das marés, correntes marítimas, ondas, energia térmica e gradientes de salinidade, segundo o estudo sobre Fontes Alternativas inserido no Plano Nacional de Energia 2030. A eletricidade pode ser obtida a partir da energia cinética (do movimento) produzida pelo movimento das águas ou pela energia derivada da diferença do nível do mar entre as marés alta e baixa. (ANEEL, 2008, p. 88).

Ainda segundo o estudo, produzido em 2008, todas as tecnologias estão em fase de desenvolvimento, com exceção do aproveitamento da energia potencial em usina maremotriz (contida no movimento das águas). Nenhuma, portanto, apresenta custos competitivos frente às demais fontes. Um dos países que se destaca nestas pesquisas é Portugal, que tem diversos projetos pilotos. (ANEEL, 2008, p. 88).

Figura 13: Geração de energia em usina maremotriz



Fonte: (ANEEL, 2008).

### 2.3.5 Energia eólica

A capacidade instalada mundial da energia eólica aumentou 1.155% entre 1997 e 2007, passando de 7,5 mil para 93,8 mil MW, como registra a World Wind Energy Association (WWEA) na tabela abaixo. Além disso, o ano de 2007 foi, também, o mais ativo da história da produção de energia elétrica a partir do movimento dos ventos, que teve início no final do século XIX. A expectativa, que se confirmou, era que a tendência se mantivesse em 2008. (ANEEL, 2008, p. 79).

Quadro 06: Potência instalada em dez anos (MW)

	Potência (MW)	Crescimento (%)
1997	7.475	-
1998	9.663	29,3
1999	13.696	41,7
2000	18.039	31,7
2001	24.320	34,8
2002	31.164	28,1
2003	39.290	26,1
2004	47.693	21,4
2005	59.033	23,8
2006	74.153	25,6
2007	93.849	26,6
<b>Crescimento total</b>		<b>1.155,5</b>

Fonte: (WWEA, 2008).

Os grandes argumentos favoráveis à fonte eólica são, além da renovabilidade, perenidade, grande disponibilidade, independência de importações e custo zero para obtenção de suprimento (ao contrário do que ocorre com as fontes fósseis). O principal argumento contrário é o custo que, embora seja decrescente, ainda é elevado na comparação com outras fontes. Apenas como exemplo, em 2008, no Brasil, considerando-se também os impostos embutidos, era de cerca de R\$ 230,00 por MWh,

enquanto o custo da energia hidrelétrica estava em torno dos R\$ 100,00 por MWh. (ANEEL, 2008, p. 80).

Quadro 07: Potência instalada em 2007

	País	Potência (MW)	% em relação ao total
1ª	Alemanha	22.247,40	23,7
2ª	Estados Unidos	16.818,80	17,9
3ª	Espanha	15.145,10	16,1
4ª	Índia	7.850,00	8,4
5ª	China	5.912,00	6,3
6ª	Dinamarca	3.125,00	3,3
7ª	Itália	2.726,10	2,9
8ª	França	2.455,00	2,6
9ª	Reino Unido	2.389,00	2,5
10ª	Portugal	2.130,00	2,3
25ª	Brasil	247,10	0,3
	<b>Total</b>	<b>93.849,10</b>	<b>100,0</b>

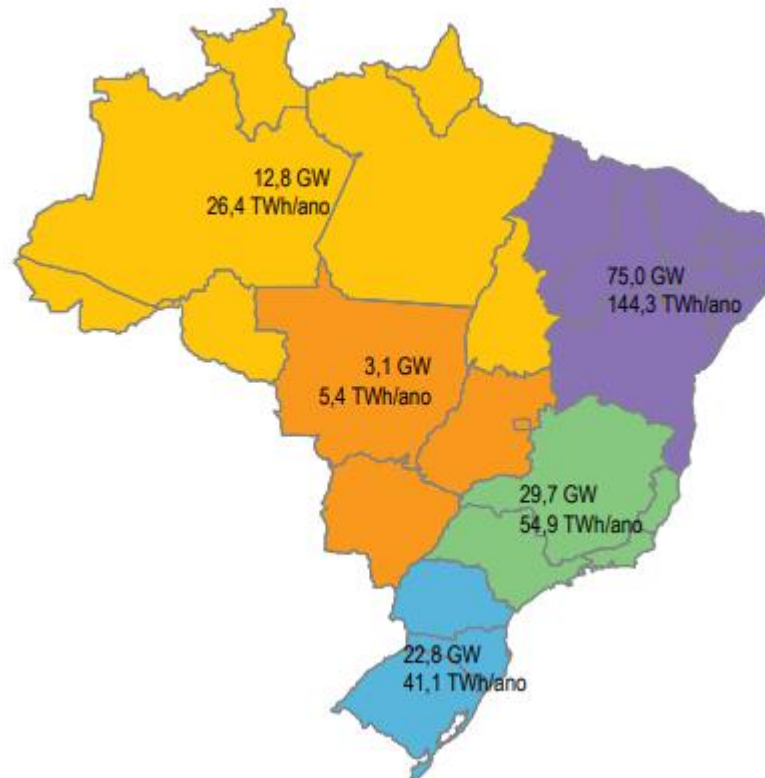
Fonte: (WWEA, 2008).

Figura 14: Aerogeradores



Fonte: Eletrobrás

Figura 15: Potencial eólico brasileiro



Fonte: (EPE, 2007).

### 2.3.6 Energia solar

O que tradicionalmente é mais generalizado é o uso da energia solar para obtenção de energia térmica. Esta aplicação destina-se a atender setores diversos, que vão da indústria, em processos que requerem temperaturas elevadas (por exemplo, secagem de grãos na agricultura) ao residencial, para aquecimento de água. (ANEEL, 2008, p. 83).

A energia solar chega à Terra nas formas térmica e luminosa. Segundo o estudo sobre Outras Fontes constante do Plano Nacional de Energia 2030, produzido pela Empresa de Pesquisa Energética, sua irradiação por ano na superfície da Terra é suficiente para atender milhares de vezes o consumo anual de energia do mundo. Essa radiação, porém, não atinge de maneira uniforme toda a crosta terrestre. Depende da latitude, da estação do ano e de condições atmosféricas como nebulosidade e umidade relativa do ar. (ANEEL, 2008, p. 83).

Ao passar pela atmosfera terrestre, a maior parte da energia solar manifesta-se sob a forma de luz visível de raios infravermelhos e de raios ultravioleta. É possível captar essa luz e transformá-la em alguma forma de energia utilizada pelo homem: térmica ou elétrica. São os equipamentos utilizados nessa captação que determinam qual será o tipo de energia a ser obtida. (ANEEL, 2008, p. 84).

Se for utilizada uma superfície escura para a captação, a energia solar será transformada em calor. Se utilizadas células fotovoltaicas (painéis fotovoltaicos), o resultado será a eletricidade. Os equipamentos necessários à produção do calor são chamados de coletores e concentradores – pois, além de coletar, às vezes é necessário

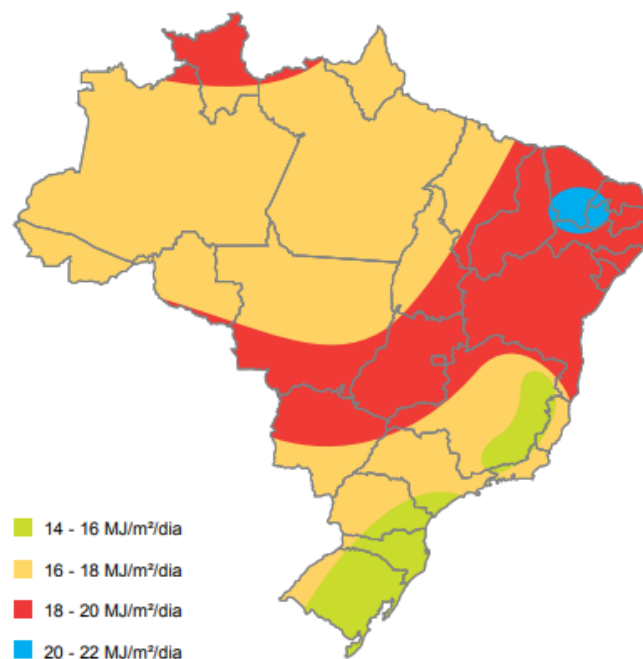
concentrar a radiação em um só ponto. Este é o princípio de muitos aquecedores solares de água. (ANEEL, 2008, p. 84).

Para a produção de energia elétrica existem dois sistemas: o heliotérmico e o fotovoltaico. No primeiro, a irradiação solar é convertida em calor que é utilizado em usinas termelétricas para a produção de eletricidade. O processo completo compreende quatro fases: coleta da irradiação, conversão em calor, transporte e armazenamento e, finalmente, conversão em eletricidade. Para o aproveitamento da energia heliotérmica é necessário um local com alta incidência de irradiação solar direta, o que implica em pouca intensidade de nuvens e baixos índices pluviométricos, como ocorre no semi-árido brasileiro. (ANEEL, 2008, p. 84).

Já no sistema fotovoltaico, a transformação da radiação solar em eletricidade é direta. Para tanto, é necessário adaptar um material semicondutor (geralmente o silício) para que, na medida em que é estimulado pela radiação, permita o fluxo eletrônico (partículas positivas e negativas). Segundo o Plano Nacional 2030, todas as células fotovoltaicas têm, pelo menos, duas camadas de semicondutores: uma positivamente carregada e outra negativamente carregada, formando uma junção eletrônica. Quando a luz do sol atinge o semicondutor na região dessa junção, o campo elétrico existente permite o estabelecimento do fluxo eletrônico, antes bloqueado, e dá início ao fluxo de energia na forma de corrente contínua. Quanto maior a intensidade de luz, maior o fluxo de energia elétrica. Um sistema fotovoltaico não precisa do brilho do sol para operar. Ele também pode gerar eletricidade em dias nublados. (ANEEL, 2008, p. 84).

Assim como ocorre com os ventos, o Brasil é privilegiado em termos de radiação solar. O Plano Nacional de Energia 2030 reproduz dados do Atlas Solarimétrico do Brasil e registra que essa radiação varia de 8 a 22 MJ (megajoules) por metro quadrado ( $m^2$ ) durante o dia, sendo que as menores variações ocorrem nos meses de maio a julho, variando de 8 a 18 MJ/ $m^2$ . Além disso, complementa o estudo, o Nordeste possui radiação comparável às melhores regiões do mundo nessa variável, como a cidade de Dongola, no deserto do Sudão, e a região de Dagget, no Deserto de Mojave, Califórnia. O que, porém, não ocorre com outras localidades mais distantes da linha do Equador, como as regiões Sul e Sudeste, onde está concentrada a maior parte da atividade econômica. (ANEEL, 2008, p. 85).

Figura 16: Variação da radiação solar no Brasil



Fonte: (EPE, 2007).

### 3 METODOLOGIA E FUNCIONAMENTO

Abordamos aqui o funcionamento de um sistema fotovoltaico de geração de energia de forma completa. Começamos com o princípio físico básico, depois vamos para as partes que o compõem, a forma de instalação do sistema, a preparação para o uso e maneiras de se armazenar a energia.

#### 3.1 Panorama da energia solar

Em BLUESOL (2008, p. 11) vemos que o desenvolvimento da sociedade humana está atrelado à transformação do meio ambiente e obtenção de energia. Durante o desenvolvimento da nossa sociedade ficou evidente a carência de energia em todos possíveis locais da convivência humana, e nas últimas décadas temos visto o apelo de várias vozes que nos mostram o iminente do fim dos combustíveis fósseis, o imenso impacto ambiental causado por essas fontes de energia e a insustentabilidade do modo como obtemos a energia que nos move. Enquanto isso, em muitas frentes, temos o desenvolvimento de novas formas de geração de energia e recentemente tivemos o reconhecimento das fontes renováveis, não mais como fontes de energia alternativa, mas como fontes de energia primárias, cujas principais representantes são:

- Energia Hidrelétrica;
- Biomassa
- Energia Eólica
- Energia Solar

Todas as formas de energia que conhecemos derivam da energia solar. É a energia do sol que altera o estado físico da água, fazendo com que essa migre e possa ser represada e aproveitada nas usinas hidrelétricas. O aquecimento das massas de ar provoca os ventos, que são aproveitados nos aerogeradores dos parques eólicos. É a energia solar, absorvida na fotossíntese, que dá vida às plantas utilizadas como fonte de energia de biomassa. Até mesmo o petróleo, que vem de restos de vegetação e animais pré-históricos, também é derivado do sol, pois este deu a energia necessária ao aparecimento da vida na terra em eras passadas. Podemos, através desse ponto de vista, considerar que todas as formas de energia são renováveis, infelizmente não em escala humana. As formas de energia renovável citadas acima são as que se renovam a cada dia, permitindo um desenvolvimento sustentável da vida e sociedade humana. A energia solar que chega à Terra e um ano é muito maior que o consumo humano de

energia no mesmo período. Infelizmente todo esse potencial não é aproveitado. O aproveitamento artificial da energia solar pode ser feito de três modos:

- Arquitetura Bioclimática
- Efeito Fototérmico
- Efeito Fotovoltaico

Ainda em BLUESOL (2008, p. 12) o efeito fotovoltaico, observado por Edmond Bequerel em 1839, consiste no aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de um semicondutor, quando esse absorve a luz visível.

São incontestáveis as vantagens da energia solar fotovoltaica:

- A matéria prima é inesgotável
- Não há emissão de poluentes durante a geração da eletricidade
- Os sistemas podem ser instalados em todo o globo.

Infelizmente a energia solar fotovoltaica tem suas deficiências:

- A densidade (o fluxo de potencial que chega à superfície terrestre) é pequeno (<1kW/m<sup>2</sup>), se comparado às fontes fósseis.
- A energia solar disponível em uma localidade varia sazonalmente, além de ser afetada pelas condições climatológicas.
- Os equipamentos de captação e conversão requerem investimentos financeiros iniciais elevados do que os convencionais.

O baixo fluxo de potencial solar requer grande área captadora, para obter maiores potências. A variabilidade da Irradiação Solar implica no uso de sistemas de armazenamento, que são, em geral, pouco eficientes. Já o alto investimento inicial, leva a considerar a viabilidade econômica de um projeto, tendo em conta sua vida útil e todas as vantagens da utilização dessa forma de energia.

### **3.2 Sistemas fotovoltaicos**

Em BLUESOL (2008, p. 14) vemos que um sistema fotovoltaico é uma fonte de potência elétrica, na qual as células fotovoltaicas transformam a Radiação Solar diretamente em energia elétrica.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser implantados em qualquer localidade que tenha radiação solar suficiente. Sistemas fotovoltaicos não utilizam combustíveis, não possuem partes móveis, e por serem dispositivos de estado sólido, requerem menor manutenção. Durante o seu



funcionamento não produzem ruído acústico ou eletromagnético, e tampouco emitem gases tóxicos ou outro tipo de poluição ambiental.

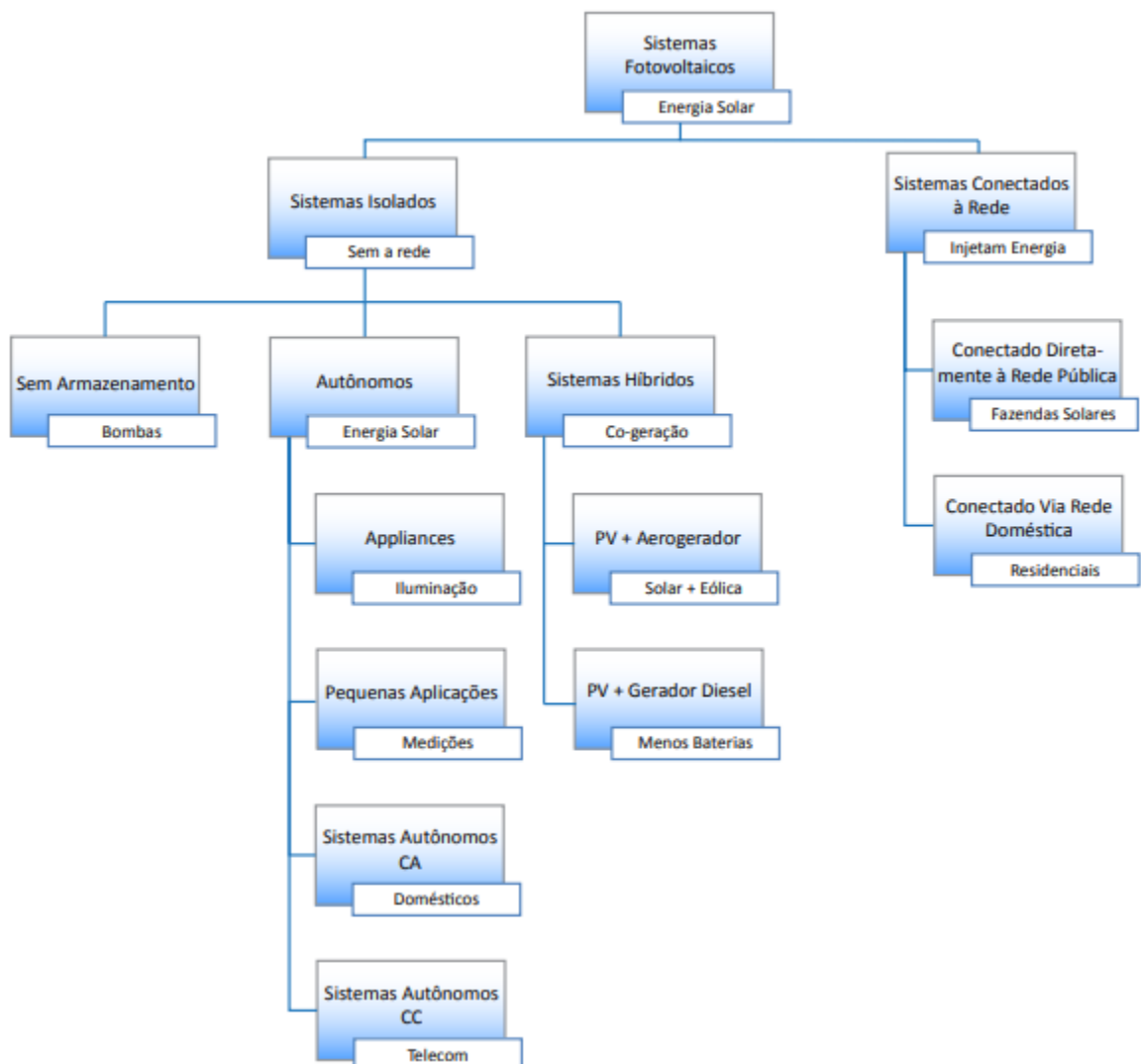
A confiabilidade dos sistemas fotovoltaicos é tão alta, que são utilizados em locais inóspitos como: espaço, desertos, selvas, regiões remotas, etc.

### 3.2.1 Classificação dos sistemas fotovoltaicos

Ainda em BLUESOL (2008, p. 14) vemos que os sistemas fotovoltaicos são classificados de acordo à forma como é feita a geração ou entrega da energia elétrica em:

- Sistemas Isolados
- Sistemas conectados à rede (On-Grid)

Figura 17: Tipos de sistemas fotovoltaicos



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

### 3.2.1.1 Sistemas isolados

Um Sistema Fotovoltaico Isolado é aquele que não tem contato com a rede de distribuição de eletricidade das concessionárias. Os sistemas isolados podem ser classificados em Híbridos ou Autônomos (Puros). Os sistemas autônomos podem ser com, ou sem armazenamento elétrico. (BLUE-SOL, 2008, p. 14 e 15).

#### 3.2.1.1.1 Sistemas híbridos

Em BLUESOL (2008, p. 15) vemos que um sistema fotovoltaico híbrido trabalha em conjunto com outro sistema de geração elétrica, que pode ser um aerogerador (no caso de um sistema híbrido solar-eólico), um moto-gerador a combustível líquido (ex.: diesel), ou qualquer outro sistema de geração elétrica.

Um sistema híbrido pode ou não possuir sistema de armazenamento de energia. Quando possui, geralmente o sistema de armazenamento tem autonomia menor ou igual a um dia.

Figura 18: Sistema híbrido eólico fotovoltaico



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

#### 3.2.1.1.2 Sistemas autônomos (puros)

Um sistema fotovoltaico puro é aquele que não possui outra forma de geração de eletricidade. Devido ao fato de o sistema só gerar eletricidade nas horas de sol, os sistemas autônomos são dotados de acumuladores que armazenam a energia para os períodos sem sol, o que acontece todas as noites, e também nos períodos chuvosos ou nublados. Os acumuladores são dimensionados de acordo à autonomia que o sistema deve ter, e essa varia de acordo às condições climatológicas da localidade onde será implantado o sistema fotovoltaico. (BLUE-SOL, 2008, p. 15).

### 3.2.1.1.3 Sistemas autônomos sem armazenamento

São sistemas que funcionam somente durante as horas de sol. Temos como exemplo os sistemas de bombeamento de água. As características das bombas são calculadas levando em consideração a necessidade água e o potencial solar da localidade. O painel fotovoltaico é dimensionado para fornecer potencial para a bomba. Apesar de, geralmente, não utilizarem sistemas de armazenamento elétrico, o armazenamento energético é feito na forma de água no reservatório. (BLUE-SOL, 2008, p. 15).

Figura 19: Sistema de bombeamento fotovoltaico

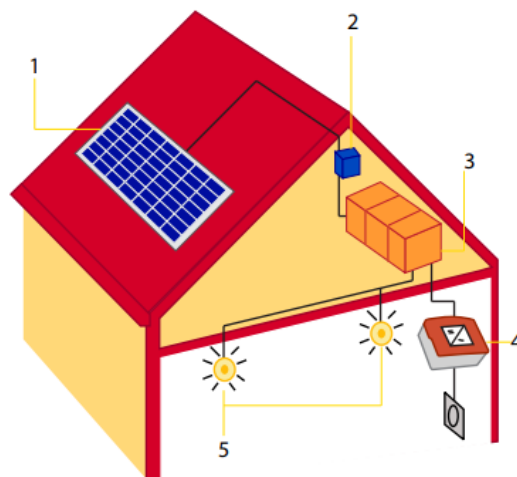


Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

### 3.2.1.2 Componentes de um sistema fotovoltaico autônomo

Um sistema fotovoltaico residencial autônomo, geralmente, possui os seguintes componentes:

Figura 20: Componentes de um sistema fotovoltaico autônomo



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

1 – Painel fotovoltaico; 2 – Controlador de Carga/Descarga das baterias; 3 – Banco de baterias; 4 – Inversor autônomo, para cargas em CA; 5 – Cargas CC ou CA;

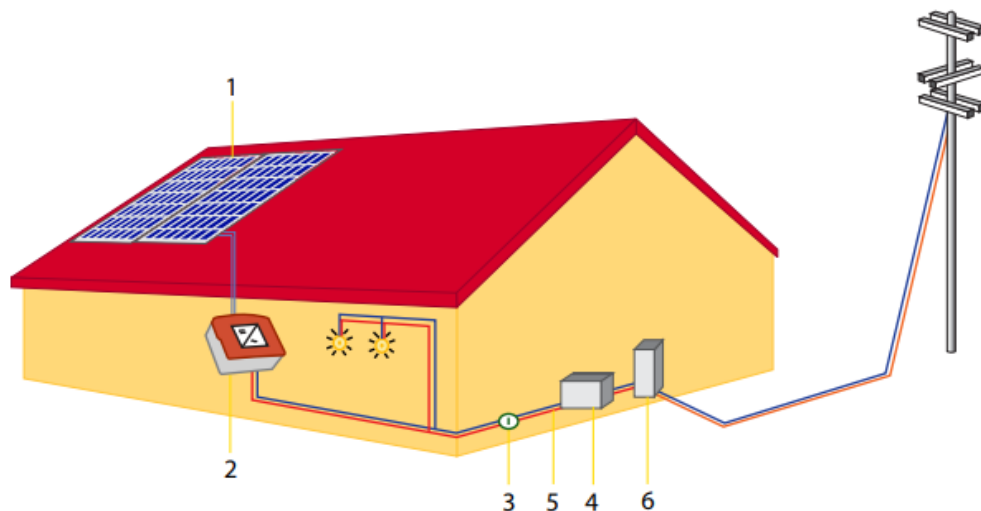
### 3.2.1.3 Sistemas conectados à rede (On-Grid)

Em BLUESOL (2008, p. 17) vemos que os sistemas fotovoltaicos conectados à rede fornecem energia para as redes de distribuição. Todo o potencial gerado é rapidamente escoado para a rede, que age como uma carga, absorvendo a energia.

Os sistemas conectados à rede, também chamados de on-grid, geralmente não utilizam sistemas de armazenamento de energia, e por isso são mais eficientes que os sistemas autônomos, além de, geralmente, serem mais baratos.

Os sistemas On-Grid dependem de regulamentação e legislação favorável, pois usam a rede de distribuição das concessionárias para o escoamento da energia gerada. (BLUESOL, 2008, P. 17).

Figura 21: Sistema conectado à rede



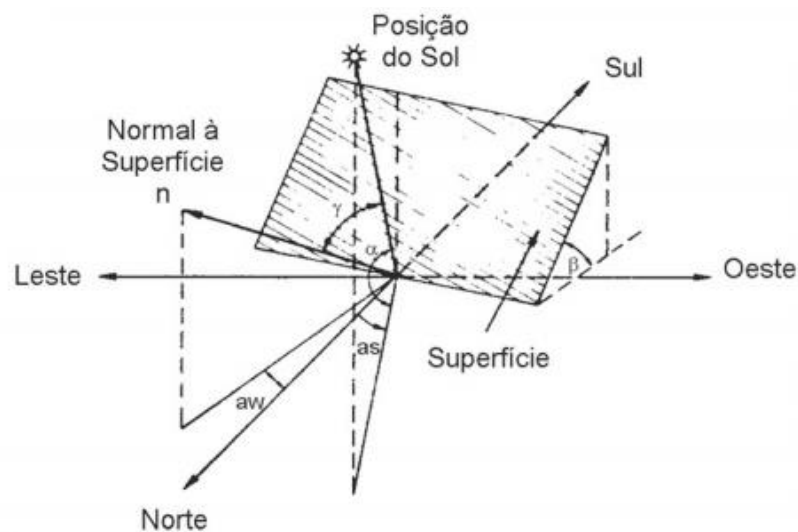
Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

1 – Módulos Fotovoltaicos 2 – Inversor Grid-Tie –Transforma a corrente contínua do painel em corrente alternada de 127 V/220 V e 60Hz, compatível com a eletricidade da rede. 3 – Interruptor de Segurança. 4 – Quadro de Luz - distribui energia para casa. 5 – A eletricidade alimenta os utensílios e eletrodomésticos 6 – O excedente volta para a rede elétrica através do medidor fazendo-o rodar ao contrário, reduzindo a tarifa de energia elétrica.

### 3.3 Geometria solar

“A seguir, detalhamos as relações geométricas entre a superfície terrestre e os raios solares. Estes ângulos variam de acordo ao movimento aparente do sol na abóbada celeste.” (BLUE-SOL, 2008, p. 21).

Figura 22: Relação geométrica sol-Terra-painel solar



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

- Ângulo de Incidência ( $\gamma$ ): é formado entre os raios solares e a normal à superfície de captação. Quanto menor esse ângulo, mais energia será captada.
- Ângulo Azimutal De Superfície ( $aw$ ): Entre a projeção da normal à superfície do painel solar e a direção norte-sul. Para o hemisfério sul o azimute é o norte e, portanto, o deslocamento angular será a partir deste ponto cardinal, sendo positivo em sentido horário (leste) e negativo no sentido anti-horário (oeste). O ângulo Azimutal de superfície estará entre:  $-180^\circ \leq aw \leq 180^\circ$ . Internacionalmente convencionou-se o azimute  $0^\circ$  como sendo o Sul, e o Norte tem ângulo azimutal de  $180^\circ$ .
- Ângulo Azimutal do Sol ( $as$ ): é o ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul. Tem as mesmas convenções que o Ângulo Azimutal de Superfície.
- Altura Solar ( $\alpha$ ): ângulo entre os raios solares e sua projeção sobre um plano horizontal.
- Inclinação ( $\beta$ ): ângulo entre o painel solar e o plano horizontal.
- Ângulo Horário do Sol ou Hora Angular ( $\omega$ ): é o deslocamento angular do sol, no sentido Leste-Oeste, a partir do meridiano local, devido ao movimento de rotação da Terra. A

Terra dá uma volta completa ( $360^\circ$ ) em torno de si mesma em 24 horas. Portanto, cada hora corresponde a um deslocamento de  $15^\circ$ .

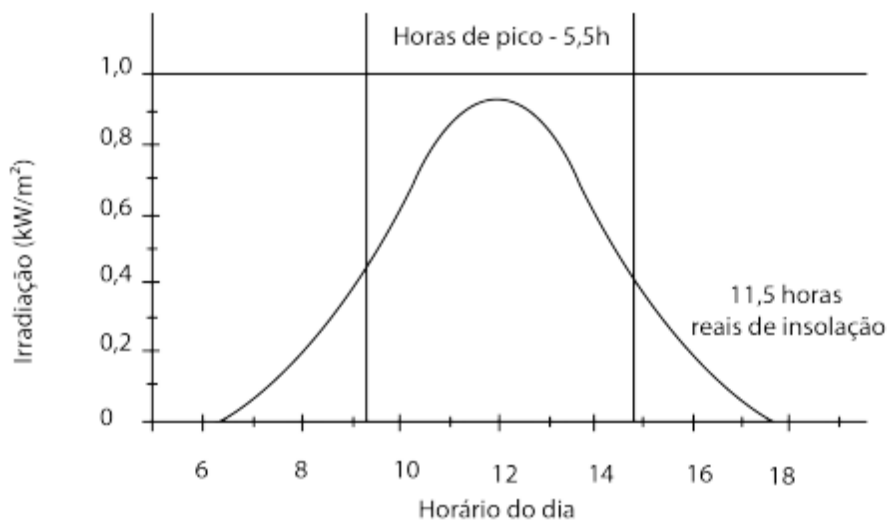
- **Ângulo Zenital ( $\theta_z$ ):** é o ângulo formado entre os raios solares e a vertical (Zênite). O ângulo zenital é o inverso da altura solar. O sol só alcança o Zênite nas localidades entre os trópicos (zona tropical). Fora dos trópicos, em nenhuma localidade haverá, ao meio dia solar, ângulo zenital igual a zero.

O conhecimento desses termos é de extrema importância para o estudo de qualquer sistema de aproveitamento de energia solar. (BLUE-SOL, 2008, p. 22).

### 3.3.1 Horas de Sol pico

“Se colocarmos em um gráfico a variação da irradiância em um dia médio, podemos observar as horas do dia em que a irradiância é próxima ou igual a  $1000 \text{ W/m}^2$ .” (BLUE-SOL, 2008, p. 25).

Figura 23: Gráfico das horas de Sol pico



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Esse valor é de extrema importância para o cálculo de sistemas fotovoltaicos, pois é nessas horas que um painel fotovoltaico estará gerando o seu máximo durante o dia. As horas de sol pico estão compreendidas entre duas a três horas antes e depois do meio-dia-solar. O meio-dia-solar acontece quando os raios de sol estão se projetando na direção Norte-Sul, no meridiano local. Como o meio dia solar varia ao longo do ano, na maioria das vezes será diferente do meio dia no horário civil. (BLUE-SOL, 2008, p. 26).

### 3.4 Efeito fotovoltaico

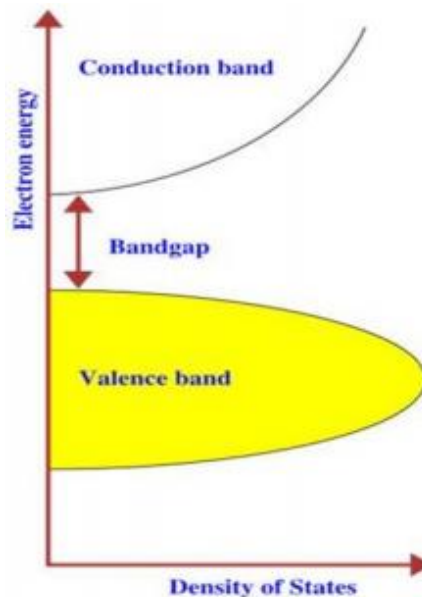
Em BLUESOL (2008, p. 26) vemos que o termo fotovoltaico significa a transformação da radiação solar diretamente em corrente elétrica, utilizando as células fotovoltaicas, também chamadas de células solares.

As células fotovoltaicas são constituídas de materiais semicondutores como: silício, arseneto de gálio, telureto de cádmio ou disseleneto de cobre e índio (gálio). O silício cristalino é o mais utilizado, mas as tecnologias de película fina ganharam mercado com a produção em larga escala. (BLUE-SOL, 2008, p. 26).

#### 3.4.1 Princípios de funcionamento

“Os semicondutores possuem a banda de valência totalmente preenchida e a banda de condução totalmente vazia a temperaturas muito baixas. A separação entre as duas bandas de energia, chamada de gap de energia, é em torno de 1 eV.” (BLUE-SOL, p. 26 e 27).

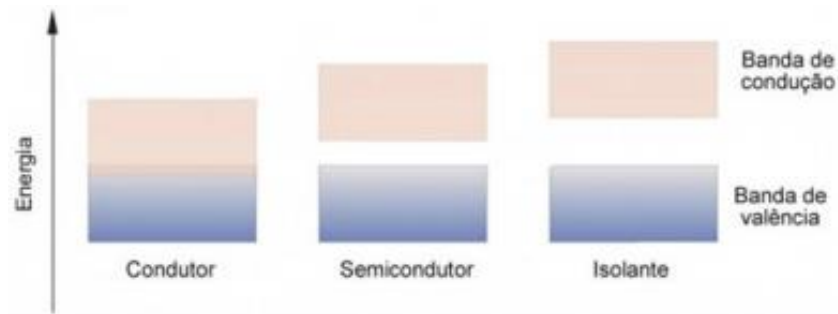
Figura 24: Gap de energia nos semicondutores



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

“Nos isolantes o gap é de vários eVs, variando conforme o material.” (BLUE-SOL, 2008 p. 27).

Figura 25: Comparativo do gap entre os tipos de matérias



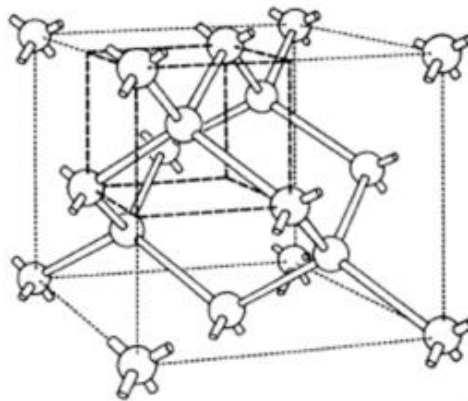
Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Em BLUESOL (2008, p. 27) vemos que isso dá aos semicondutores determinadas características especiais, como o aumento da sua condutividade com o aumento da temperatura, devido à excitação dos elétrons da banda de valência para a banda de condução. Outra característica importante, é a possibilidade de fótons, na faixa do visível e com energia suficiente, excitarem os elétrons. Esse efeito que acontece nos semicondutores puros, chamados de intrínsecos (i), por si só não permite o funcionamento do material com célula fotovoltaica, pois a maioria dos elétrons volta a se recombinar.

Será descrito a seguir o funcionamento e a preparação de uma célula fotovoltaica de silício.

Cada átomo de silício tem quatro elétrons de valência, e para atingir uma configuração estável se ligam a quatro átomos vizinhos, formando uma rede cristalina. Nesse caso, não há elétrons livres. (BLUE-SOL, 2008, p. 27).

Figura 26: Cristal de Silício intrínseco (i)



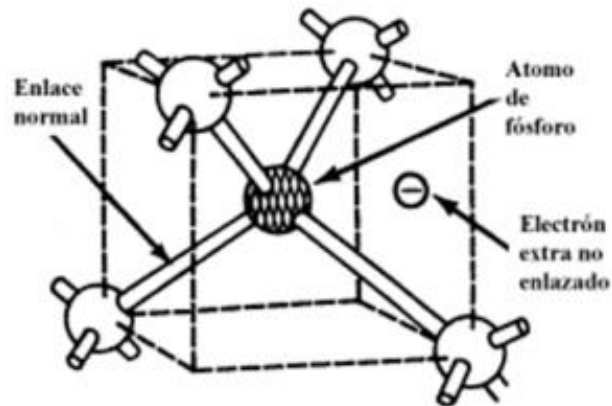
Fonte: (BLUE-SOL).

Para potencializar o efeito fotovoltaico o cristal de silício é dopado com substâncias que alteram a sua rede cristalina. Se ao silício for misturado átomos de Arsênio ou de



Fósforo que possuem 5 elétrons de valência, um desses elétrons ficará livre, permitindo que com pouca energia térmica esse elétron salte para a banda de condução. Esse tipo de impureza é chamado de doadora de elétrons, ou dopante n. (BLUE-SOL, 2008, p. 28).

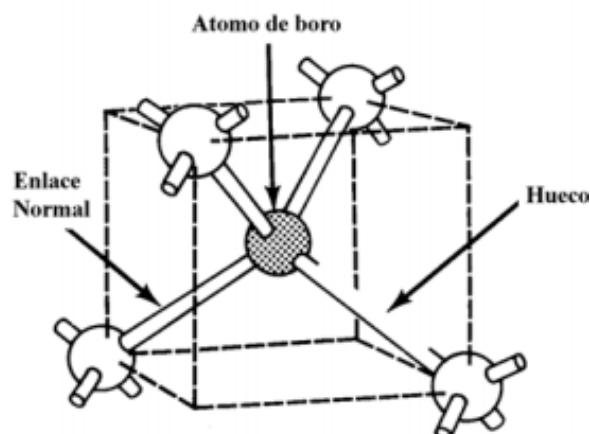
Figura 27: Silício dopado com fósforo



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Se doparmos o silício com materiais como o Alumínio ou Boro, que possuem 3 elétrons de valência, faltará um elétron para criar uma ligação covalente. Esse buraco se comporta como uma carga positiva, já que com pouca energia térmica um elétron vizinho vem ocupar esse buraco, deixando um buraco onde estava fazendo com que haja uma movimentação do buraco. Esse tipo de impureza é chamado de dopante p. (BLUE-SOL, 2008, p. 28).

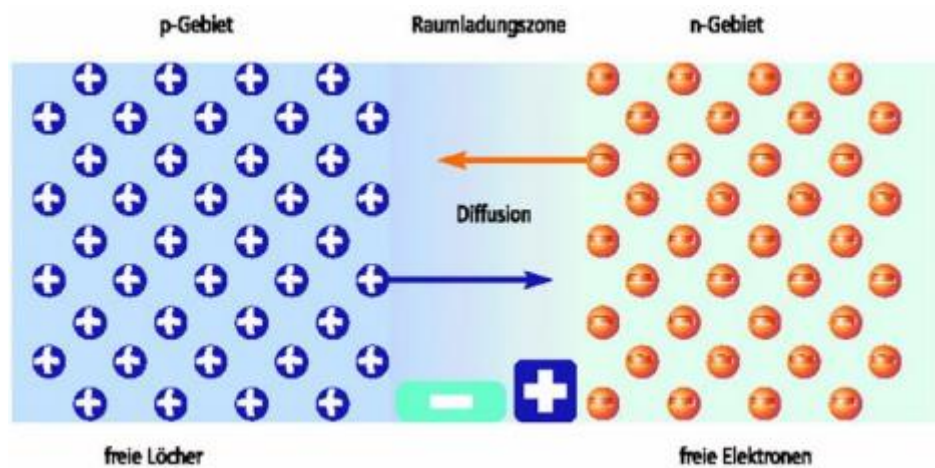
Figura 28: Silício dopado com boro



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Se combinarmos as duas impurezas no mesmo cristal intrínseco de silício, formamos uma Junção P-N. Na área de contato da junção, os elétrons livres do semiconductor Tipo-N fluem para os buracos do semiconductor Tipo-P até que se forme um campo elétrico que impede o fluxo permanente de elétrons. (BLUE-SOL, 2008, p. 29).

Figura 29: Difusão de elétrons na junção P-N

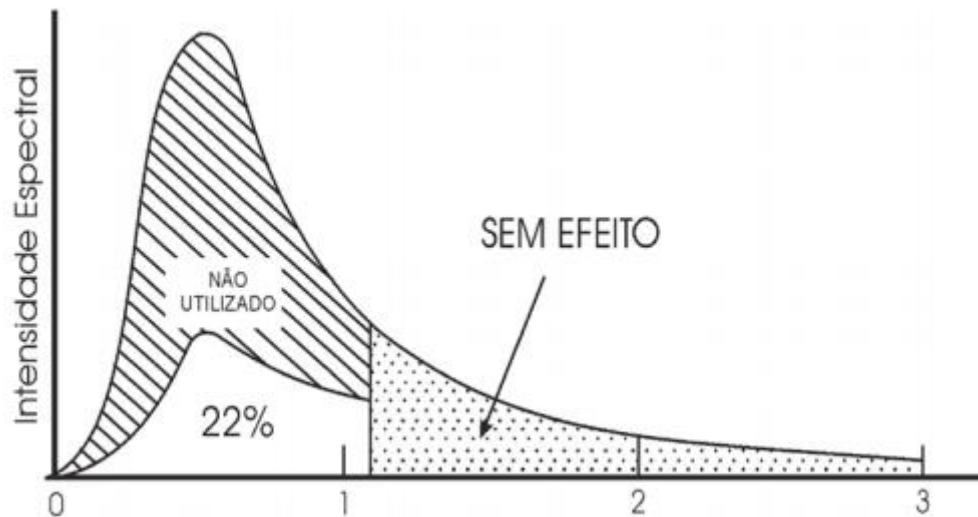


Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Em BLUESOL (2008, p. 29) vemos que se a Junção P-N for exposta à radiação solar, os fótons com energia superior ao gap liberam mais buracos-elétrons livres que criam uma corrente elétrica na área da junção.

Alguns dos elétrons liberados são recombinados, se não forem capturados. Além disso, nem todo o espectro da radiação é aproveitado. (BLUE-SOL, 2008, p. 29).

Figura 30: Aproveitamento da radiação solar pelas células fotovoltaicas



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

“Fótons com energia superior ou inferior à necessidade geram calor desnecessário, que diminui a eficiência da célula fotovoltaica. Veja na tabela abaixo o balanço energético de uma célula fotovoltaica de silício cristalino:” (BLUE-SOL, 2008, p. 30).

Quadro 08: Aproveitamento da radiação solar pelas células de silício cristalino

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)
<b>= 13,0%</b>	<b>Energia elétrica utilizável.</b>

Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

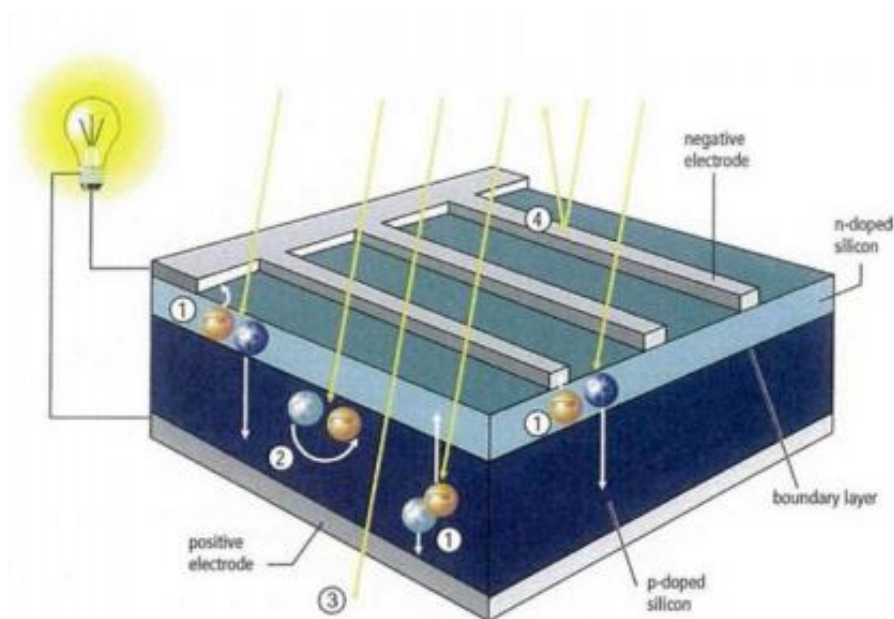
### 3.5 Células fotovoltaicas

Vimos também em BLUESOL (2008, p. 32) que uma célula fotovoltaica é a unidade básica de um sistema fotovoltaico. É a responsável pela conversão da radiação solar em eletricidade.

Como uma única célula não é suficiente para gerar potências elétricas elevadas, os fabricantes associam várias células, e as encapsulam para proteção, formando assim um módulo fotovoltaico.

Os módulos comerciais diferem entre si por vários fatores, como a capacidade de gerar potencial, chamado de potência-pico, fator de forma, área, etc. E esses valores se alteram de acordo ao tipo de célula fotovoltaica utilizada. (BLUE-SOL, 2008, p. 32).

Figura 31: Representação de uma célula de silício cristalizado



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

### 3.5.1 Tipos de células fotovoltaicas

“A seguir, os principais tipos de células fotovoltaicas produzidas em escala comercial e suas principais características.” (BLUE-SOL, 2008, p. 32).

#### 3.5.1.1 Silício cristalizado

Vimos em BLUESOL (2008, p. 32 e 33) que o silício é o segundo material mais abundante na natureza, perdendo apenas para o oxigênio. Entretanto, o silício está naturalmente combinado a outros materiais, e se apresenta como dióxido de silício e silicatos. A areia e o quartzo são as formas mais comuns. A areia contém demasiado teor de impurezas para ser processada, já os depósitos de quartzito chegam a possuir 99% de Si. É essa areia sílica que é processada para a obtenção da matéria pura.

Para a utilização do silício como matéria prima para a fabricação das células fotovoltaicas, esse deve ser purificado.

São dois, os graus de purificação do silício:

1 – Silício metalúrgico, onde se combina ao quartzito quantidades controladas de carbono a altas temperaturas. O oxigênio presente no quartzito é removido na forma de CO<sub>2</sub> e, depois de outros processos serão obtidas barras de silício com pureza de 98%.

2 – Silício grau semicondutor (eletrônico e solar), onde o silício é convertido através de ácido clorídrico (HCl) a triclorosano:  $\text{Si} + 3 \text{HCl} \Rightarrow \text{SiHCl}_3 + \text{H}_2$ . Devido ao seu baixo ponto de ebulição (31,8 °C), este pode ser purificado pelo método de destilação fracionada, processo semelhante ao utilizado em refinarias de petróleo. Com a adição de H<sub>2</sub> acontece a seguinte reação química:  $\text{SiHCl}_3 + \text{H}_2 \Rightarrow \text{Si} + 3 \text{HCl}$ .

Após essa purificação, teremos criado um cristal de silício com até 99,9999% de pureza, que é um dos materiais mais puros produzidos pelo homem. É justamente esse processo de purificação que encarece a criação das células fotovoltaicas. (BLUE-SOL, 2008, p. 32 e 33).

##### 3.5.1.1.1 Silício monocristalino

Ainda em BLUESOL (2008, p. 33), uma das formas de se obter o cristal único de silício, é através do método Czochralski. Durante esse processo, uma semente de cristal de silício é inserida numa caldeira com silício policristalino e, enquanto o conjunto gira lentamente, essa

semente é erguida. A semente de silício orienta os átomos do mosto que se cristaliza em uma única formação cristalina, por isso o nome: monocristal.

Após o corte do cristal em pastilhas, é depositado o fósforo, através de difusão de vapor a temperaturas entre 800-1200°C, e criada a rede de contatos frontais e traseiras que recolherão os elétrons liberados pelo efeito fotovoltaico. Também é feito um tratamento antirreflexo na parte posterior.

Eficiência: 15 – 18% (Czochralski)

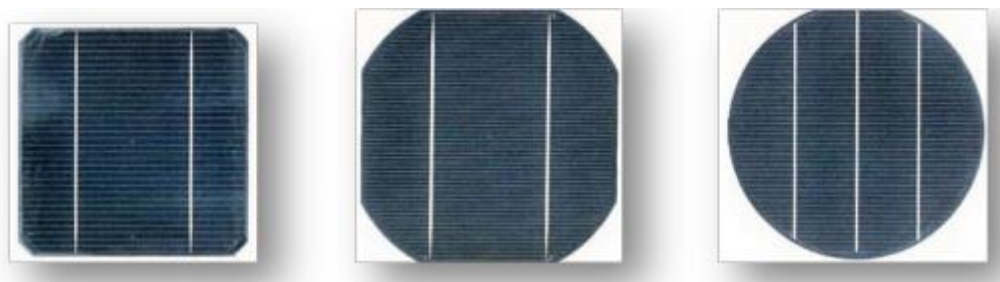
Forma: Geralmente arredondadas, ou em formato de faixa de pizza.

Tamanho: geralmente 10x10 cm<sup>2</sup> ou 12,5x12,5 cm<sup>2</sup>; diâmetro 10, 12,5 ou 15 cm.  
Espessura: 0,3 mm.

Cor: geralmente azul-escuro ou quase preto (com antirreflexo), cinza ou azul-acinzentado (sem antirreflexo).

Fabricantes: a Astro Power, Bharat Electronics, BHEL, BP Solar, Canrom, CEL, CellSiCo, Deutsche Cell, Eurosolare, GE Energy, GPV, Helios, Humaei, Isofoton, Kaifeng Solar Cell Factory, Kwazar JSC, Maharishi, Matsushita Seiko, Microsolpower, Ningbo Solar Energy Power, Pentafour Solec Technology, Photowat, RWE Schot Solar, Sharp, Shell Solar, Solartec, Solar Wind Europe, Solec, Solmecs, Solterra, Suntech, Sunways, Telekom-STV, Tianjin Jinneng Solar Cell, Viva Solar, Webel SL, Yunnan Semiconductor. (BLUE-SOL, 2008, p. 33).

Figura 32: Células de silício monocristalino



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

#### 3.5.1.1.2 Silício policristalino

Consta ainda em BLUESOL (2008, p. 33 e 34) que um dos processos de criação de silício policristalino mais utilizado é o de fundição de lingotes, onde o silício em estado bruto é aquecido no vácuo até uma temperatura de 1.500°C e depois resfriado até uma temperatura

de 800°C. Pode-se aproveitar o processo de purificação do silício, e já adicionar o Boro. Nesse processo é utilizado menos energia. Serão criados blocos de silício de 40x40 cm<sup>2</sup> com altura de 30 cm. O processo segue como o do silício monocristalino, com o corte, tratamento antirreflexo e criação dos contatos frontais.

Eficiência: 13 – 15% (com antirreflexo).

Forma: geralmente quadrada.

Tamanho: 10x10 cm<sup>2</sup>, 12,5x12,5 cm<sup>2</sup>, 15x15 cm<sup>2</sup>. Espessura: 0,3 mm.

Estrutura: durante o resfriamento, formam-se vários cristais de silício com orientações diversas. Essa formação multicristalina é facilmente reconhecida.

Cor: azul (com antirreflexo), cinza prateado (sem antirreflexo).

Fabricantes: Al-Afandi, BP Solar, Deutsche Cell, ErSol, Eurosolare, GPV, Kwazar JSC, Kyocera, Maharishi, Mitsubishi, Motech, Photovolttech, Photowat, Q-Cells, RWE Schot Solar, Sharp, Shell Solar, Solar Power Industries, Solartec, Solterra, Suntech, Sunways, Tianjin Jinneng Solar Cell. (BLUE-SOL, 2008, p. 33 e 34).

Figura 33: Células de silício policristalino



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

### 3.5.1.2 Células de película fina

O desenvolvimento das células fotovoltaicas de película fina vem desde a década de 90. O material semiconductor é aplicado em um substrato, geralmente vidro, através de deposição por vaporização, deposição catódica ou banho eletrolítico. Os semicondutores mais utilizados são o silício amorfo (a-Si), o disseleneto de cobre e índio (gálio) (CIS-CIGS) e o telureto de cádmio (CdTe). Devido à alta absorção luminosa, camadas de menor espessura (0,001 mm) são, em teoria, suficientes para converter a luz solar em eletricidade. Além disso, esses materiais são mais facilmente dopados e requerem menores temperaturas (entre 200°C e 500°C) para sua fabricação, o que, combinado com a capacidade de automação para produção em larga escala, pode baratear o preço final dos módulos. As células de película fina não têm o tamanho e o formato restrito, como as células de silício cristalizado. (BLUE-SOL, p. 34).

### 3.5.1.2.1 Silício amorfo (a-Si)

Figura 34: Representação de uma célula de silício amorfo



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Em BLUESOL (2008, p. 35) diz-se que o silício amorfo (sem forma) não possui uma estrutura cristalina, mas sim uma rede irregular. Por isso se formam ligações livres que absorvem hidrogênio até a saturação. Esse silício amorfo hidrogenado (a-Si:H) é criado em reatores plasmáticos, através de vaporização química de silano gasoso (SiH<sub>4</sub>), que requer temperaturas relativamente baixas, em torno de 200°C a 250°C.

A grande desvantagem das células de a-Si é a sua baixa eficiência, que diminui nos primeiros 6 a 12 meses de funcionamento, devida à degradação provocada pela luz, pelo chamado Efeito Staebler-Wronski, até atingir um valor estável.

Eficiência: entre 5% a 9% de eficiência do módulo.

Forma: formato livre.

Tamanho: módulo standard 0,77x2,44 m<sup>2</sup>; módulos especiais 2x3 m<sup>2</sup>.

Espessura: 1-3 mm para o substrato (plástico, vidro, etc.), com um revestimento de silício amorfo de aproximadamente 0,001 mm.

Cor: castanho avermelhado a azul escuro.

Fabricantes: BP Solar, Canon, Dunasolar, ECD Ovonic, EPV, Free Energy Europe, Fuji Electric, ICP, Iowa Thin Film Technologies, Kaneka, MHI, RWE Schot Solar, Sanyo, ShenzhenTopray Solar, Sinonar, Solar Cells, Terra Solar, Tianjin Jinneng Solar Cell, United Solar Ovonic, VHF Technologies. (BLUE-SOL, 2008, p. 35).

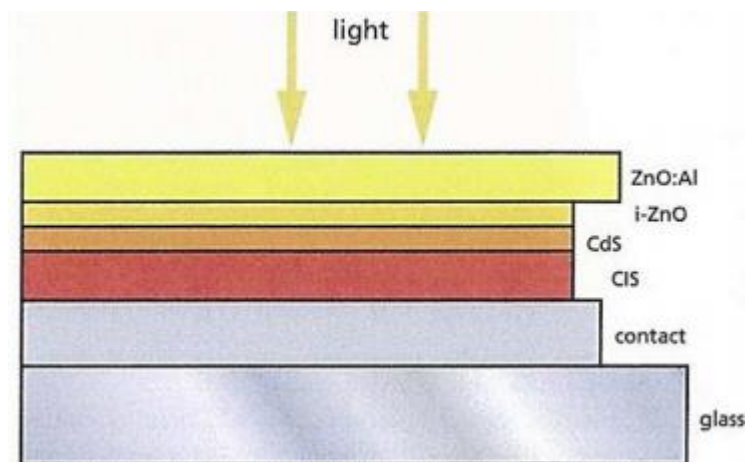
Figura 35: Módulo de silício amorfo



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

#### 3.5.1.2.2 Disseleneto de Cobre e Índio (CIS)

Figura 36: Representação de uma célula CIS



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Segundo BLUESOL (2008, p. 36 e 37), para se fabricar as células CIS o substrato é revestido com uma fina camada de molibdênio através de deposição catódica, e a camada CIS do tipo P pode ser fabricada através da vaporização simultânea do cobre, índio e selênio, numa câmara de vácuo a 500°C, ou através da deposição camada a camada dos materiais. O óxido de zinco contaminado com alumínio (ZnO:Al) é utilizado como contato frontal transparente. Esse



material é do tipo N e é depositada uma camada intermediária de óxido de zinco intrínseco (i-ZnO). Uma camada de sulfato de cádmio (CdS) do tipo N é utilizada para reduzir as perdas causadas combinação inadequada das redes cristalinas das camadas de CIS e ZnO. Diferentemente do silício amorfo, células CIS não são susceptíveis à degradação causada pela luz, mas apresentam problemas de estabilidade em ambientes quentes e húmidos. Por isso, os módulos fabricados com esse tipo de célula têm que ter boa selagem.

Os módulos CIS são os mais eficientes, dentre os mostrados aqui, e é provável que a produção em massa torne os seus preços mais atrativos que os de silício amorfo. Infelizmente as reservas de índio estão cada vez mais reservadas à produção das telas touch-screen dos smartphones e tablets, comprometendo o uso desse material para a indústria fotovoltaica.

Eficiência: 7,5% a 9,5 % de eficiência do módulo.

Forma: formato livre.

Tamanho: geralmente entre 1,2 x 0,6 m<sup>2</sup>.

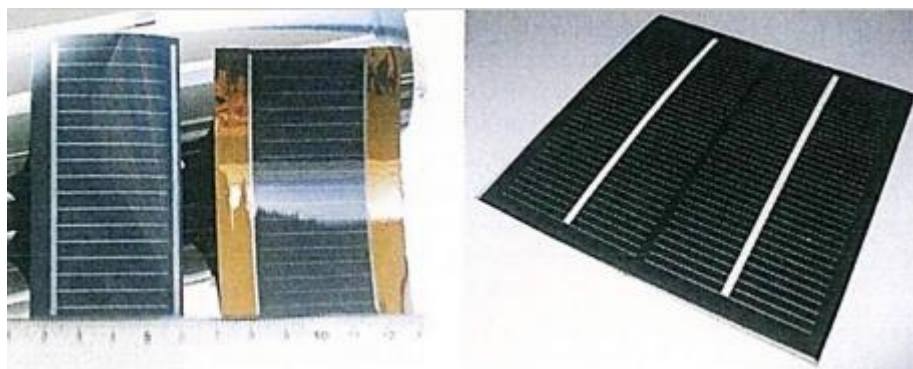
Espessura: 3 mm para o substrato com revestimento de 0,003 mm.

Cor: preto.

Fabricantes: Shell Solar, Würth Solar, Showa Shell, EPV, Global Solar, Daystar.

(BLUE-SOL, 2008, p. 36 e 37).

Figura 37: Célula CIS

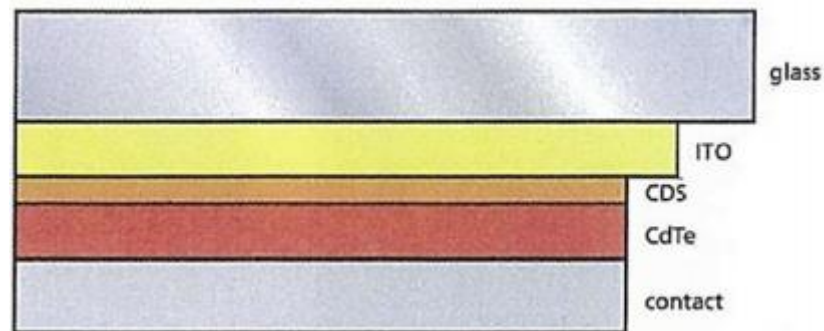


Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

### 3.5.1.2.3 Telureto de Cádmio (CdTe)

As células de CdTe são fabricadas sobre um substrato de vidro, com uma camada de óxido de estanho índio (OTI) como contato frontal, que é revestido com uma camada transparente de sulfato de cádmio (CdS) do tipo N, e depois com a camada de telureto de cádmio (CdTe) do tipo P. Podem ser fabricados por silk screen, deposição galvânica ou pirólise pulverizada. (BLUE-SOL, 2008, p. 37).

Figura 38: Representação de uma célula CdTe



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Em BLUESOL (2008, p. 37 e 38), assim como o CIS, a tecnologia de fabricação do CdTe pode ficar ainda mais barata com o aumento da produção em escala. A desvantagem está na toxicidade do cádmio. O CdTe é um composto atóxico estável, mas pode apresentar um risco para o ambiente e a saúde na condição de gás. Felizmente o estado gasoso só ocorre durante a sua fabricação, em centros de produção controlados.

Eficiência: 6 – 9% de eficiência dos módulos.

Forma: formato livre.

Espessura: 3 mm para o substrato com 0,008 mm de revestimento.

Tamanho: geralmente 1,2 x 0,6 m<sup>2</sup>.

Cor: verde-escuro a preto.

Fabricantes: Antec, First Solar, Matsushita. (BLUE-SOL, 2008, p. 37 e 38).

Figura 39: Módulo de CdTe



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

### 3.5.1.3 Tabela de eficiências

Quadro 09: Eficiência dos diferentes tipos de células fotovoltaicas

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%

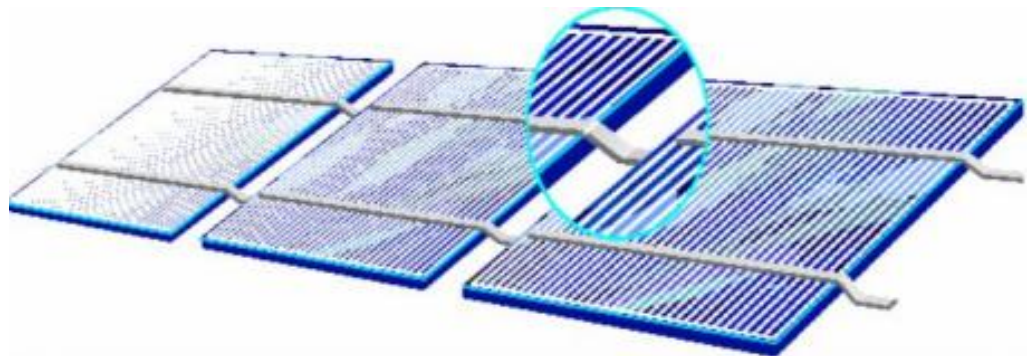
Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

## 3.6 Módulos fotovoltaicos

Em BLUESOL (2008, p. 40), uma célula fotovoltaica de silício cristalizado produz uma tensão de aproximadamente 0,46 a 0,56 volts e uma corrente aproximadamente 30 mA/cm<sup>2</sup>. As células comerciais geram em torno de 1 A, 2,5 A, 3 A, 5 A e 7 A.

Para alcançar as potências comerciais, os fabricantes de módulos fotovoltaicos conectam células fotovoltaicas entre si, geralmente em série, em um processo de conexão que é feito soldando os terminais da parte frontal de uma célula à parte traseira da seguinte, e assim por diante. Para construir um módulo de tensão nominal em 12 volts, serão conectadas entre 30 e 40 células (geralmente 33, 36 ou 40). (BLUE-SOL, 2008, p. 40).

Figura 40: Conexão de células fotovoltaicas em série



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

“O processo de montagem do módulo fotovoltaico pode ser feito de maneira automática, através de maquinário especializado, ou por manufatura, onde o processo de produção não permite uma alta produção em escala.” (BLUE-SOL, p. 40).

Figura 41: Máquina para conexão automática de células



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Em BLUESOL (2008, p. 40 e 41) vemos que após a conexão, as células serão encapsuladas na seguinte ordem:

- Uma lâmina de vidro temperado;
- Um material orgânico, como o EVA (etileno-vinil-acetato);
- As células conectadas;
- Mais uma lâmina de EVA (ou similar)
- Uma cobertura, que pode ser vidro, tedlar, PVC, ou outros polímeros. (BLUE-SOL, 2008, p. 40 e 41).

Figura 42: Máquina de corte dos materiais



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

“O conjunto será levado a uma máquina laminadora, que finaliza a laminagem, dando estanqueidade ao conjunto.” (BLUE-SOL, 2008, p. 41).

Figura 43: Laminadora de módulos fotovoltaicos



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

“Por fim o conjunto será emoldurado (utilizando geralmente alumínio anodizado), serão inseridas as caixas de conexão (e cabos/conectores) e o módulo será levado a um Simulador Solar.” (BLUE-SOL, 2008, p. 41).

Figura 44: Máquina de molduragem de módulos fotovoltaicos



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Em BLUESOL (2008, p. 42) temos que além do simulador solar, os módulos passam por testes mecânicos como:

- Variação de temperatura entre  $-40^{\circ}\text{C}$  até  $+85^{\circ}\text{C}$ ;
- Testes de isolamento sob humidade e congelamento;
- Carga mecânica, resistência a granizo e torções;
- Resistência de terminais, etc. (BLUE-SOL, p. 42).

Figura 45: Simulador solar



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Os testes mecânicos determinam a capacidade dos módulos resistirem às intempéries, os testes de isolamento são para os elementos condutores e moldura. Os testes de torção detectam defeitos que possam aparecer em caso de montagem de módulos em estrutura inadequada. (BLUE-SOL, 2008, p. 42).

Figura 46: Módulos fotovoltaicos comerciais



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

### 3.6.1 Características dos módulos fotovoltaicos

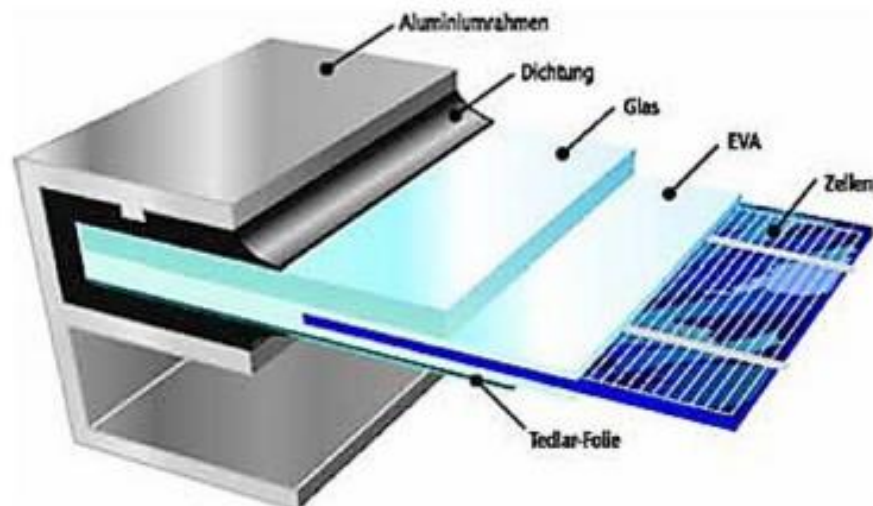
Segundo BLUESOL (2008, p. 43), cada tipo de módulo, de acordo com a tecnologia utilizada na célula, tem suas características particulares. Apresentaremos aqui, as características dos módulos de silício cristalizado, pois são os mais utilizados atualmente.

Os módulos são classificados no mercado de acordo à sua potência-pico ( $W_p$ ), e ao tipo de célula. Mas para um técnico ou projetista, existem outras características a serem consideradas. (BLUE-SOL, 2008, p. 43).

#### 3.6.1.1 Características físicas e mecânicas

“Os módulos fotovoltaicos comerciais têm forma quadrada ou retangular. A espessura, sem a moldura, não costuma ultrapassar 4 cm. Não são muito pesados e, apesar da aparência rígida, suportam ligeiras deformações, adaptando-se a esforços mecânicos.” (BLUE-SOL, 2008, p. 43).

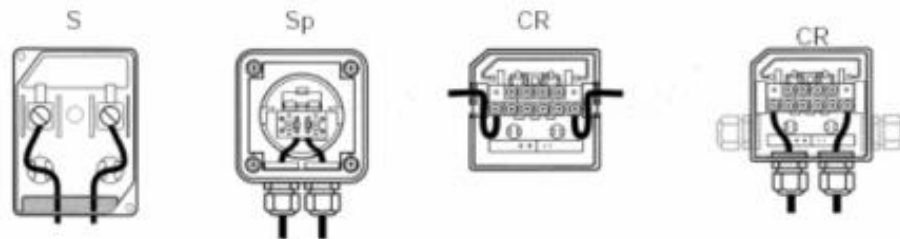
Figura 47: Corte transversal de um módulo fotovoltaico



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

“As caixas de conexão possuem o isolamento necessário para a conexão dos cabos e a outros módulos. Além disso, os módulos têm um ponto de aterramento, para os casos em que as conexões entre módulos cheguem a tensões maiores.” (BLUE-SOL, 2008, p. 43).

Figura 48: Caixas de conexões de módulos fotovoltaicos



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

As dimensões e o peso dos módulos variam de acordo ao fabricante e à potência-pico, mas seguem padrões gerais seguidos por todos. Módulos para sistemas on-grid costumam vir de fábrica com os conectores especiais para conexão rápida. Os mais comuns são os modelos MC3 e MC4, desenvolvidos pela empresa Multicontact, mas que são fabricados por diversos outros fabricantes no mesmo padrão. (BLUE-SOL, 2008, p. 44).

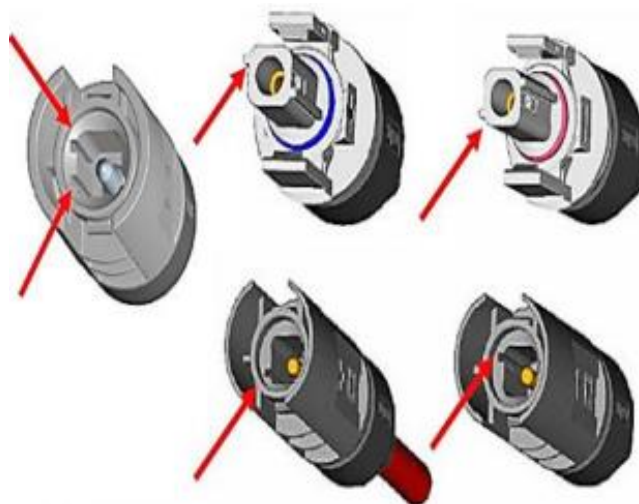
Figura 49: Conectores MC3 E MC4



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

“Outro modelo de conector para sistemas fotovoltaicos é desenvolvido pela empresa Tyco Electronics.” (BLUE-SOL, 2008, p. 44).

Figura 50: Conectores Tyco



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).



Em BLUESOL (2008, p. 44 e 45) vemos que os modelos não são compatíveis entre si, e alguns fabricantes usam diferentes modelos de conector em seus diferentes modelos de módulo. A falta de compatibilidade entre os conectores serve como o indicativo da recomendação de não se agrupar módulos de características distintas.

Tenha bastante atenção quanto ao conector utilizado pelo fabricante, na fase de projeto do sistema PV, pois a remoção e/ou troca do conector, em muitos casos, invalida a garantia contra defeitos de fabricação do módulo. É possível contornar a incompatibilidade entre os conectores dos módulos e os conectores dos dispositivos de condicionamento de potência (como os inversores) através das caixas de junção de fileira e painéis.

Nem todos os modelos de módulos fotovoltaicos vêm com conectores. Os modelos de menor potência geralmente não os têm. Mesmo módulos de maior potência, mas com foco em sistemas fotovoltaicos isolados, também não costuma ter os conectores. Possuem apenas a caixa de conexão. (BLUE-SOL, 2008, p. 44 e 45).

### 3.6.1.2 Características elétricas

“Tensão Nominal: é a tensão padrão para a qual o módulo foi desenvolvido para trabalhar. A quantidade células fotovoltaicas determina esse parâmetro, segundo o quadro abaixo:” (BLUE-SOL, 2008, p. 45).

Quadro 10: Tensões nominais e Voc de módulos Standard

Número de Células	Tensão Nominal	Tensão em Circuito Aberto (Voc)
18 células	6 volts	9, 2 volts
36 células	12 volts	17,4 volts
72 células	24 volts	40,15 volts

Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Consta em BLUESOL (2008, p. 45) que a tabela anterior se aplica aos módulos Standard que são os mais adequados para sistemas fotovoltaicos isolados. Há, no mercado, módulos non-standard, que possuem variados números de células (ex.: 40 ou 60) e só são adequados para sistemas fotovoltaicos conectados à rede, assim como os módulos standard. Em circunstâncias especiais, os módulos non-standard podem ser utilizados em sistemas isolados.

Tensão de Máxima Potência ( $V_{mpp}$ ): é a tensão máxima que o módulo gerará, em seu ponto de máxima potência, sob as condições padrão de teste (STC).

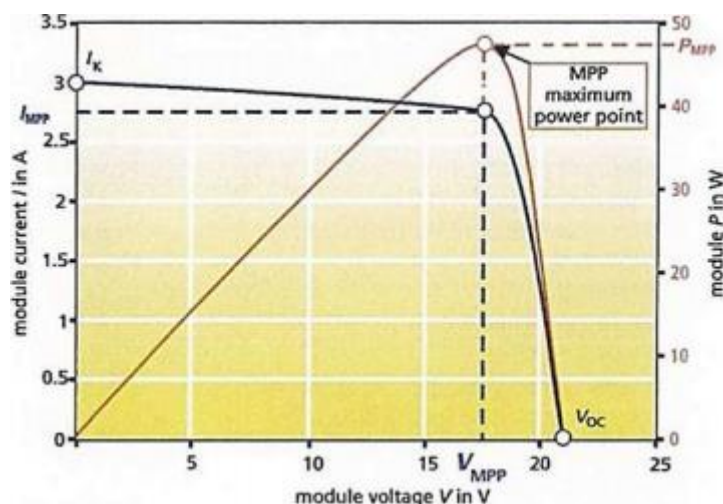
Tensão em Circuito Aberto ( $V_{oc}$ ): tensão máxima que o módulo fornece em seus terminais, sem a presença de uma carga (em vazio). É uma tensão de teste. Podemos medi-la com um multímetro.

Corrente em Máxima Potência ( $I_{mp}$ ): corrente máxima que um módulo fotovoltaico pode fornecer a uma carga, em condições padrão de teste.

Corrente de Curto Circuito ( $I_{sc}$ ): corrente máxima que o módulo fotovoltaico fornece, quando seus terminais estão em curto circuito, sob as condições padrão de teste. Diferente das baterias e outras fontes de energia, podemos medir a corrente em curto circuito de um módulo fotovoltaico. A corrente em curto circuito, geralmente é 5% superior à corrente máxima.

Potência Máxima: a corrente elétrica gerada por um módulo varia de zero ao  $I_{sc}$ , enquanto a tensão entre os terminais varia de zero até o  $V_{oc}$  sob diferentes condições de Irradiância e temperatura. Como a potência é o produto da tensão pela corrente, essa só será a máxima para uma única combinação de tensão e corrente. Um módulo fotovoltaico estará fornecendo a máxima potência, quando o circuito externo possuir uma resistência tal, que determine os valores máximos de tensão e corrente e, portanto, o seu produto será o máximo. Existem aparelhos que conseguem alcançar o ponto de máxima potência (MPP - Maximum Power Point) em diversas condições de irradiância e temperatura. São os Seguidores do Ponto de Máxima Potência (MPP Trackers). (BLUE-SOL, 2008, p. 45).

Figura 51: Curva I V de um módulo fotovoltaico comercial



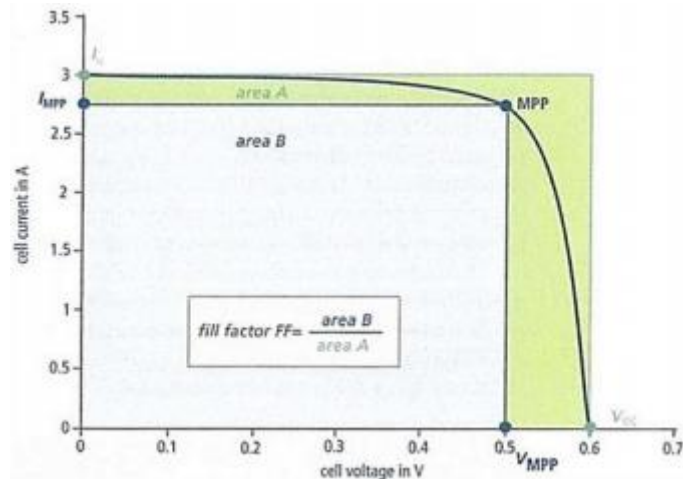
Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Vemos em BLUESOL (2008, p. 46) que eficiência: é o quociente entre a potência gerada e a irradiância incidente sobre o módulo.

Fator de Forma (Preenchimento): é um conceito teórico que mede a forma da curva definida pelas variáveis I e V na seguinte equação:

$$FF = \frac{I_{mpp} * V_{mpp}}{I_{sc} * V_{oc}} = \frac{P_{max}}{I_{sc} * V_{oc}} \quad (\text{BLUE-SOL, 2008, p. 46}).$$

Figura 52: Fator de forma de um módulo comercial



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

### 3.6.2 Condições de teste e operação

Para os testes de performance e rotulagem dos módulos fotovoltaicos, é utilizado um padrão de irradiância, massa de ar e temperatura. Esse padrão, chamado de Condições Padrão de Teste (STC – Standard Test Conditions) é conseguido em laboratório através do simulador solar. Em situações práticas, não temos as mesmas condições para o trabalho dos módulos fotovoltaicos. Veja abaixo os valores comparativos em três condições: (BLUE-SOL, 2008, p. 46).

Quadro 11: Condições de teste e operação dos módulos fotovoltaicos

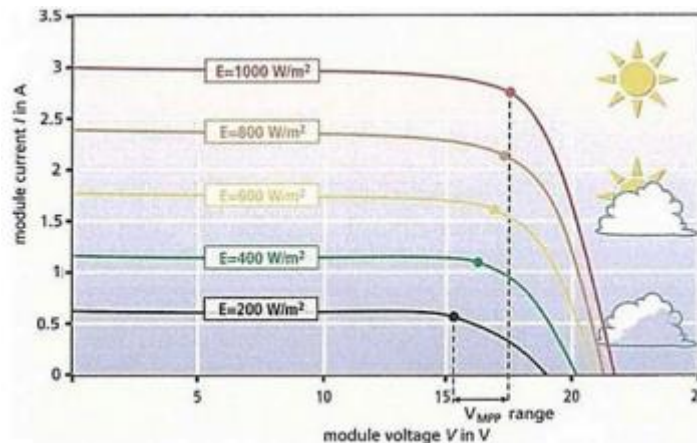
Parâmetros	STC	NON-STC	G-NOCT
Irradiância (G)	1.000 W/m <sup>2</sup>	800 W/m <sup>2</sup>	200 W/m <sup>2</sup>
Massa de Ar (AM)	1,5	2	2
Temperatura da célula	25°C	45°C	45
Temperatura do ar	0°C	20°C	20°C

Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Em BLUESOL (2008, p. 47) vemos que todos os módulos comerciais têm em suas fichas de dados os resultados dos testes em STC. É recomendado aos fabricantes, pela norma DIN EM 50380, que os fabricantes acrescentem as informações dos testes em Condições Normais de Operação, inclusive em baixas irradiâncias, como mostrado na tabela acima.

A grande importância disso está no fato de a potência máxima de um módulo comercial ser diferente da nominal quando este está recebendo irradiâncias menores, ou quando suas células estão submetidas a temperaturas diferentes de 25°C. Abaixo a variação de tensão em circuito aberto e corrente de curto circuito de acordo à Irradiância. (BLUE-SOL, 2008, p. 47).

Figura 53: Variação de Voc e Isc de acordo à irradiância

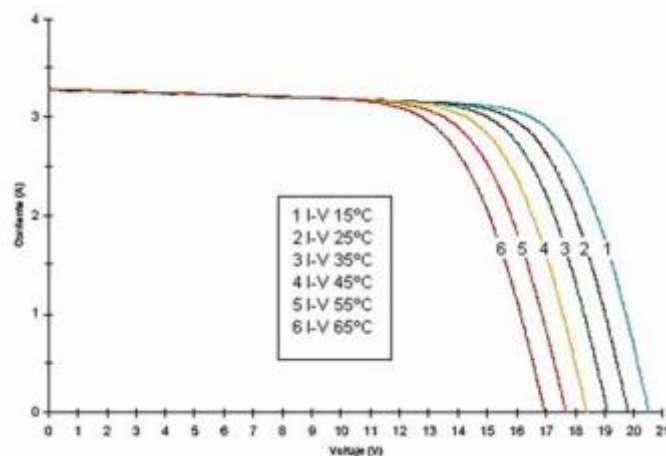


Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Ainda em BLUESOL (2008, p. 47), segundo o gráfico acima, podemos ver que a tensão varia menos que a corrente. Isto porque um fóton (com energia suficiente) energiza um elétron. Com maior irradiância, maior a quantidade de fótons, e maior a corrente elétrica gerada.

As variações de temperatura também influenciam o desempenho das células fotovoltaicas. Com o aumento da temperatura, a tensão de circuito aberto cai e a corrente de curto circuito aumenta. (BLUE-SOL, 2008, p. 47).

Figura 54: Variação da tensão e corrente de um módulo em função da temperatura



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Ainda em BLUESOL (2008, p. 48), a queda de tensão é maior que o incremento de corrente, portanto o aumento da temperatura reduz significativamente a potência dos módulos.

A temperatura das células fotovoltaicas não é a mesma do ambiente, pois as células sofrem um aumento de temperatura ao receber a radiação solar, por conta do efeito fotovoltaico. A diferença de temperatura varia de acordo às características construtivas da célula (a-Si, p-Si, m-Si, etc.) e do módulo. Podemos estimar essa diferença de temperatura através da seguinte equação:

$$\Delta t^{\circ} = 0,034 * G - 4$$

Onde:

G: é a irradiância em w/m<sup>2</sup>

Nas folhas de dados dos fabricantes encontramos os coeficientes de temperatura, pois esse dado é de extrema importância, principalmente para o cálculo de sistemas conectados à rede, pois esses, geralmente, utilizam grandes quantidades de módulos associados em série, e as tensões são altas. Com a variação da temperatura a diferença de tensão pode não ser suficiente para o trabalho de um inversor on-grid durante os dias quentes de verão, mas pode alcançar valores capazes de danificar um inversor subdimensionado em um dia frio de inverno. (BLUESOL, 2008, p. 48).

Quadro 12: Coeficientes de temperatura de um módulo comercial

### Temperature Characteristics

Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45±2°C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.400%/°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.314%/°C
Temperature Coefficient of Isc	0.051%/°C

Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

“Em geral temos os seguintes valores médios, caso o fabricante não forneça os dados, para cada 1°C acima de 25°C:” (BLUE-SOL, 2008, p. 48).

Quadro 13: Coeficientes de temperatura de módulos fotovoltaicos

Coeficiente	Silício Cristalizado	Película Fina
Corrente de Curto-Circuito ( $I_{sc}$ )	$+15 \times 10^{-6}$ A por $\text{cm}^2$ de célula	$+1,3 \times 10^{-5}$ A por $\text{cm}^2$ de célula
Tensão em Circuito Aberto ( $V_{oc}$ )	$-2,3 \times 10^{-3}$ V por célula	$-2,8 \times 10^{-3}$ V por célula
Potência do Módulo (Wp)	-0,5% por módulo	-0,5% por módulo

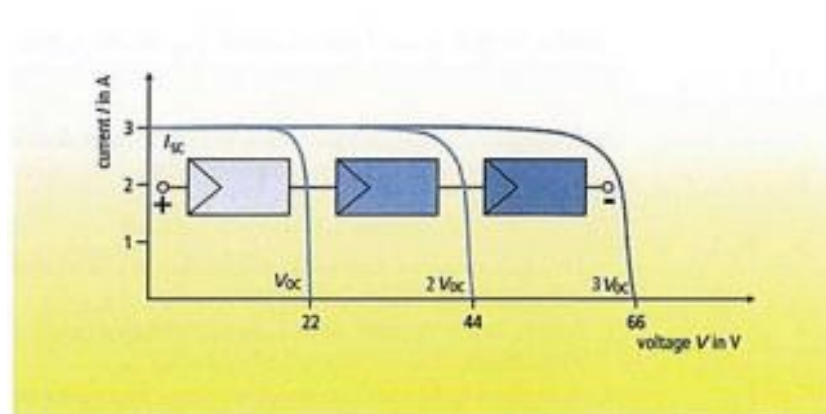
Fonte: (BLUES-SOL, 2008).

### 3.6.3 Associação de módulos fotovoltaicos

Como se vê em BLUESOL (2008, p. 49), dificilmente um único módulo fotovoltaico será suficiente para constituir o painel fotovoltaico de um sistema fotovoltaico. Um painel fotovoltaico é um conjunto de módulos fotovoltaicos eletricamente ligados entre si, que fornecem determinado potencial, e geralmente estarão ligados a um dispositivo de condicionamento de potência e/ou controle.

Na associação em série, chamada de fileira, os módulos terão suas tensões somadas, e a tensão do painel será a soma das tensões individuais de cada módulo. A corrente será a média das correntes de cada módulo, por isso não é aconselhável a associação de módulos de capacidades distintas. (BLUE-SOL, 2008, p. 49).

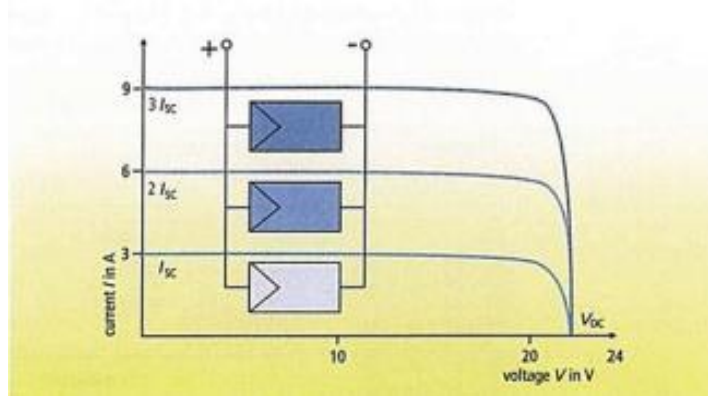
Figura 55: Comportamento de uma associação em série de módulos fotovoltaicos



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

“Na associação em paralelo teremos o aumento direto da corrente que será, no painel, a soma das correntes individuais de cada módulo. A tensão será a média das tensões geradas.” (BLUE-SOL, p. 49).

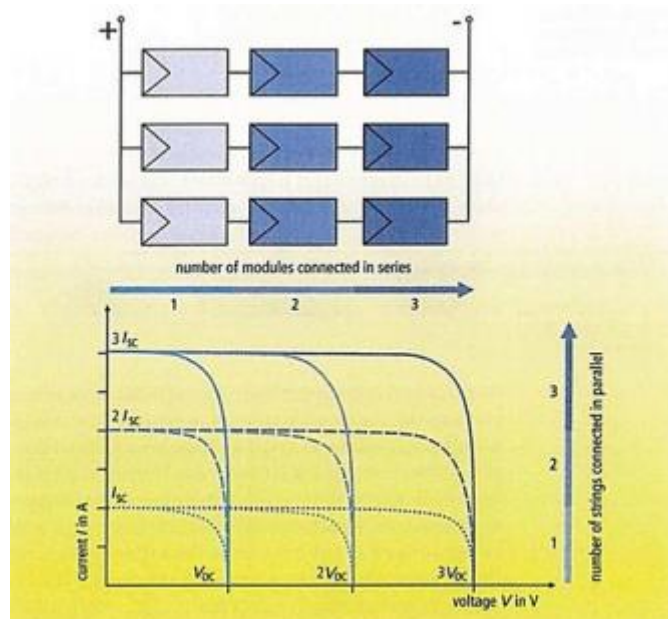
Figura 56: Comportamento de uma associação de módulos em paralelo



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Na maioria dos casos, será necessário associar os módulos em série, para alcançar a tensão nominal do sistema, e também em paralelo, para alcançar a potência-pico calculada no projeto. Nesses casos, temos as características das duas associações anteriores, e maiores perdas ao utilizar módulos de características diferentes. (BLUE-SOL, 2008, p. 49).

Figura 57: Associação mista de módulos fotovoltaicos



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

### 3.6.4 Sombreamento, pontos quentes e diodos de proteção

Sob determinadas condições de operação, uma célula fotovoltaica, ao receber uma sombra, pode aquecer tanto, que o material semiconductor pode ser danificado pelo calor. Aparecem os chamados pontos quentes (hot-spots), que danificam o módulo permanentemente. Isso acontece quando, ao invés de gerar, o módulo recebe corrente. (BLUE-SOL, 2008, p. 50).

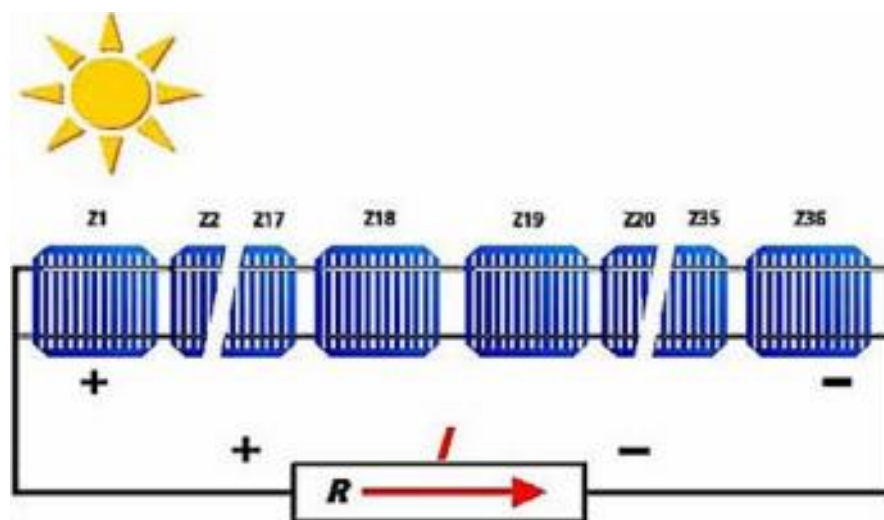
Figura 58: Ponto-quente em uma célula fotovoltaica



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

“Vejam as circunstâncias que levam ao aparecimento dos hot-spots e, em seguida, as formas de evita-los. Quando operando normalmente, a corrente elétrica gerada por uma célula fotovoltaica é consumida por uma carga.” (BLUE-SOL, p. 50).

Figura 59: Funcionamento normal de um conjunto de células fotovoltaicas

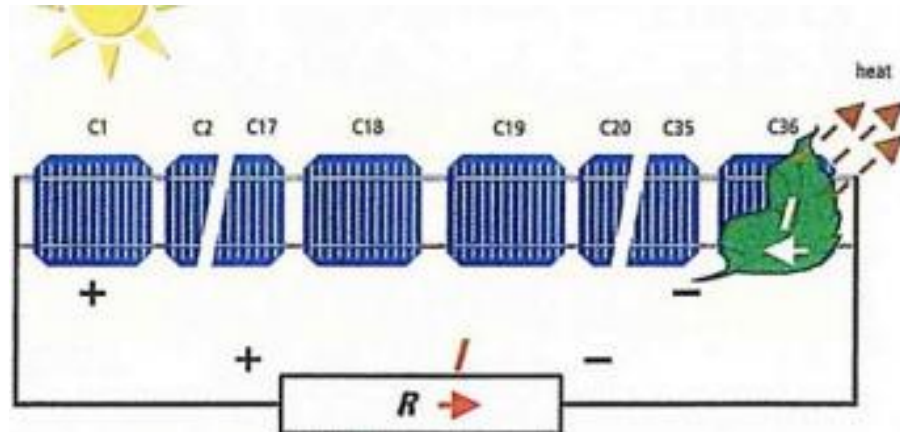


Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Se uma folha cai sobre o módulo, de forma a cobrir uma célula, esta estará inversamente polarizada e passará a agir como uma carga, convertendo eletricidade em calor. Se a corrente que atravessa a célula for alta o suficiente, teremos a formação do hot-spot. A maior corrente que uma célula, nessas condições pode receber, é a corrente de curto circuito, o que acontece frequentemente em sistemas fotovoltaicos com controladores shunt (vistos abaixo). (BLUE-SOL, 2008, p. 51).



Figura 60: Célula sombreada convertendo eletricidade em calor

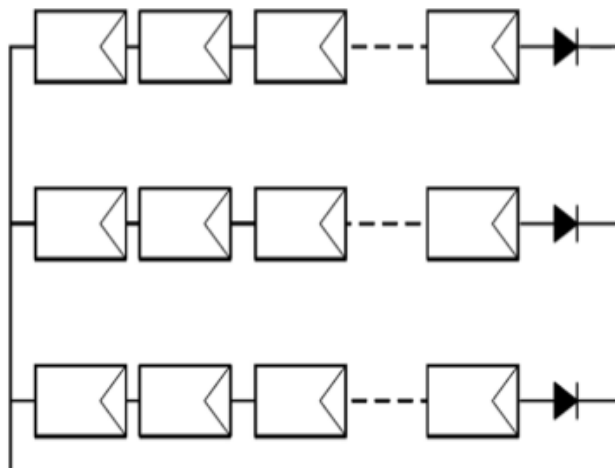


Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

#### 3.6.4.1 Diodos de By-Pass

Um conjunto de 18 a 20 células em série pode gerar uma tensão em torno de 12 V, e a tensão de bloqueio de uma célula fotovoltaica está entre 12 V e 50 V. Com uma associação de quatro módulos em série teremos a faixa de tensão onde é possível que a corrente inversa atravesse as células sombreadas. Para evitar a formação dos hot-spots, a corrente deve ser desviada das células, através de um diodo de derivação – também chamado de diodo de by-pass – conectado de maneira inversamente polarizada em relação a um conjunto de células. Os diodos são conectados a grupos de 18 ou 20 células, de maneira que um módulo de 36 células tem 2 diodos e um módulo de 72 células tem 4 diodos. (BLUE-SOL, 2008, p. 51).

Figura 61: Fileiras de módulos com diodos de bloqueio

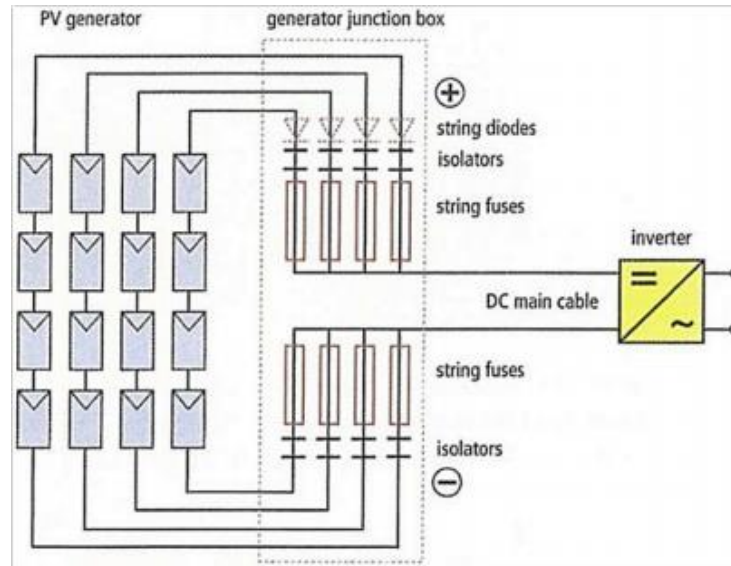


Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

“Como os diodos de bloqueio fazem parte da instalação elétrica do sistema, serão instalados pelo técnico responsável, geralmente no quadro de conexão dos módulos, juntamente

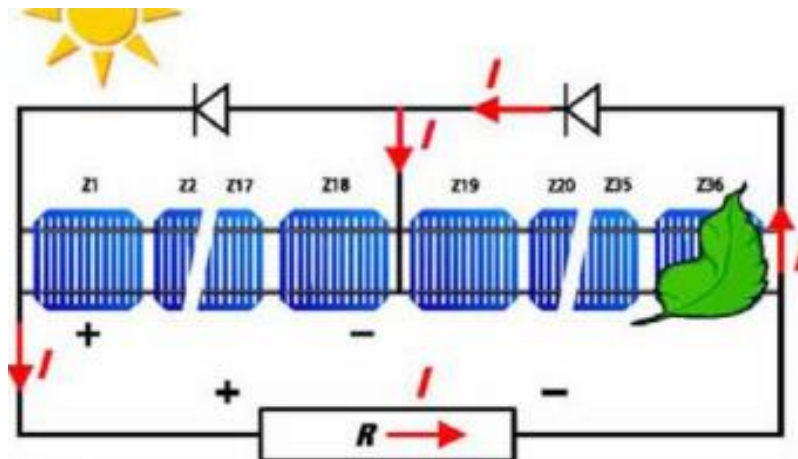
com os fusíveis de fileiras que protegem o cabeamento contra correntes excessivas.” (BLUE-SOL, p. 52).

Figura 62: Diodos de bloqueio e fusíveis de proteção na caixa de conexão dos módulos



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

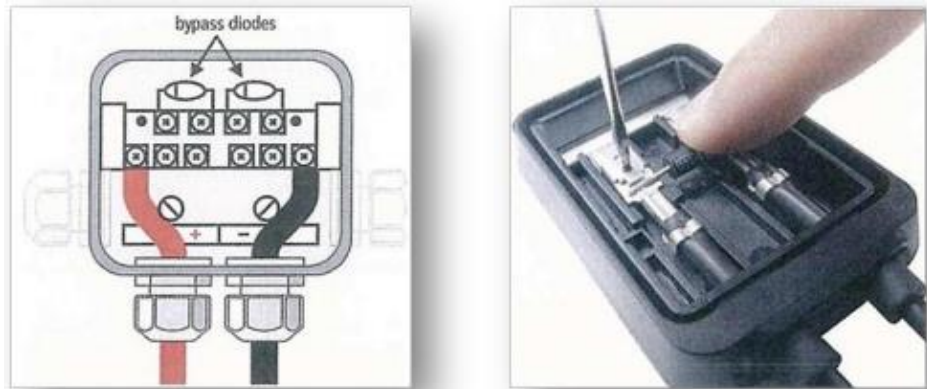
Figura 63: Diodos de derivação desviando a corrente reversa



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

“Os diodos de derivação são, geralmente, montados nas caixas de conexão, mas os fabricantes só costumam usar os diodos em módulos com potência superior a 40 Wp.” (BLUE-SOL, p. 53).

Figura 64: Diodos de by-pass nas caixas de conexão dos módulos



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

#### 3.6.4.2 Diodos de bloqueio

Consta na BLUESOL (2008, p. 53) que os diodos de bloqueio são utilizados nas fileiras de módulos em série, para evitar que um módulo sombreado transforme a fileira inteira em uma carga. Em alguns sistemas autorregulados, os diodos são utilizados para evitar que a bateria se descarregue sobre o painel fotovoltaico. Nos sistemas que utilizam controladores não é necessário, sendo até desencorajado o seu uso, pois o diodo provoca uma queda de tensão, que em sistemas menores pode ser significativa.

De acordo com a norma IEC 6036-7-712, os diodos de bloqueio não são necessários se forem utilizados módulos do mesmo tipo, com proteção Classe II e certificados para funcionar com 50% da corrente nominal de curto-circuito, quando polarizados inversamente. (BLUE-SOL, 2008, p. 53).

### 3.7 Painel e arranjo fotovoltaico

Segundo a BLUESOL (2008, p. 55), define-se painel fotovoltaico como sendo um conjunto de módulos fotovoltaicos. Um conjunto de painéis fotovoltaicos é um Arranjo Fotovoltaico.

Em diversas instalações fotovoltaicas vemos um único painel formado por um grande número de módulos, mas, na verdade, podemos ter vários painéis, do ponto de vista elétrico. Quando a potência de um painel é muito grande, de tal maneira que as correntes elétricas geradas são demasiadamente grandes para os dispositivos de controle, é preferível subdividi-lo em painéis menores, que podem ser acomodados em uma estrutura única, e seus conectores

serão levados a diferentes caixas de conexão, e daí para os dispositivos de controle correspondentes.

Veremos agora os cuidados e formas de instalação de um painel fotovoltaico, que podem ser utilizadas tanto para sistemas isolados, quanto sistemas on-grid, pois os conceitos são os mesmos. (BLUE-SOL, 2008, p. 55).

### 3.7.1 Estruturas de suporte e ancoragem

Em BLUESOL (2008, p. 55) vemos que tão importantes quanto os módulos fotovoltaicos, são as estruturas que os contêm. O mau funcionamento dos suportes faz cair por terra o investimento na tecnologia limpa da energia solar.

Para cada caso, há uma solução. No caso de telhados, deve ser verificado o tipo de telha ou de madeiramento – a estrutura que suporta o telhado. Nas instalações em plano horizontal deve ser verificada a altura mínima e também as cargas de vento que adicionam um esforço mecânico aos suportes e ancoragens.

Em todos os casos deve ser observada a correta orientação e inclinação do painel. A correta orientação permite captar o máximo de energia ao meio dia solar e horas próximas, que é o momento de maior concentração da radiação solar. A inclinação adequada permite a melhor captação durante o ano, compensando a menor irradiância nos períodos de inverno, no caso dos sistemas autônomos, ou maximizando a captação e geração nos períodos de verão, no caso das instalações on-grid. (BLUE-SOL, 2008, p. 55).

Figura 65: Painel fotovoltaico montado em telhado

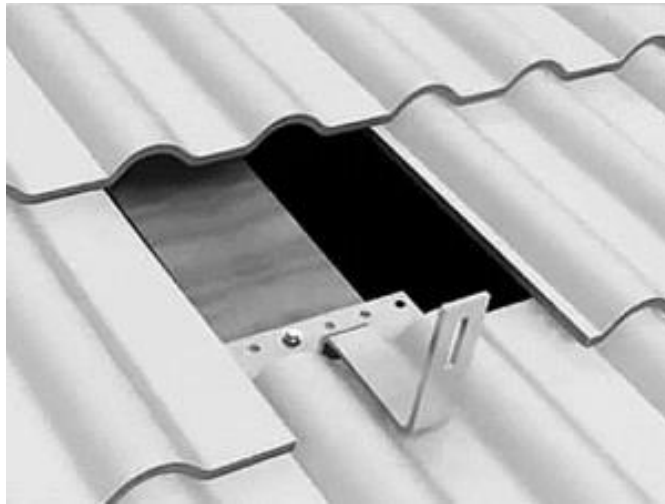


Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

### 3.7.1.1 Suportes para telhado

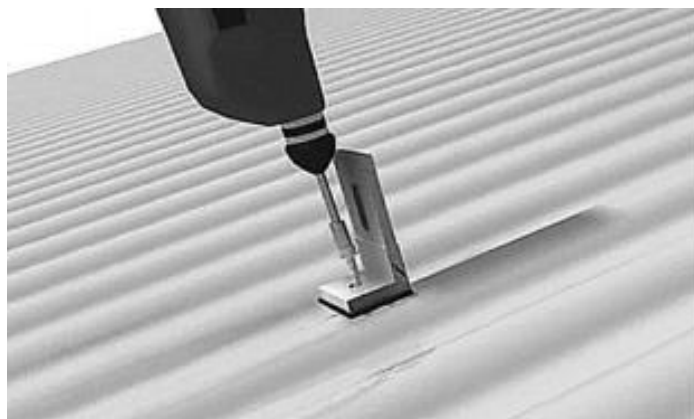
“Para fixar os módulos em telhados, é necessário instalar um perfil de suporte que pode ser afixado nas telhas (no caso de telhas metálicas) ou no suporte do telhado (no caso de telhas de cerâmica/argila ou concreto).” (BLUE-SOL, p. 55).

Figura 66: Presilha para telhas de argila



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

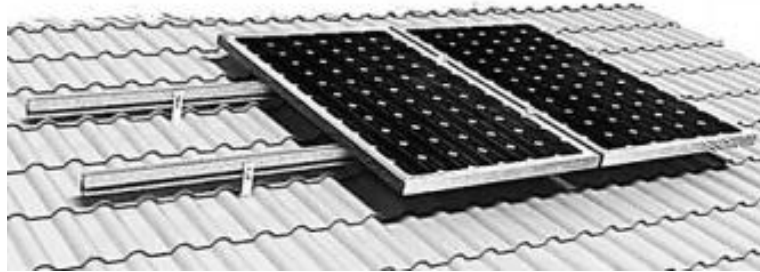
Figura 67: Presilha para telhas de metal



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

As presilhas são dispostas para receber o perfil de suporte que será dimensionado e posicionado de acordo aos módulos que comporão o painel fotovoltaico. Por isso uma etapa importante durante o estudo de caso e proposta de projeto é a fase de medição dos espaços disponíveis. (BLUE-SOL, 2008, p. 56).

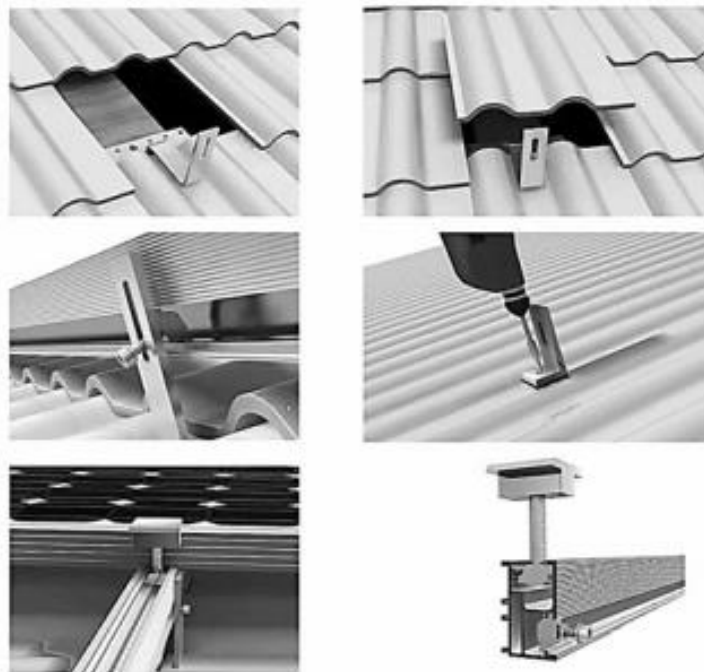
Figura 68: Módulos montados sobre o perfil de suporte



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

O que prende os módulos ao perfil de suporte são as presilhas rosqueadas, que são adaptáveis à grande maioria dos módulos, tanto os standards quanto os non-standard, desde que sejam emoldurados e a sua moldura esteja dentro dos padrões (com espessura entre 3 e 4,5cm). (BLUE-SOL, 2008, p. 56 e 57).

Figura 69: Detalhes das presilhas e perfil de suporte dos módulos para telhados



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Nas estruturas em telhado inclinado, principalmente os de telhas de argila, não é recomendável utilizar de ajustes para corrigir a inclinação, que tornam a instalação mais difícil, pois o suporte deverá suportar cargas de vento maiores. Além disso, o esforço extra no telhado pode ser perigoso, se este não for suficientemente forte para suportá-lo. O melhor seria arquitetar o telhado com a devida orientação e inclinação, mas isso só é possível na fase de projeto da edificação. Depois de pronta, se não há necessidade de reformas, um ajuste para a instalação do sistema fotovoltaico pode inviabilizar o projeto. (BLUE-SOL, 2008, p. 57).

Figura 70: Suporte com correção da inclinação, instalado em telhado metálico



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

### 3.7.1.2 Suportes para instalação em plano horizontal

A construção do painel fotovoltaico no chão ou cobertura permite maior flexibilidade quanto à orientação e inclinação. É a escolha para grandes instalações, onde alguns cuidados devem ser tomados, principalmente quanto ao sombreamento que, como já vimos, pode ser prejudicial às células fotovoltaicas. (BLUE-SOL, 2008, p. 57).

Figura 71: Painéis fotovoltaicos montados no chão, com inclinação adequada



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Vemos na BLUESOL (2008, p. 58) que para instalação no chão, o painel deverá ter altura mínima de 30 cm do chão, para evitar o sombreamento causado pelo crescimento de ervas, ou a sujeira na base dos módulos mais baixos, causada pelas gotas de chuva. Esses cuidados são especialmente importantes para os sistemas instalados em localidades remotas e/ou inóspitas.

Para painéis montados em cobertura, a altura mínima recomendável é de 5 cm. Isto é para permitir o escoamento da água da chuva, e a quebra da força do vento em duas componentes, o que diminui a carga de vento sobre o painel. (BLUE-SOL, 2008, p. 58).

Figura 72: Suporte para instalação em plano horizontal



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

#### 3.7.1.2.1 Orientação do painel fotovoltaico

Na BLUESOL (2008, p. 58 e 59) vemos que os painéis fotovoltaicos devem estar orientados para o ponto azimutal, e de preferência com ângulo azimutal de superfície igual a zero. O azimute é o equador, portanto no hemisfério norte os painéis são orientados para o sul, e no hemisfério sul são orientados para o norte. Dentro da zona tropical, o sol declina para norte e para sul durante as diferentes estações do ano, o que pode fazer com que um painel corretamente orientado, não receba os raios solares diretamente em alguns períodos do ano. Nesses casos é recomendável a utilização de mastros, tanto para as pequenas instalações, quanto para as grandes usinas. Este último caso se beneficia dos sistemas de seguimento do sol (sun-tracking). No caso das instalações residenciais, ou as que aproveitam o espaço livre dos telhados, o melhor é compensar essa dificuldade durante os cálculos do projeto.

Em todo caso devem ser evitados os ângulos maiores que  $30^\circ$ , tanto para Leste, quanto para Oeste. Para cada  $15^\circ$  de desvio do Norte geográfico, teremos uma hora de diferença para a captação máxima. Para Leste, haverá um adiantamento, e para Oeste haverá atraso. O adiantamento em determinadas localidades pode ser benéfico, como em locais tropicais, onde



chove no meio ou fim da tarde, prejudicando a geração. Além disso, a maior irradiância que acontece ao meio dia solar não será aproveitada em sua totalidade.

Também não é recomendável distribuir os módulos nas duas águas de um telhado não orientado para o norte, pois teríamos pouco mais da metade da geração durante a manhã, e o mesmo valor durante a tarde. (BLUE-SOL, 2008, p. 58 e 59).

### 3.7.1.2.2 Inclinação do painel fotovoltaico

Na BLUESOL (2008, p. 59) fala-se também que a inclinação ideal dos painéis fotovoltaicos varia de acordo à Latitude da localidade, e também quanto ao tipo de sistema fotovoltaico. Para sistemas isolados um painel com maior inclinação é recomendável, pois garante maior captação nos períodos de menor irradiância, próximo ao solstício de inverno. Para os sistemas conectados à rede, inclinações menores propiciam maior captação nos períodos próximos ao solstício de verão, o que gera mais energia e, nos países com tarifas diferenciadas, maiores ganhos financeiros.

É possível calcular a melhor inclinação, para um sistema isolado, utilizando a seguinte equação:

$$\beta = \varphi + (\varphi/4)$$

Onde:

B = inclinação do painel em relação ao plano horizontal.

$\Phi$  = Latitude da localidade.

Esta equação retorna um valor aproximado, e a inclinação real pode ser arredondada em até 5° sem perda de desempenho.

Para os sistemas conectados à rede, podemos utilizar a seguinte equação:

$$\beta = 3,7 + 0,69\varphi$$

Em latitudes acima de entre 15° e 30° podemos aproximar os cálculos em:

- Latitude + 5°, para sistemas autônomos.
- Latitude – 5°, para sistemas on-grid.

Em nenhum dos casos é recomendável inclinações menores que 10°, pois a limpeza natural dos módulos pela água da chuva será prejudicada. Isso é especialmente importante em sistemas autônomos instalados em localidades remotas ou inóspitas, nas quais a manutenção é reduzida. (BLUE-SOL, 2008, p. 59).

### 3.7.1.3 Suporte em forma de mastro

“Os mastros comportam bem os sistemas de rastreamento solar, que só são rentáveis nos grandes sistemas.” (BLUE-SOL, 2008, p. 59).

Figura 73: Painel fotovoltaico com sistema de rastreamento solar



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

“No caso de pequenos sistemas dentro da zona tropical, mesmos os residenciais, o uso de um suporte em mastro permite a mudança manual da inclinação e orientação, pelo técnico responsável pela manutenção.” (BLUE-SOL, p. 60).

Figura 74: Painel fotovoltaico em mastro



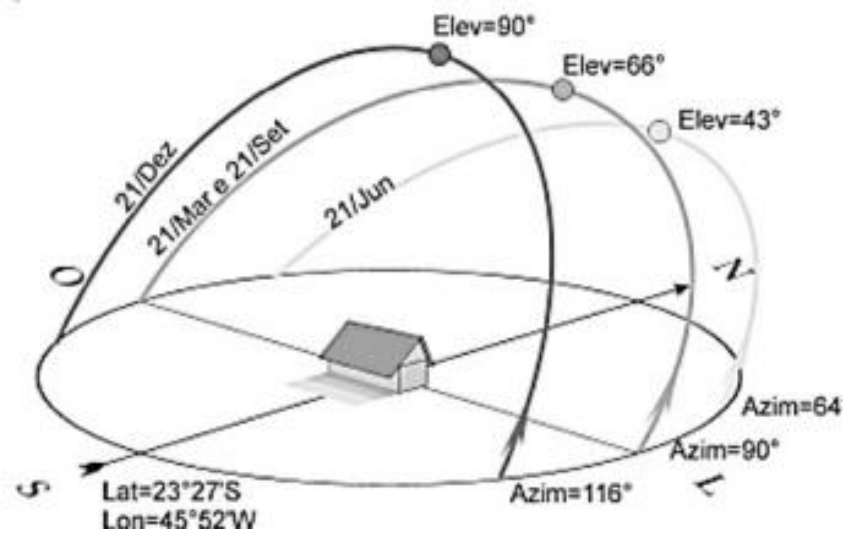
Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

### 3.7.2 Cálculos de sombreamento

Na BLUESOL (2008, p. 60) temos que tanto nos sistemas maiores, quanto nas pequenas instalações, é importante evitar a projeção de sombras sobre o painel fotovoltaico.

No caso das instalações menores, as sombras a serem evitadas são das árvores e edificações ao redor. Para se calcular a projeção das sombras durante o dia, é necessário conhecer a posição do sol em cada momento, nas diferentes estações do ano. (BLUE-SOL, 2008, p. 60).

Figura 75: Diferenças na posição do sol nas diferentes estações do ano

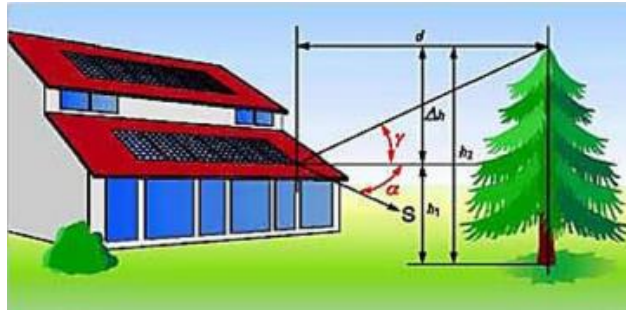


Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Ainda na BLUESOL (2008, p. 61) temos que para fazer cálculos de sombreamento mais sofisticados, é recomendável o uso de softwares específicos, que através de uma imagem digital, devidamente orientada, descrevem a trajetória do sol e as projeções de sombras.

Para calcular uma sombra simples, podemos recorrer a equações simplificadas que dão bons resultados, podendo ser adicionadas a planilhas automáticas de dimensionamento, facilitando o seu uso. Essas equações não são recomendadas para sistemas complexos, em localidades urbanas com grande quantidade de altos edifícios circunvizinhos ao local de instalação do painel fotovoltaico. (BLUE-SOL, 2008, p. 61).

Figura 76: Relações geométricas entre possíveis geradores de sombra



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Vemos também na BLUESOL (2008, p. 61 E 62) que no caso de sombras causadas por objetos frontais, podemos calcular a sombra no solstício de inverno, quando a projeção é maior. Se conseguirmos evitar essa sombra, nesse período, evitaremos as sombras o ano todo. Nas latitudes abaixo de  $20^\circ$  há o risco de objetos anteriores projetarem sombras, já que em tais localidades o sol declina a sul em alguns períodos do ano. Em localidades com latitude entre  $0^\circ$  e  $15^\circ$  a situação é mais crítica, pois o sol declina a sul em metade do ano. Portanto o entorno do painel fotovoltaico deve ser vistoriado a procura de possíveis causadores de sombra.

A seguinte equação permite o cálculo da projeção de sombras frontais:

$$d = z / \tan h_0$$

Onde:

$d$  = distância entre o painel e um obstáculo frontal;

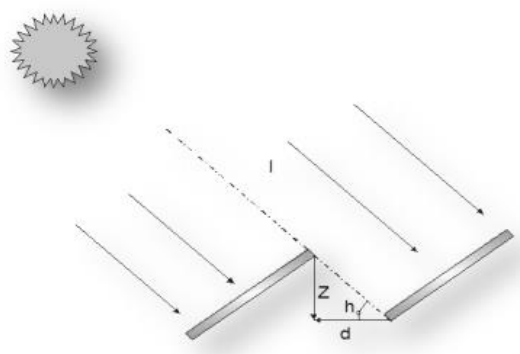
$z$  = altura do obstáculo;

$h_0$  = altura solar, no solstício de inverno, ao meio dia solar;

O fator  $h_0$  pode ser calculado mediante a seguinte equação:

$$h_0 = (90^\circ - \text{latitude da localidade}) - 23,5^\circ \text{ (BLUE-SOL, 2008, p. 61 e 62).}$$

Figura 77: Distância mínima entre o painel e um obstáculo frontal



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Vemos na BLUESOL (2008, p. 62) também que no caso de instalações que dispõem de grande quantidade de painéis, utilizamos a seguinte equação:

$$d = l * (\sin \beta / \tan h_0 + \cos \beta)$$

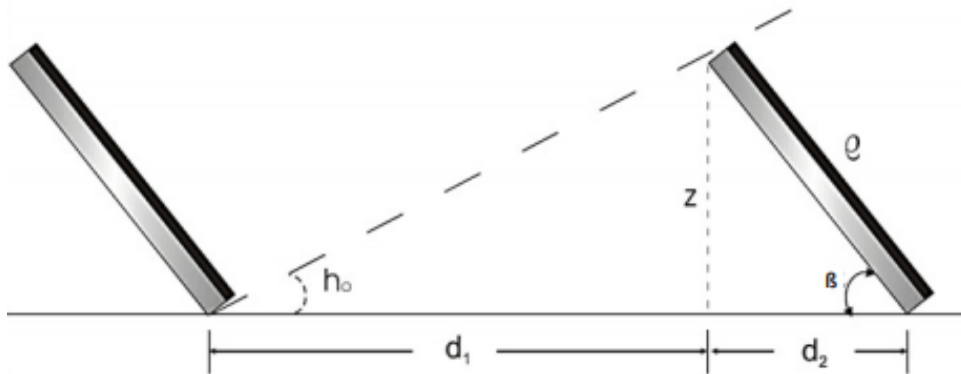
Onde:

$l$  = altura do painel em metros;

$\beta$  = inclinação do painel em graus;

$d_2 = Z * \cos \beta$ . (BLUE-SOL, 2008, p. 62).

Figura 78: Cálculo da distância entre painéis



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

“Estas equações calculam a projeção de sombra ao meio-dia-solar. Para estender às duas horas próximas, adicione 25% ao valor encontrado para  $d$ .” (BLUE-SOL, 2008, p. 62).

### 3.8 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede

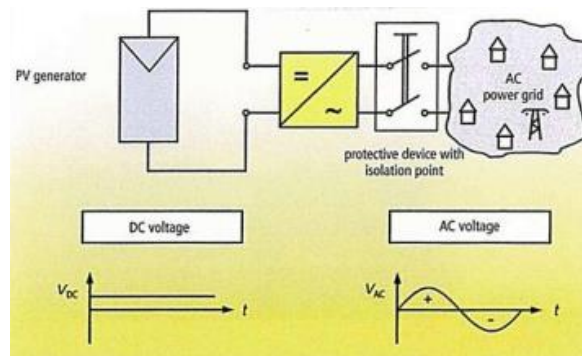
Em BLUESOL (2008, p. 64) vemos que como, nos sistemas on-grid, a energia elétrica gerada é entregue diretamente à rede, os dispositivos de condicionamento de potência devem se adequar ao modo como a eletricidade está fluindo nas linhas de distribuição, copiando esse padrão e fornecendo o mesmo tipo de sinal elétrico.

Para a conexão à rede, utilizamos dispositivos e configurações específicas para tal. Veremos agora os componentes e configurações comumente utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede. (BLUE-SOL, 2008, p. 64).

### 3.8.1 Inversores On-Grid

O dispositivo responsável pela injeção de energia na rede é o inversor grid-tie. Devido ao seu alto grau de sofisticação, os inversores grid-tie não são comparáveis aos inversores autônomos. Estes não podem ser ligados diretamente às redes de distribuição, pois não possuem o mesmo controle sobre a tensão, fase e frequência que os inversores grid-tie possuem. (BLUE-SOL, 2008, p. 64).

Figura 79: Diagrama de ligação com a rede, de um sistema PV on-grid



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Em BLUESOL (2008, p. 64) vemos que os inversores grid-tie são conectados à de duas formas:

- Diretamente à rede – onde a energia é rapidamente escoada para o sistema e utilizada pelos consumidores mais próximos.
- Através do ponto de conexão da edificação com a concessionária – onde a energia elétrica gerada é consumida pela própria edificação/residência, e somente o excedente é fornecido à rede.

Os inversores grid-tie para sistemas com potência-pico até 5 kWp são, geralmente, monofásicos. Para sistemas de maior potência, geralmente trifásicos. Existem, tanto grandes inversores centrais trifásicos, quanto inversores monofásicos, que podem ser agrupados, formando-se assim, um sistema trifásico. (BLUE-SOL, 2008, p. 64).

Figura 80: Inversores Grid-Tie



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Em BLUESOL (2008, p. 65) temos que para fornecer o máximo de energia à rede, o inversor grid-tie deve operar no ponto de máxima potência (MPP) do arranjo fotovoltaico. Como o MPP muda de acordo às condições climatológicas, o inversor deve possuir um sistema de seguimento do ponto de máxima potência (MPPT - sigla em inglês de maximum power point tracker), que ajusta automaticamente a tensão de entrada do inversor, de acordo à tensão MPP a cada instante. São funções do inversor grid-tie:

1. Converter a corrente contínua, gerada pelo arranjo fotovoltaico, em corrente alternada, de acordo com funcionamento da rede de distribuição;
2. Ajustar-se ao ponto de máxima potência (MPP) do arranjo fotovoltaico, conseguindo o seu maior rendimento;
3. Registro Operacional, guardando/transmitido os dados durante o seu funcionamento, através de displays, cartões de memória, transmissão direta a computador, etc.
4. Possuir dispositivos de proteção em CC e CA, como por exemplo: proteção contra curtos-circuitos (CC/CA), proteção contra inversão de polaridade, proteção contra sobrecargas e sobre tensões, proteção para a conexão com a rede.

Fabricantes de inversores grid-tie:

Até 10 kWp: Aixcon, ASP, Conergy, Dorfmler, Eletronica Santerno, Exendis, Fronius, G & H Elektronik, Ingeteam, Kaco, Karschny, Kyocera, Magnetek, Mastervolt, Pairan, Philips, Phoenixtec, RES, Siemens, SMA, Solar-Fabrik, Solar Konzept, Solarstoccc, Solarworld, Solon, Solutronic, Sputnik, Sun Power, Sunset, Sunways, Total Energy, UfE, Victron, Wiirth Solergy, Wuseltronik, Xantrex.

Acima de 10 kWp: ACE, Conergy, Eletronica Santerno, Energetica, Kaco, RES, SatCon, Siemens, SMA, Solar Konzept, Sputnik, Xantrex. (BLUE-SOL, 2008, p. 65).

### 3.8.1.1 Classificação e tipo de inversores Grid-Tie

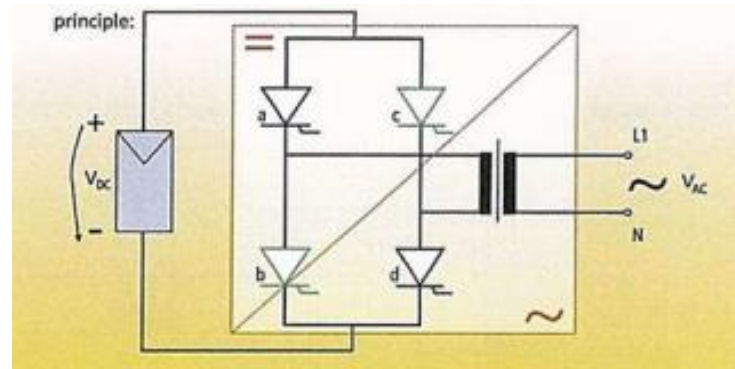
“De acordo ao seu modo de operação, os inversores grid-tie podem ser classificados em inversores controlados/chaveados pela rede e inversores autocontrolados.” (BLUE-SOL, 2008, p. 65).

#### 3.8.1.1.1 Inversores controlados/ Chaveados pela rede

A constituição básica de um inversor controlado/chaveado pela rede é um a de uma ponte de tiristores. O uso de inversores tiristorizados em sistemas de automação (ex: controladores de motores), levou ao uso de tiristores nos primeiros inversores para

uso fotovoltaico. Este tipo de inversor ainda é utilizado em sistemas de grande potência. Para os sistemas menores, com potências até 5 kWp, existem poucos fabricantes que ainda utilizam essa tecnologia. (BLUE-SOL, 2008, p. 65).

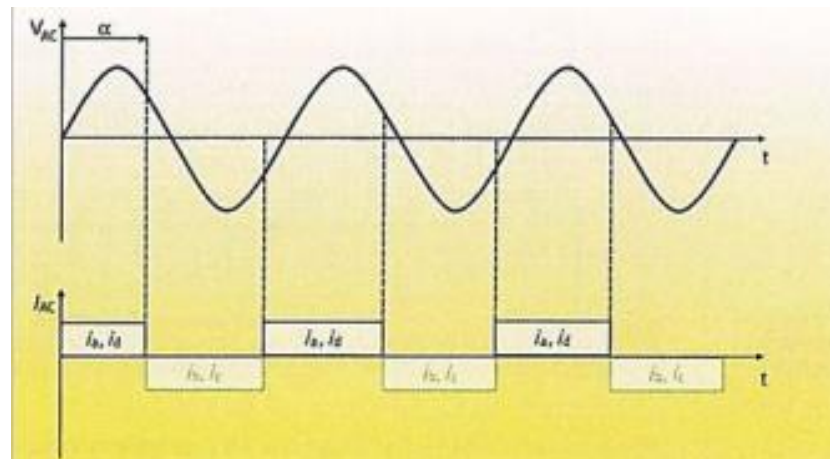
Figura 81: Inversor chaveado pela rede com ponte de tiristores



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

O inversor controlado pela rede utiliza a frequência e tensão da rede para chavear os tiristores, por isso o seu nome. Se houver uma queda na rede, o inversor desliga-se automaticamente, o que faz com que esse tipo de inversor não possa funcionar de modo autônomo. Durante o seu funcionamento são gerados pulsos de corrente de onda quadrada, por isso este tipo de inversor também é chamado de inversor de onda quadrada. (BLUE-SOL, 2008, p. 66).

Figura 82: Formato da tensão e da corrente de um inversor comutado pela rede



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

As diferenças da forma de onda senoidal da rede elétrica provocam o aparecimento de grandes distorções harmônicas e alto consumo de potência reativa. Devido a isso são utilizados filtros de saída e dispositivos para limitar os harmônicos. Para isolar a rede, é utilizado um transformador principal (de 50 Hz, para sistemas europeus). Nos inversores mais recentes, os pulsos são emitidos por um microprocessador. Retardando o impulso (controle por ângulo de fase) é possível implementar um sistema de MPPT. (BLUE-SOL, 2008, p. 66).

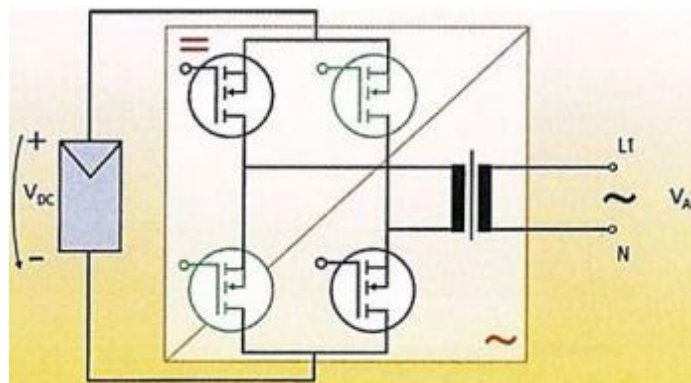


### 3.8.1.1.2 Inversores autorregulados (auto chaveados)

Na BLUESOL (2008, p. 66) observamos que nos inversores autorregulados são utilizados dispositivos semicondutores que podem ser ligados e desligados, em um circuito em ponte. De acordo ao nível de tensão e desempenho do sistema, podem ser utilizados os seguintes componentes:

- MOSFET (Transistores de efeito de campo de semicondutor de óxido metálico);
- Transístores bipolares;
- GTO (Tiristor de Desligamento Pela Porta – até 1kHz);
- IGBT (Transistor bipolar de porta isolada); (BLUE-SOL, 2008, p. 66).

Figura 83: Diagrama de ponte de MOSFET's em inversor chaveado



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Como consta em BLUESOL (2008, p. 67), através do princípio de modulação por largura de pulso (PWM) estes componentes eletrônicos conseguem reproduzir muito bem uma onda senoidal.

Através do chaveamento rápido do estado dos componentes em frequências em torno de 10-100 kHz, são formados pulsos, com duração e espaçamento semelhantes aos de uma onda senoidal. Após o uso de um filtro passa-baixa, teremos um sinal elétrico compatível com a rede.

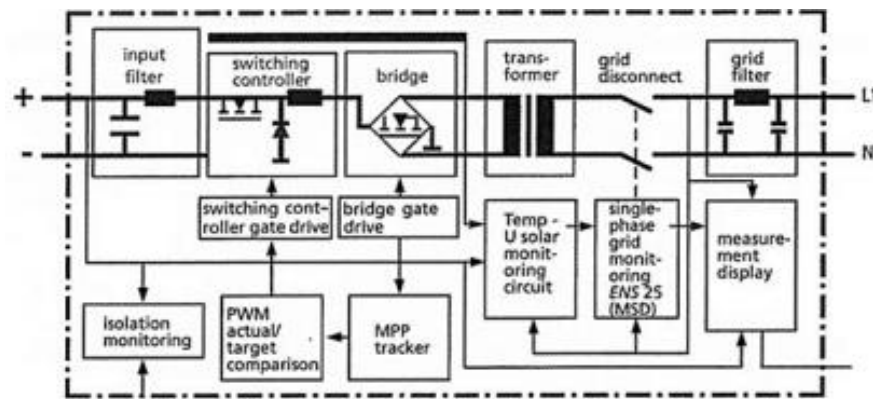
Devido à alta frequência de chaveamento para a formação dos pulsos, estes dispositivos criam interferências em alta frequência, exigindo medidas de compatibilidade eletromagnética (EMC), através do uso de circuitos de proteção e blindagem. Os inversores com a marca CE, e que possuem certificado de Conformidade com a Comunidade Européia (EC) geralmente mantêm os valores de EMC abaixo dos limites.

Os inversores auto chaveados são adequados, a princípio, para sistemas fotovoltaicos autônomos. Se forem conectados à rede, a frequência da potência injetada deve ser sincronizada com a da rede, gerando os pulsos de chaveamento de acordo com essa frequência. (BLUE-SOL, 2008, p. 67).

### 3.8.1.1.2.1 Inversores auto chaveados com transformador de baixa frequência (LF)

Nos inversores auto-chaveados e nos inversores chaveados pela rede, podem ser utilizados transformadores de baixa frequência (LF) – 50 Hz no padrão europeu para ajustar a tensão de saída com a tensão da rede. O campo magnético do transformador isola eletricamente o circuito CC do circuito CA. (BLUE-SOL, 2008, p. 67).

Figura 84: Diagrama de um inversor com um transformador



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Segundo BLUESOL (2008, p. 67 e 68), devido ao isolamento, o inversor permite que o arranjo fotovoltaico forneça tensões menores, torna desnecessário o aterramento conjunto do inversor e do arranjo fotovoltaico e reduz interferências eletromagnéticas.

As desvantagens são aumento da perda de potência e do tamanho e peso do inversor, fazendo com que alguns fabricantes utilizassem transformadores menores ou os eliminassem por completo. (BLUE-SOL, 2008, p. 67 e 68).

### 3.8.1.1.2.2 Inversores com transformadores de alta frequência (HF)

“Utilizando transformadores em alta frequência – 10-50 kHz, conseguem-se menores tamanhos, menores perdas, menor peso e menor custo. Entretanto, o circuito deste tipo de inversor é mais complexo, fazendo com que a diferença de preço não seja tão significativa.” (BLUE-SOL, 2008, p. 68).

### 3.8.1.1.2.3 Inversores sem transformadores

Para BLUESOL (2008, p. 68), para potências menores, temos os inversores sem transformadores, cujas vantagens são os menores: tamanho, peso, perdas e custo. Neste tipo de inversor, a tensão de entrada deve ser maior que a tensão de pico da rede, ou deve ser elevada através de um conversor CC/CC, geralmente integrado ao circuito do inversor que, infelizmente aumentam as perdas energéticas, diminuindo a vantagem de não possuir o transformador.

Como não possuem isolamento elétrico, necessitam de severas medidas de segurança na sua instalação, exigindo a instalação de dispositivos de proteção contra corrente residual, tanto do lado CC, quanto no lado CA. Deve-se observar que, durante o funcionamento dos sistemas fotovoltaicos com inversores sem transformador, formam-se correntes residuais capacitivas de mais de 30 mA entre os módulos e a terra, o que inviabiliza o uso de Interruptores Diferenciais Residuais (IDR) comuns, que desconectam em 30 mA. (BLUE-SOL, 2008, p. 68).

Quadro 14: Comparação entre os tipos de inversores

	Com Transformador	Sem Transformador
<b>Características</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensões de entrada e saída eletricamente isoladas</li> <li>• Muito difundido</li> <li>• A maioria dos Inversores Centrais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensão do arranjo PV deve ser maior que a da rede (ou usar Conversor CC/CC)</li> <li>• A maioria dos inversores de fileira</li> </ul>
<b>Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pode trabalhar com tensões reduzidas na entrada (V &lt; 120 V)</li> <li>• Menores interferências eletromagnéticas</li> <li>• Não necessita de ligação equipotencial ao ponto de aterramento do arranjo PV</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior eficiência (se não tem conversor CC/CC)</li> <li>• Menor peso</li> <li>• Menor volume</li> <li>• Instalação CC menor, (para os inversores de fileiras e de <i>módulos</i> CA)</li> </ul>
<b>Desvantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perdas no transformador</li> <li>• Maior peso</li> <li>• Maior volume</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de dispositivos de proteção adicionais</li> <li>• Flutuação do ponto de funcionamento</li> <li>• Instalação completa com Proteção Classe II</li> <li>• Maiores interferências eletromagnéticas</li> </ul>

Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

### 3.8.1.1.3 Características e propriedades dos inversores Grid-Tie

“A seguir veremos as principais características que se destacam nos inversores grid-tie comerciais.” (BLUE-SOL, 2008, p. 68).

#### 3.8.1.1.4 Eficiência de conversão (Conversion Efficiency) – $\eta_{CON}$

De acordo com BLUESOL (2008, p. 69), a Eficiência de Conversão representa as perdas na conversão direta de corrente contínua (CC), em corrente alternada (CA), compreendendo as perdas causadas pelo transformador – nos inversores que o possuem –, nos dispositivos chaveadores e o controlador, nos dispositivos de coleta de dados, etc.

$$\eta_{CON} = \frac{P_{CA}}{P_{CC}}$$

Onde:

PCA = Potência de Saída Efetiva;

PCC = Potência de Entrada Efetiva;

A Eficiência de Conversão é muito dependente da potência de entrada. A porcentagem também varia de acordo à tensão de entrada do inversor, um fato importante que foi desprezado por muito tempo. (BLUE-SOL, 2008, p. 69).

#### 3.8.1.1.5 Eficiência de Rastreamento (Tracking Efficiency) – $\eta_{TR}$

Ainda de acordo com BLUESOL (2008, p. 69), os primeiros inversores grid-tie possuíam um controle fixo – o ponto de operação do inversor era definido para determinado nível de tensão, e qualquer ajuste em função da variação de condições meteorológicas eram mais restritos.

Os modernos inversores atuais, para sistemas fotovoltaicos conectados à rede devem garantir uma perfeita adaptação às curvas características do arranjo fotovoltaico (curvas I-V), mesmo com as variações de Irradiância e temperatura, que mudam o Ponto de Máxima Potência (MPP). A capacidade do inversor de ajustar o seu ponto trabalho, é descrita pela Eficiência de Rastreamento.

$$\eta_{TR} = \frac{P_{CC}}{P_{PV}}$$

Onde:

PPV = Potência máxima instantânea do inversor

A flutuação do ponto de operação – causada pelo indesejado acoplamento da frequência da rede na parte CC – deve ser a menor possível, efeito mais evidente nos inversores sem transformador. (BLUE-SOL, 2008, p. 69).

### 3.8.1.1.6 Eficiência Estática (Static Efficiency) – $\eta_{INV}$

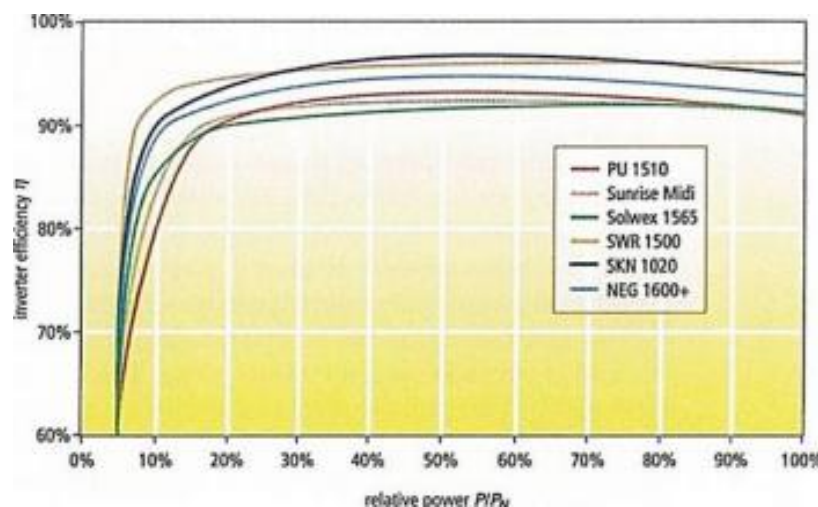
Vemos também em BLUESOL (2008, p. 69) que a Eficiência Estática é o produto da Eficiência de Conversão pela Eficiência de Rastreamento e pode ser calculada para vários regimes de carga.

$$\eta_{INV} = \eta_{CON} * \eta_{TR}$$

Geralmente, apenas a Eficiência De Conversão obtida durante condições nominais de operação é apresentada, como eficiência nominal, nas folhas de dados (data-sheets). Além disso, frequentemente, é exibida a eficiência máxima, que geralmente é entre 50% e 80% da potência nominal.

Essa máxima eficiência só é alcançada sob determinadas condições de Irradiância e temperatura, cujas variações são responsáveis pelo frequente funcionamento do inversor em estado parcial de carga e raramente em estado nominal. A relação entre a eficiência do inversor, tensão do arranjo fotovoltaico e o regime de carga tem alta influencia na produção anual de energia. (BLUE-SOL, 2008, p. 69).

Figura 85: Curvas características de vários inversores (especificações do fabricante)



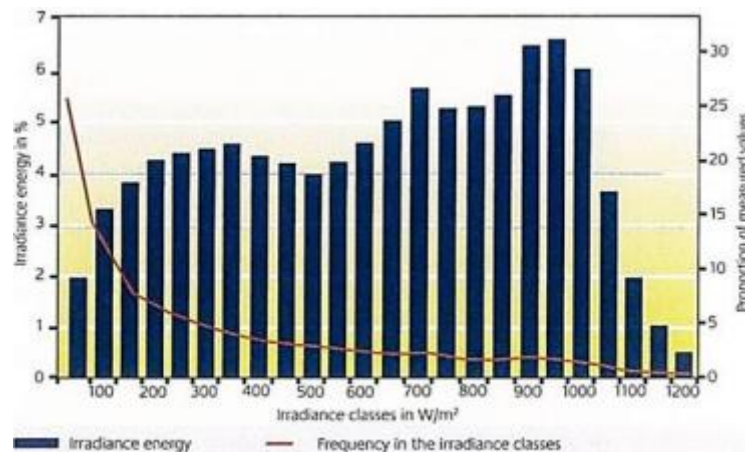
Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

“As curvas de eficiência são precisas sob determinada temperatura ambiente para o inversor e dependem da tensão de entrada.” (BLUE-SOL, 2008, p. 70).

### 3.8.1.1.7 Eficiência Européia (Euro Efficiency) – $\eta_{EURO}$

De maneira a facilitar a comparação entre inversores baseando-se na sua eficiência, foi criado um padrão europeu de medição da eficiência, a Eficiência Europeia (Euro), que é calculada para um típico clima europeu. A figura abaixo mostra a frequência e a energia de diferentes classes de radiação solar em um ano típico na Alemanha (lembre-se que é eficiência européia). (BLUE-SOL, 2008, p. 70).

Figura 86: Frequência e energia de diferentes classes de irradiância, baseado em um sistema inclinado em 30° em Munique, Alemanha



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Segundo BLUESOL (2008, p. 70 e 71), observamos que, nessa região, raramente há irradiâncias em torno de 800 W/m², o que faz os inversores funcionarem em regime parcial. Considerando diferentes cenário de carga, a Eficiência Euro é calculada através da média de eficiências estáticas em 6 regimes – carga nominal e mais cinco cargas parciais:

$$\eta_{EURO} = (0,03 * \eta_{5\%}) + (0,06 * \eta_{10\%}) + (0,13 * \eta_{20\%}) + (0,1 * \eta_{30\%}) + (0,48 * \eta_{50\%}) + (0,2 * \eta_{100\%})$$

Os valores  $\eta_n\%$  representam as eficiências estáticas –  $\eta_{100\%} = 100\%$  de eficiência,  $\eta_{5\%} = 5\%$  de eficiência. Os valores como 0,03 ou 0,48 representam a fração do ano em que o inversor está na eficiência indicada – em 48% do tempo estará funcionando com 50% da eficiência.

Apesar de a Eficiência Euro oferecer um bom parâmetro de comparação entre inversores, é um conceito não muito aplicável em território brasileiro, devido às diferenças entre as condições climatológicas e de Irradiância solar. (BLUE-SOL, 2008, p. 70 e 71).

### 3.8.1.1.8 Comportamento em sobrecarga

De acordo com BLUESOL (2008, p. 71), em sistemas que não tem uma correta orientação que maximize a captação da energia solar – como sistema de integração arquitetônica (BIPV) – ou que estejam sujeitos a sombreamentos parciais, pode ser interessante subdimensionar o inversor, desde que este possua uma reação adequada à sobrecarga, que pode ser:

1. Variação do ponto de operação;
2. Limitação da potência;
3. Desligamento/corte;

Quando o inversor recebe uma potência superior à sua nominal, seus componentes estarão sujeitos a uma forte carga térmica, o que ativa o sistema de limitação de potência (no caso 2). Quando é atingida a temperatura limite dos componentes, alguns inversores se desligam (caso 3), outros ativam exaustores e/ ou variam o ponto de trabalho. Os tipos 1 e 2 são os adequados a subdimensionamentos nas condições descritas acima. (BLUE-SOL, p. 71).

### 3.8.1.1.9 Registro de dados operacionais

A maioria dos fabricantes oferecem sistemas de aquisição dos dados de operação dos inversores, geralmente integrados a estes, ou com dispositivos externos que apresentam diretamente os dados ou os envia para um computador, permitindo a avaliação dos sistemas fotovoltaicos, em muitos casos em tempo real. (BLUE-SOL, 2008, p. 71).

Figura 87: Dispositivos de aquisição de dados para inversores SMA



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

De acordo com BLUESOL (2008, p. 71), em geral os dispositivos coletam as seguintes informações:

- Entrada: Tensão VDC, corrente I DC e potência PDC
- Saída: tensão VAC, corrente I AC, potência PAC e frequência f]
- Tempo de operação
- Volume de energia gerada
- Status e falhas

Os mais novos modelos possuem ainda, interfaces mais modernas, como USB, Bluetooth e Wi-Fi, permitindo a comunicação de um dispositivo com os que estão próximos, e a unificação mais simples dos dados de vários aparelhos. (BLUE-SOL, 2008, p. 71).

### 3.8.1.1.10 Outras Características dos Inversores Grid-Tie

“As tabelas abaixo demonstram as características que costumam aparecer nas tabelas de dados dos inversores grid-tie, e são de extrema importância na hora de escolher o melhor dispositivo para determinado sistema fotovoltaico.” (BLUE-SOL, p. 72).

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Descrição
<i>POTÊNCIAS</i>			
Potência Nominal CC	$P_{n\ DC}$	W	Potência fotovoltaica para a qual o inversor foi dimensionado.
Potência Máxima Fotovoltaica	$P_{DC\ max}$	W	Máxima potência fotovoltaica que o inversor aceita.
Potência Nominal CA	$P_{n\ AC}$	W	Potência CA que o inversor pode fornecer de modo contínuo.
Máxima Potência CA	$P_{AC\ max}$	W	Máxima potência em CA que o inversor pode fornecer por tempo limitado.
Eficiência Parcial	$\eta_{5\%}$	%	Eficiência parcial com 5% da potência CC nominal.
	$\eta_{10\%}$	%	Eficiência parcial com 10% da potência CC nominal.
	$\eta_{20\%}$	%	Eficiência parcial com 20% da potência CC nominal.
	$\eta_{30\%}$	%	Eficiência parcial com 30% da potência CC nominal.
	$\eta_{50\%}$	%	Eficiência parcial com 50% da potência CC nominal.
	$\eta_{100\%}$	%	Eficiência parcial com 100% da potência CC nominal.
	$\eta_{110\%}$	%	Eficiência parcial com 110% da potência CC nominal.
Eficiência Euro	$\eta_{EURO}$	%	Veja sessão 7.1.2.4
Eficiência por diferença de temperatura	$\Delta\eta_T$	%/C	Redução da eficiência por temperatura ambiente acima de 25°C.
Fator de Potência	$\cos \varphi$		Fator de controle da potência reativa, que dever ser maior que <b>0,9</b> .
Potência de ativação	$P_{ON}$	W	Potência fotovoltaica para <i>ligar</i> o inversor.
Potência de desativação	$P_{OFF}$	W	Potência fotovoltaica onde o inversor é automaticamente desligado.
Potência em <i>Stand-By</i>	$P_{STAND-BY}$	W	Energia (da rede) consumida pelo inversor em modo de espera, antes de entrar no modo noturno.
Potência noturna	$P_{NIGHT}$	W	Energia (da rede) consumida pelo inversor em modo noturno.



TENSOES			
Tensão CC Nominal	$V_{nDC}$	V	Tensão fotovoltaica para a qual o inversor foi desenvolvido.
Faixa de Tensões MPP	$V_{MPP}$	V	Intervalo de tensões de entrada onde o inversor segue o ponto de máxima potência
Tensão CC Máxima	$V_{DCmax}$	V	Tensão fotovoltaica máxima que o inversor suporta.
Tensão de desligamento	$V_{DCoff}$	V	Mínima tensão fotovoltaica para a qual o inversor ainda opera.
Faixa de Tensão CA	$V_{AC}$	V	Faixa de tensão da rede em que o inversor opera, se ajustando automaticamente.
Tensão CA Nominal	$V_{nAC}$	V	Tensão nominal do inversor, que para os padrões europeus é 230 V.

CORRENTES			
Corrente CC Nominal	$I_{nDC}$	A	Corrente fotovoltaica para a qual o inversor é dimensionado.
Corrente DC Máxima	$I_{DCmax}$	A	Máxima corrente fotovoltaica que o inversor suporta na entrada.
Corrente CA Nominal	$I_{nAC}$	A	Máxima corrente que o inversor injeta na rede de distribuição de modo contínuo.
Corrente CA Máxima	$I_{ACmax}$	A	Injetada na rede em curto período.
Fator de Distorção Harmônica	$K$	%	Fator de qualidade da corrente e/ou tensão injetada na rede. Calculada a partir da razão entre o valor RMS das componentes harmônicas e a fundamental. Deve ser inferior a 5%.

OUTROS			
Nível de Ruído		dB(A)	De acordo ao tipo e classe de desempenho, vários níveis de ruído em operação podem ser gerados, o que deve ser considerado na escolha do local de instalação.
Dimensões/Volume	$h, l, w$	m ou mm	Altura (height), largura (width), profundidade (length).
Faixa de temperatura	$T$	°C	Em relação à classe de desempenho e tipo, há várias faixas de temperatura de funcionamento, que devem ser consideradas na hora da escolha do inversor.

### 3.8.2 Painel fotovoltaico para sistemas On-Grid

Segundo BLUESOL (2008, p. 74), a configuração elétrica do painel fotovoltaico está intimamente ligada à forma de trabalho do inversor Grid-Tie escolhido para o projeto do sistema.

A configuração mais comum atualmente é a de alta tensão de entrada para os inversores sem transformador. Os inversores de fileira (string-inverters), com potências nominais entre 1 kWp e 3 kWp, que requerem fileiras (strings) com associações de 6 a 18 módulos, são os mais utilizados em instalações residenciais ou comerciais de pequeno e médio porte. Deve ser levada em consideração a tensão máxima suportável pelos módulos que é, geralmente, em torno de 600 V.

Os painéis fotovoltaicos para inversores sem transformador necessitam de um sistema de proteção elétrica mais aprimorado, mas alguns fabricantes já incorporam em seus produtos

essas proteções, ficando para a equipe de instalação montar as caixas de junção de fileiras ou painéis. (BLUE-SOL, 2008, p. 74).

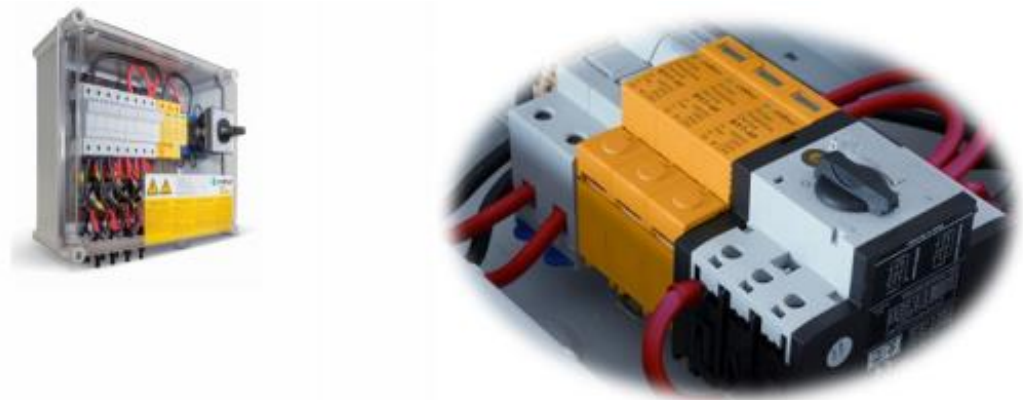
### 3.8.2.1 Caixas de junção

Segundo a BLUESOL (2008, p. 74 e 75), essas caixas estanques terão em seu interior todos os elementos de proteção das fileiras e módulos:

- Fusíveis, que protegerão os cabos de excessos de corrente.
- Diodos de bloqueio, que protegerão as fileiras e módulos em casos de sombreamento parcial.
- Dispositivos de proteção contra surtos, imprescindíveis tanto do lado CC (painel fotovoltaico), quanto do lado CA (rede de distribuição).
- Interruptor DC, que permita o desligamento do painel ou fileira para tarefas de manutenção.

Para facilitar a conexão dos módulos em um painel, alguns fabricantes de materiais elétricos possuem entre seus produtos, caixas de junção prontas. Estas caixas de junção já vêm com todos os elementos de proteção, dentro de uma caixa estanque, que está de acordo às várias normas internacionais. (BLUE-SOL, 2008, p. 74 e 75).

Figura 88: Caixa de junção comercial



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

“As caixas de junção podem ser de fileiras (string-box) ou de painel/arranjo (array-box) e já possuem os terminais para a conexão direta dos cabos, utilizando os conectores padrão MC3, MC4 ou Tyco. A grande maioria já possui o interruptor geral DC.” (BLUE-SOL, 2008, p. 75).

### 3.8.2.2 Configurações e conceitos

Segundo BLUESOL (2008, p. 75), os sistemas fotovoltaicos on-grid são limitados pela área disponível. Isto quer dizer que, durante a concepção do sistema, é possível a arquitetura de sistemas de qualquer tamanho e capacidade. Nos países que possuem incentivos à inserção de energias renováveis, a capacidade instalada pode influenciar no preço da eletricidade, o que faz os projetistas tomarem cuidados especiais quanto à potência instalada.

Vejamos agora alguns conceitos de sistemas fotovoltaicos, que podem ser utilizados como base para vários projetos. (BLUE-SOL, 2008, p. 75).

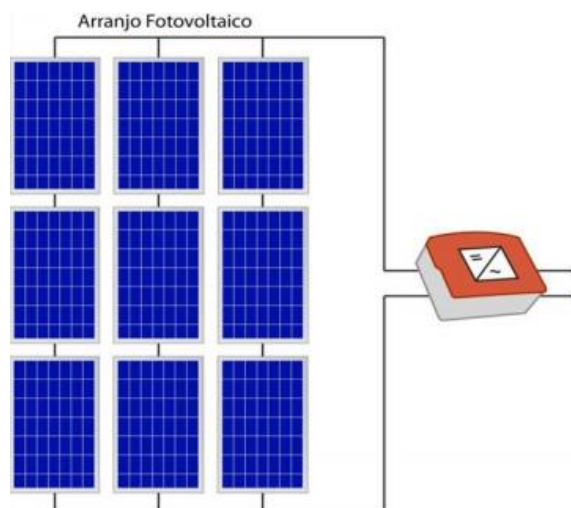
#### 3.8.2.2.1 Sistemas com inversor central

“Nos sistemas com inversor central, um único inversor toma conta do arranjo fotovoltaico. Podem ser classificados de acordo à forma como o inversor (ou inversores) são integrados ao projeto.” (BLUE-SOL, 2008, p. 75).

##### 3.8.2.2.1.1 Sistema com baixa tensão de entrada (<120 VCC)

É utilizado com inversores com transformador. As correntes elétricas são maiores, mas as tensões são menores. Por possuírem fileiras com menos módulos, são menos prejudicados pelos sombreamentos parciais. Devido à grande quantidade de fileiras em paralelo, tem maiores perdas de corrente e demandam cabeamento com maior seção transversal. (BLUE-SOL, 2008, p. 75).

Figura 89: Sistema com Inversor central com transformador

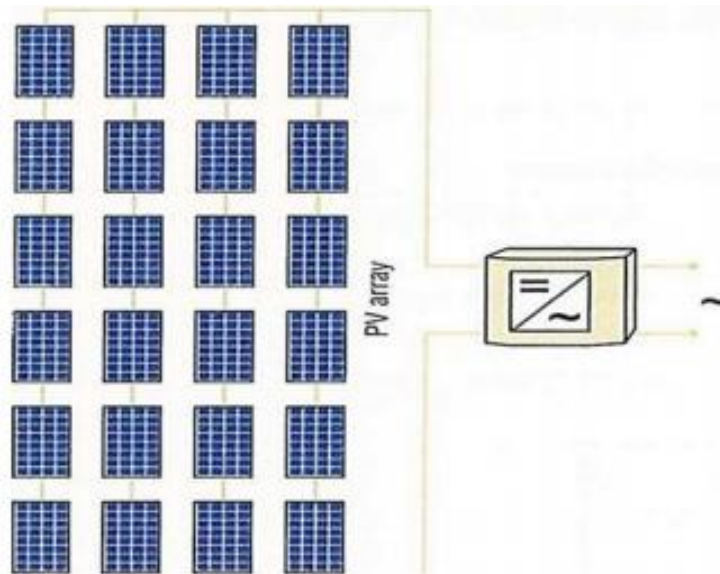


Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

### 3.8.2.2.1.2 Sistemas com Alta Tensão de Entrada (>120 VCC)

Utilizado com os inversores sem transformador. As tensões são maiores, com maior risco de choque elétrico. As correntes são menores, o que reduz as perdas por efeito Joule e a bitola dos cabos. (BLUE-SOL, 2008, p. 76).

Figura 90: Sistema com alta tensão de entrada (120 VCC)



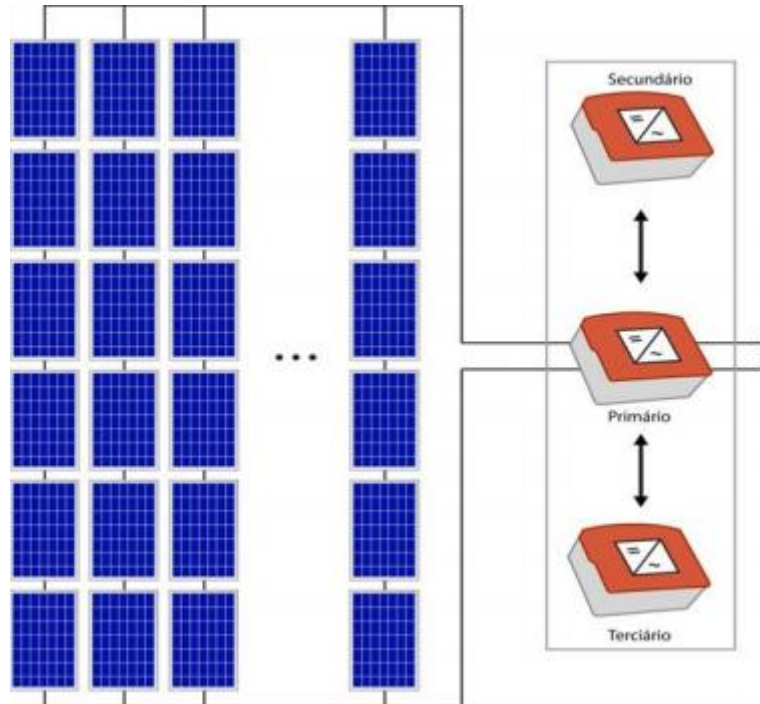
Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Neste tipo de configuração são necessários sistemas de proteção Classe II, devido à ausência do isolamento proporcionado pelo transformador. Também sofrem mais com os sombreamentos parciais, pois as fileiras são muito longas, e caso um módulo venha a receber sombra, uma parcela muito grande da potência do painel deixa de ser gerada (a fileira inteira pode funcionar abaixo do esperado). (BLUE-SOL, 2008, p. 76).

### 3.8.2.2.1.3 Sistema Mestre-Escravo (Master-Slave)

No caso de sistemas grandes, é possível o uso de vários inversores que entram em funcionamento de acordo ao nível de Irradiância Solar. Um dos inversores está ligado o tempo todo e, à medida que aumenta o potencial solar, ativa os demais inversores, que também são desativados em caso de baixa Irradiância. Para evitar o excessivo desgaste de apenas um inversor, acontece automaticamente um revezamento de qual inversor é o master. (BLUE-SOL, 2008, p. 77).

Figura 91: Sistema com configuração master-slave



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

#### 3.8.2.2.2 Sistemas de grupos de módulos

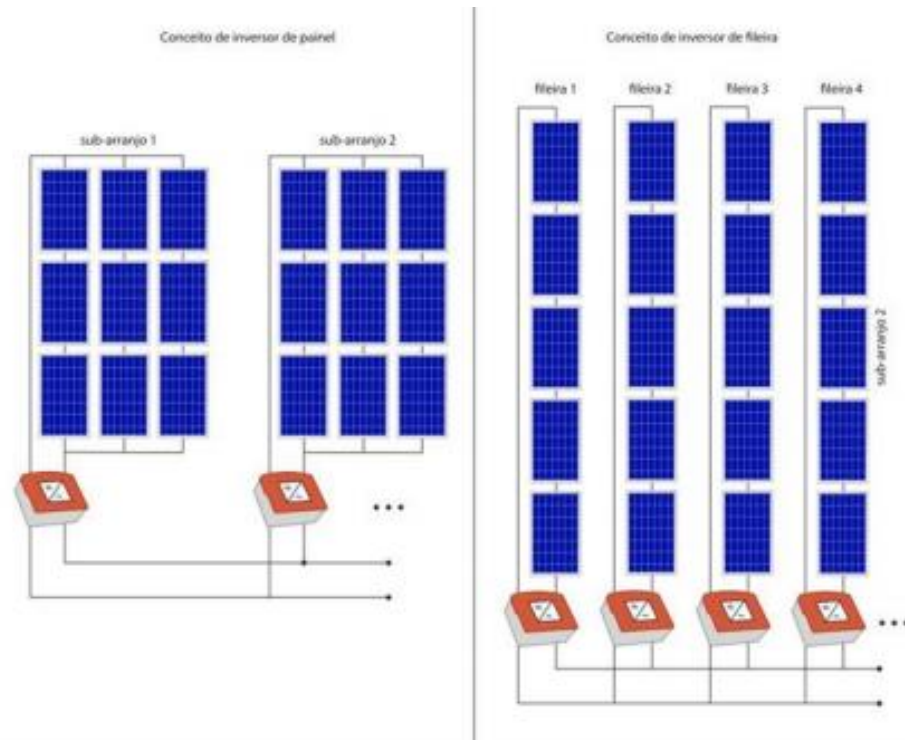
Segundo BLUESOL (2008, p. 77), no caso de arranjos com painéis de diferentes orientações, inclinações ou sombreamentos parciais, é recomendável o uso de um inversor para cada grupo, o que permite um melhor aproveitamento das condições de irradiação. As principais vantagens desse tipo de sistema são listadas a seguir:

- Omissão da caixa de junção PV
- Omissão do cabo principal DC
- Redução no cabeamento para as ligações em série

Os inversores são instalados, geralmente, próximos aos painéis. Devido a isso devem ter alto grau de proteção – IP65. Mesmo considerando-se essa proteção, as condições de climáticas mais adversas podem causar falhas e diminuir a vida útil dos inversores. Por isso é recomendável que sejam instalados em local protegido da radiação solar direta e de outras intempéries.

A utilização de inversores de grupos de módulos facilita a instalação dos sistemas fotovoltaicos e reduz, em certos casos, os custos de instalação. (BLUE-SOL, 2008, p. 77).

Figura 92: Sistemas de grupos de módulos



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

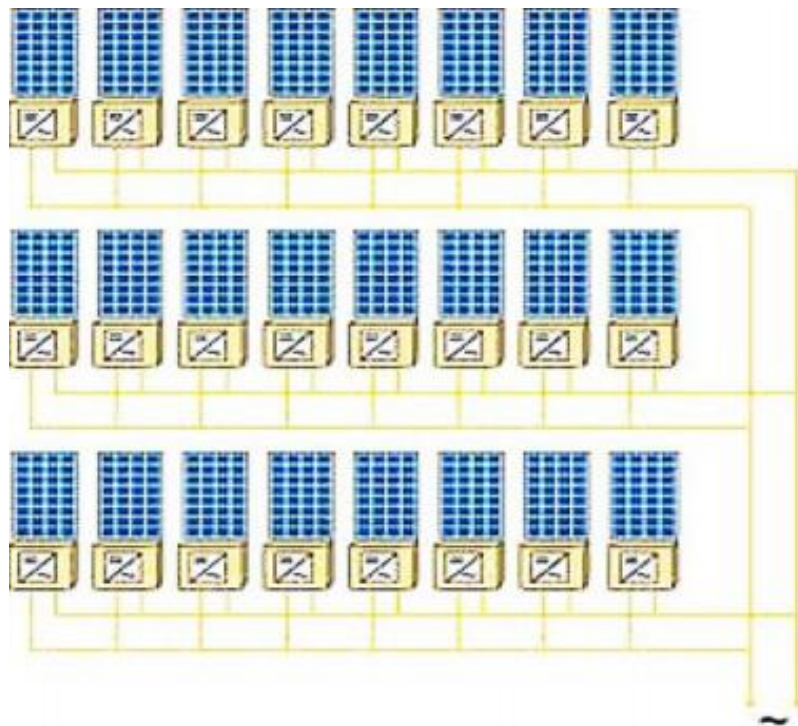
“Sistema até 3 kWp são, em sua grande maioria, concebidos no conceito de grupos (ou cadeias) de módulos, utilizando inversores de fileiras (string-inverters).” (BLUE-SOL, 2008, p. 78).

#### 3.8.2.2.3 Sistemas com módulos CA

De acordo com BLUESOL (2008, p. 78), nesse tipo de sistema é utilizado um inversor para cada módulo, constituindo um módulo CA, já disponível no mercado. Existem inversores de tamanho reduzido o bastante para caber na caixa de conexão do módulo. Cada módulo tendo seu próprio inversor permite que trabalhem em seu ponto de máxima potência individualmente, o que não acontece em outras configurações. Outra vantagem está na modularidade, que permite uma expansão do sistema que em outros conceitos não seria tão simples.

Como desvantagem dos módulos CA, podemos citar a menor eficiência dos micro-inversores em relação aos de grupos de módulos e seu preço ainda proporcionalmente superior ao dos inversores convencionais. Esse conceito é interessante para o caso de sistemas fotovoltaicos integrados à arquitetura em que são mais comuns os sombreamentos parciais. (BLUE-SOL, 2008, p. 78).

Figura 93: Sistemas com módulos CA



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Figura 94: Micro inversores para módulos PV



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

### 3.9 Sistemas fotovoltaicos autônomos

“Um sistema fotovoltaico isolado (off-grid) é aquele que não está em contato com a rede elétrica da concessionária. Um sistema isolado pode ser feito numa cidade sem problema algum. O “isolado” do nome diz respeito também ao afastamento da rede elétrica.” (BLUE-SOL, 2008, p. 81).

### 3.9.1 Pannel fotovoltaico

O pannel fotovoltaico para sistemas autônomos é configurado para fornecer tensões entre 12 e 48 volts, sendo as tensões de 12 V e 24 V as mais comuns, enquanto a tensão de 48 Volts é utilizada em sistemas maiores. O pannel é dimensionado para fornecer o potencial elétrico para um dia médio de uso. Essa energia será armazenada em baterias ou utilizada imediatamente, no caso dos sistemas fotovoltaicos sem armazenamento. (BLUE-SOL, 2008, p. 81).

Figura 95: Pannel fotovoltaico 24 V de sistema autônomo



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

“Geralmente são utilizados módulos de 36 ou 72 células, que tem as tensões nominais adequadas para os controladores de carga sem MPPT. Além disso, os módulos para sistemas isolados, não possuem, em sua grande maioria, cabos de conexão com conectores padrão.” (BLUE-SOL, 2008, p. 81).

### 3.9.2 Banco de baterias

Um banco de baterias é constituído por uma quantidade calculada de elementos conectados em serie e/ou paralelo, que fornecerão a potência demandada pelas cargas, no período de autonomia em que devem funcionar sem receber recarga do arranjo fotovoltaico nos dias sem insolação. (BLUE-SOL, 2008, p. 81).



Figura 96: Banco de baterias em uma grande central PV



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

### 3.9.2.1 Funções do banco de baterias

Segundo BLUESOL (2008, p. 82), em sistemas isolados, as baterias têm as seguintes funções:

- **Autonomia:** essa é a função mais importante, que é suprir a energia para os consumos, quando o painel não é capaz de gerar energia suficiente. Isso acontece todas as noites, e também nos períodos chuvosos ou nublados, que podem variar durante o dia.

- **Estabilizar a tensão:** os módulos fotovoltaicos têm uma grande variação de tensão, de acordo com a irradiância recebida. A conexão de cargas de consumo diretamente aos módulos pode expô-los a tensões muito altas ou muito baixas para o seu funcionamento. As baterias possuem uma faixa de tensões mais estreita que os módulos fotovoltaicos, e garantirão uma faixa de operação mais uniforme para as cargas.

- **Fornecer correntes elevadas:** a bateria opera como um buffer, fornecendo correntes de partida elevadas. Alguns dispositivos (como motores) requerem altas correntes (de 4 até 9 vezes a corrente nominal) para iniciar o seu funcionamento, estabilizando e utilizando correntes mais baixas depois de alguns segundos. Outros dispositivos mais vorazes entrarão em funcionamento por curto período de tempo, mas consumirão muita potência. As baterias fornecerão essa alta potência momentânea, e serão carregadas lentamente pelo painel fotovoltaico durante o dia. (BLUE-SOL, 2008, p. 82).

### 3.9.2.2 Baterias para sistemas fotovoltaicos

Em BLUESOL (2008, p. 82) vemos que as baterias para uso fotovoltaico costumam ser de chumbo-ácido ou de níquel-cádmio. As baterias de níquel-cádmio suportam descargas maiores e tem maior vida-útil, mas seu alto custo e baixa disponibilidade as tornam viáveis em sistemas muito específicos que necessitam de alta confiabilidade.

Outros tipos de baterias, como as de Íons de Lítio, não são viáveis para sistemas fotovoltaicos, devido à capacidade dos bancos de baterias para essa aplicação. É a relação custo-benefício que faz com que as baterias de chumbo-ácido sejam as escolhidas para a maioria dos sistemas PV isolados.

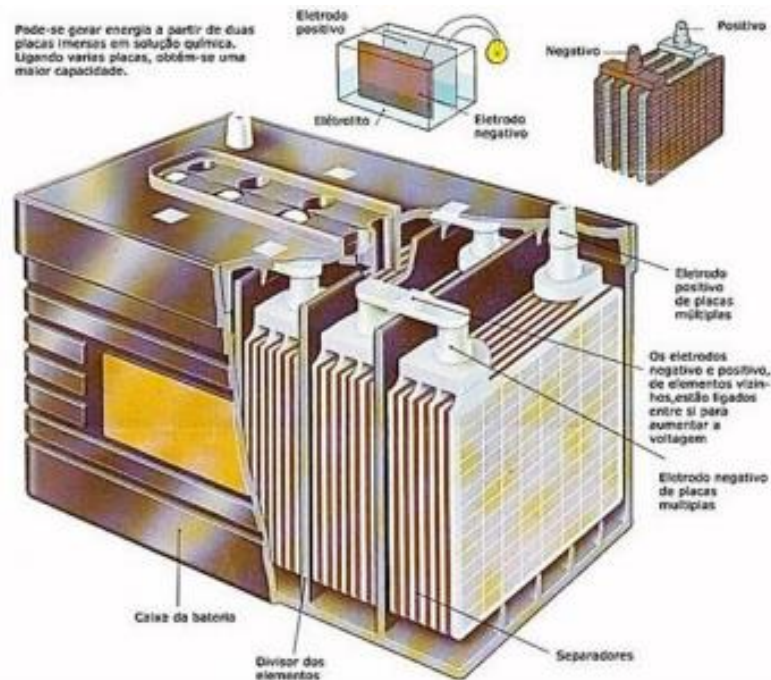
Como são as mais utilizadas, as baterias de chumbo-ácido serão o objeto do nosso estudo a partir de agora. (BLUE-SOL, 2008, p. 82).

#### 3.9.2.2.1 Constituição e funcionamento de uma Bateria de Chumbo Ácido

Segundo BLUESOL (2008, p. 82 e 82), baterias de chumbo-ácido são constituídas de células individuais – também chamadas de pilhas – com tensão nominal de 2 V cada uma, que nas baterias em monobloco são ligadas em série para alcançar a tensão nominal. (6 células constituem uma bateria de 12 volts).

Cada célula é constituída basicamente por duas placas de metais diferentes (uma positiva, outra negativa) isoladas por separadores e imersas em uma solução aquosa de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). As placas são eletrodos de chumbo em formato de grade com a função de segurar a matéria ativa e conduzir a corrente elétrica. É a matéria ativa porosa que armazena a energia, com sua estrutura esponjosa fornecendo área de superfície para a reação eletroquímica. Na bateria carregada, a matéria ativa da placa negativa é o chumbo (Pb) e a matéria ativa da placa positiva é o dióxido de chumbo ( $PbO_2$ ). (BLUE-SOL, 2008, p. 82 e 83).

Figura 97: Bateria de chumbo-ácido



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Ao se fechar um circuito, os elétrons fluem do polo negativo para o polo positivo, provocando uma reação química entre as placas e o ácido sulfúrico, que leva à formação de sulfato de chumbo ( $\text{PbSO}_4$ ) nas duas placas – reação chamada de dupla sulfatação – que consome o ácido, tornando o eletrólito mais aquoso, processo que pode ser medido com um densímetro. (BLUE-SOL, 2008, p. 83).

Quadro 15: Estado de carga de uma bateria pela densidade do eletrólito.

Estado de Carga	Densidade do Eletrólito
100% (plena carga)	1,225 g/cm <sup>3</sup>
90%	1,216 g/cm <sup>3</sup>
80%	1,207 g/cm <sup>3</sup>
70%	1,198 g/cm <sup>3</sup>
60%	1,189 g/cm <sup>3</sup>
50%	1,180 g/cm <sup>3</sup>
40%	1,171 g/cm <sup>3</sup>
30%	1,162 g/cm <sup>3</sup>
20%	1,153 g/cm <sup>3</sup>
10%	1,144 g/cm <sup>3</sup>
0%(descarga total)	1,135 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Quando o sistema PV recarrega a bateria, os elétrons fluem em sentido contrário – do polo positivo para o polo negativo – revertendo a reação química. O processo não é totalmente reversível, pois pequenas quantidades de sulfato de chumbo não se dissolvem, processo chamado de sulfatação que aumenta à medida que os ciclos de carga e descarga acontecem, diminuindo a capacidade da bateria. Quanto maior for a profundidade de descarga – o nível de reação química que acontece durante a descarga, antes que a bateria volte a ser carregada – maior será a perda de capacidade. Com profundidades de descarga menores, mais ciclos de carga e descarga a bateria suportará. (BLUE-SOL, 2008, p. 83 e 84).

Figura 98: Expectativa de vida útil de uma bateria pela profundidade de descarga



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Em BLUESOL (2008, p. 84) vemos que a resistência interna de uma bateria de chumbo-ácido varia de acordo à carga, sendo maior quando a bateria está descarregada devida à menor concentração de ácido no eletrólito e à presença do sulfato de chumbo nas placas. À medida que a bateria vai sendo carregada, a sua resistência interna diminui, fazendo com que a bateria aceite melhor a carga. Por isso uma bateria com menor profundidade de descarga durante o ciclo é recarregada mais rapidamente.

Quando atinge a tensão sinal de carga nas células, a bateria deve ser desconectada do carregador, pois se inicia um processo de eletrólise da água presente no eletrólito que leva a dois inconvenientes:

1 – Perda de água, que faz o ácido se concentrar mais, se tornando nocivo às placas até a secagem total que determinaria o fim da bateria.

2 – Liberação de oxigênio e hidrogênio. Esse último, mesmo em pequenas proporções torna o ambiente potencialmente explosivo, o que faz com que os bancos de baterias devam ser instalados em locais ventilados. O hidrogênio é 14 vezes mais leve que o ar e pode se acumular em frestas. (BLUE-SOL, 2008, p. 84).

Quadro 16: Estado de carga de uma bateria pela tensão entre os terminais

Estado de carga	Tensão em Circuito Aberto
100% (plena carga)	12,72 V
90%	12,48 V
80%	12,42 V
70%	12,30 V
60%	12,18 V
50%	12,06 V
40%	11,88 V
30%	11,76 V
20%	11,58 V
10%	11,34 V
0% (descarga total)	10,50 V

Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

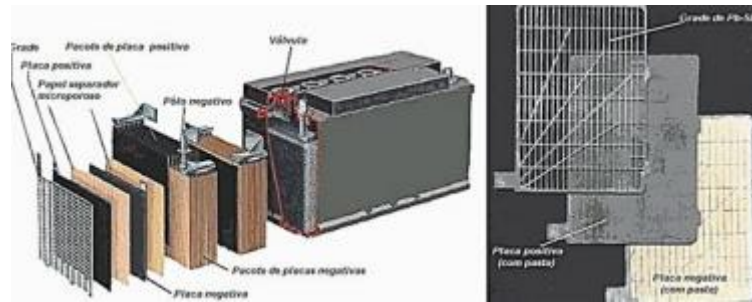
#### 3.9.2.2.2 Tipos de Baterias de Chumbo-Ácido

Vemos em BLUESOL (2008, p. 85), que de acordo ao tipo de eletrólito e a tecnologia de construção das placas, as baterias de chumbo ácido pode ser classificadas em:

- **Baterias de Eletrólito Líquido:** as baterias mais comuns em instalações fotovoltaicas, são compostas pelas placas e pelo eletrólito em estado líquido. Essa é a concepção das baterias automotivas, produzidas em larga escala, por isso são as mais baratas e facilmente encontradas no mercado. Nas baterias automotivas, chamadas de baterias de partida ou SLI, sigla em inglês para Starting-Lighining-Igniion, os eletrodos positivos e negativos são grades onde são depositados as matérias ativas, chumbo e dióxido de chumbo. Essas baterias utilizadas para a partida de motores — que requerem altas correntes (até 200 A) por alguns segundos — não são adequadas para sistemas fotovoltaicos, pois são construídas para fornecerem apenas uma fração da sua capacidade (até 10%) em descargas muito altas e períodos muito curtos. Suas placas são mais finas e em maior número, além do eletrólito possuir maior teor de ácido. Se forem submetidas a profundidade de descarga maior que 50%, podem falhar em poucos dias.

As baterias para sistemas fotovoltaicos são desenvolvidas para funcionamento intermitente. Diferenciam-se das anteriores pela sua capacidade de suportar muitos ciclos de descarga, com descarga profunda. Possuem placas com mais matéria ativa e em menor número, e o ácido é menos concentrado. Devido a esses fatores, esse tipo de bateria não é recomendado para a partida de motores, ou mesmo para uso em veículos elétricos. (BLUE-SOL, 2008, p. 85).

Figura 99: Bateria de eletrólito líquido

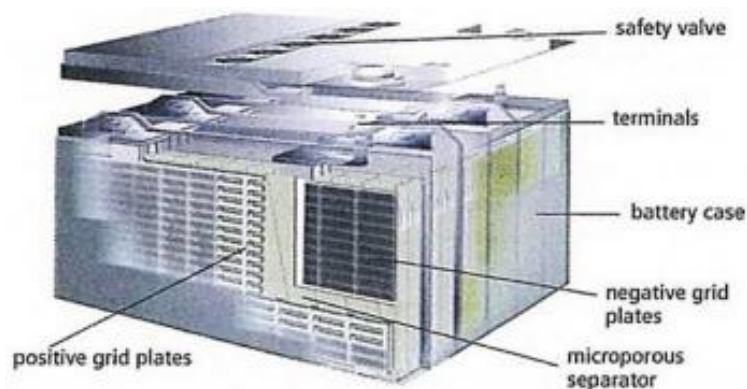


Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Vemos ainda em BLUESOL (2008, p. 85) que baterias de eletrólito imobilizado: possuem o eletrólito imobilizado, seja na forma de gel (com a adição de dióxido de silício), ou pelo sistema AGM (Absorbed Glass Material), nas quais o eletrólito está em forma cristalina envolto em esponjas de fibra de vidro.

Ao contrário das baterias de eletrólito líquido, as baterias de eletrólito imobilizado não necessitam serem instaladas em locais ventilados, pois são fechadas e possuem um sistema com válvula de segurança que limitam a saída dos gases liberados em casos de sobrecargas, por isso são chamadas também de baterias de chumbo-ácido reguladas por válvula (VRLA, do inglês: Valve Regulated Lead Acid). Não requerem a reposição de água, por isso são seladas e não necessitam de manutenção. Os controladores de carga devem ser específicos ou ajustados para trabalhar com as baterias de eletrólito imobilizado, pois estas não podem receber sobrecargas. São baterias com grande vida útil, geralmente o dobro da vida útil das baterias de eletrólito líquido, sob as mesmas condições de profundidade de descarga. Devido a tais características, são mais caras que as baterias comuns. (BLUE-SOL, 2008, p. 85).

Figura 100: Bateria de eletrólito imobilizado (VRLA)



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Ainda em BLUESOL (2008, p. 86), baterias estacionárias de placa tubular (OPzS e OPzV): são as baterias certas para sistemas robustos, de uso permanente em períodos entre 10 a 20 anos.

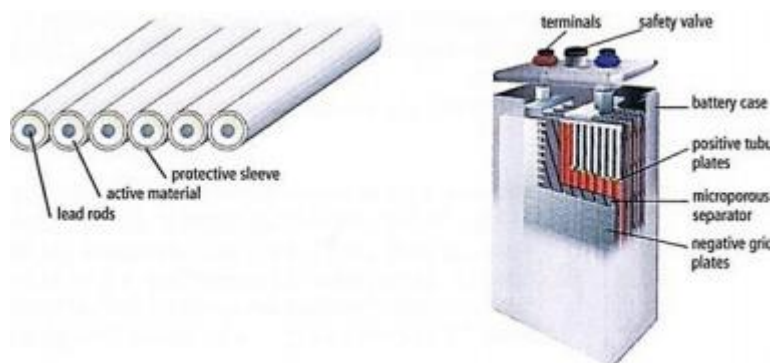
Podem ser do tipo OPzS, sigla em alemão (Ortsfeste Panzerplate Spezial) que significa Placa Tubular Estacionária Especial, com eletrólito líquido e separadores especiais; ou do tipo OPzV (Ortsfeste Panzerplate Verschlossen) que significa Placa Tubular Estacionária Selada, que tem eletrólito em gel e reguladas por válvula.

A diferença entre essas baterias e as anteriores está na forma dos eletrodos positivos, que são tubulares, com tubos permeáveis em torno das varetas, através dos quais circula o eletrólito. Esses tubos mantem a matéria ativa confinada, evitando alguns dos efeitos do envelhecimento das baterias (veja 8.2.4), aumentando o tempo de vida das baterias.

Estas baterias têm vida útil muito superior às baterias comuns, mas são mais volumosas, mais pesadas e tem maior custo de instalação, inclusive nos preços comerciais muito superiores a outros tipos de baterias.

As baterias OPzS necessitam de manutenção em períodos de 6 meses a 3 anos, enquanto as baterias OPzV não requerem manutenção durante a sua vida útil. (BLUE-SOL, 2008, p. 86).

Figura 101: Eletrodos positivos de uma bateria OPzS

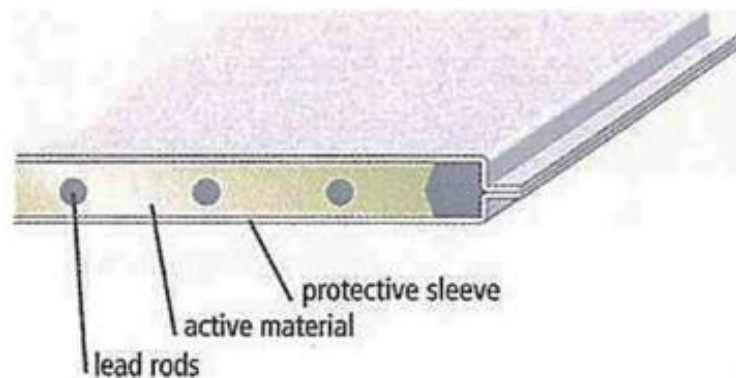


Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Vemos em BLUESOL (2008, p. 86 e 87) que baterias de bloco com placas positivas planas (Blocos OGi): as baterias OGi (do alemão: Ortsfeste Giterplatten, que significa: Placas Estacionárias Radiais) são do tipo estacionária, com os eletrodos positivos em formato de placa plana com uma configuração que está entre a das baterias de grade e as baterias de eletrodo tubular. As varetas encaixadas em um protetor comum, que possibilita a fabricação de placas planas mais baratas que as tubulares, mas com vida útil muito maior. Os eletrodos negativos de uma bateria de bloco são em formato de grade.

As baterias OGi alcançam 1300 ciclos com profundidade de descarga de 75% e 4500 ciclos com 30% de Pd. Devido à grande reserva de ácido no vaso, a manutenção será necessária em períodos entre 3 a 5 anos. São muito utilizadas nos sistemas PV autônomos na Europa, pois conseguem ser recarregadas mesmo com baixas correntes. (BLUE-SOL, 2008, p. 86 e 87).

Figura 102: Placa positiva de bateria OGi



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

As baterias estacionárias podem ser disponibilizadas em monobloco (quando os vasos que compõem a bateria estão dentro de uma carcaça única) ou em vasos independentes (quando temos vários vasos, geralmente transparentes que devem ser ligados em série para alcançar a tensão nominal). Os vasos têm maior capacidade de carga (em Ampère hora), mas a tensão é menor (2 volts nominais, nas baterias de chumbo-ácido) e são os mais indicados para sistemas muito grandes. As baterias especiais para sistemas fotovoltaicos (OPzS, OPzV e OGi) são disponibilizadas, geralmente, em formato de vasos transparentes. Baterias especiais, pela sua tecnologia, são desenvolvidas para vida útil entre 10 e 20 anos. As baterias monobloco tem vida útil entre 2 e 5 anos. (BLUE-SOL, 2008, p. 87).

Figura 103: Vaso de 2V e bateria monobloco de 12V



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).



É possível, mas não é recomendável, a conexão de baterias em paralelo para aumento de corrente. Como os elementos podem ter envelhecimento não uniforme, podem surgir correntes parasitas entre as baterias. Em instalações de baixa potência, esse efeito não é tão nocivo quanto em instalações de alta potência. Recomenda o número máximo de 6 conexões em paralelo. Por motivo de segurança, recomenda-se pelo menos 2 blocos em paralelo. (BLUE-SOL, 2008, p. 87).

### 3.9.2.3 Desempenho e Características das Baterias de Chumbo-Ácido

Em BLUESOL (2008, p. 87, 88 e 89) encontramos alguns termos relativos às baterias que devemos considerar, no momento de projetar um banco de baterias:

- Carga/Descarga: processo de conversão da energia elétrica em energia química e vice-versa.

Durante o processo de carga a tensão da bateria aumenta gradativamente e, depois de certo valor, inicia-se o processo de gaseificação (eletrólise e liberação dos gases). Próximo da tensão de gaseificação, o fabricante determina o valor máximo de tensão para a carga da bateria, depois do qual o processo de carga é interrompido. Essa é a função do Regulador de Carga, que aplica ainda a tensão correta de acordo à temperatura ambiente.

À medida que a bateria se descarrega a tensão diminui. Cai rapidamente no início devido às perdas ôhmicas, depois cai continuamente até o fim da carga, quando cai rapidamente e atinge o valor limite a partir do qual a concentração do ácido diminui muito e começam os efeitos nocivos da sulfatação (citado abaixo).

- Capacidade: é a quantidade de carga elétrica que uma bateria pode fornecer até ficar totalmente descarregada. A capacidade é o produto da descarga constante ( $I_n$ ) pelo tempo de descarga ( $t_n$ ):

$$C_n = I_n * t_n.$$

É a forma e o número de pilhas ligadas em paralelo que determinam a capacidade de uma bateria. Esse valor depende da temperatura de operação, da tensão final e principalmente da corrente de descarga. Com correntes de descarga menores, a deposição do sulfato nas placas acontece vagarosamente, o que permite maior penetração do sulfato. Com maiores correntes de descarga a deposição do sulfato acontece mais rapidamente, as moléculas se depositam no começo das placas e atrapalham as moléculas seguintes. Ou seja, é possível retirar mais energia da bateria quando é feita uma descarga lenta, do que quando é feita uma descarga rápida. É por isso que a capacidade nominal ( $C_n$ ) da bateria tem que ser especificada de acordo à corrente de descarga, ou de acordo ao tempo de descarga.

o Capacidade nominal  $C_n$ : quantidade de carga extraível de uma bateria (ou elemento) em  $n$  horas, em uma temperatura média de  $25^\circ\text{C}$ , e determinada corrente, até que a tensão da bateria caia para  $1,8\text{ V/elemento}$  ( $10,5\text{ V}$  numa bateria monobloco de  $12\text{ V}$  nominais). Se a capacidade total de uma bateria for utilizada em 10 horas, será drenada uma corrente muito maior do que se a descarga for feita em um período de 100 horas. Uma bateria de  $C_{100} = 100\text{ Ah}$ , pode ser descarregada em 100 horas com uma corrente de  $1\text{ A}$ . Se dessa bateria for drenada uma corrente de  $8\text{ A}$ , ela atingirá a tensão final em 10 horas. Sua capacidade em  $C_{10}$  será de  $80\text{ Ah}$  ( $C_{10} = 80\text{ Ah}$ ). O fabricante é quem indica qual é a capacidade nominal da bateria, sendo que para as baterias estacionárias (para sistemas de backup) é de  $C_{10}$ , para baterias de partida é de  $C_{20}$  e para as baterias fotovoltaicas é de  $C_{100}$ .

o Capacidade útil: capacidade utilizável da bateria. É o produto da capacidade nominal pela profundidade de descarga.

- Profundidade de Descarga: quociente entre a carga extraída e a capacidade nominal de uma bateria, expressa em porcentagem. A máxima profundidade de descarga, em uma bateria de chumbo-ácido, deve ser de  $80\%$ . Acima disso, a bateria pode não se recuperar e ser recarregada novamente.

- Auto descarga: perda de carga da bateria quando esta está em circuito aberto. É provocada pela constante reação química no interior da bateria. Geralmente é expressa em porcentagem, medida por mês. A auto descarga é maior ou menor, segundo a temperatura no ambiente das baterias. Devido à essa perda energética, baterias não podem ser armazenadas, ou deixadas sem recarga, em sistemas fotovoltaicos de uso esporádico.

- Ciclo: sequência completa de carga e descarga da bateria em determinada profundidade de descarga. Quanto menor a profundidade de descarga, mais ciclos uma bateria suporta. Um ciclo é aberto quando a bateria começa a se descarregar, e é fechado quando a bateria é completamente recarregada. Em um sistema fotovoltaico que não recebeu suficiente radiação solar, o banco de baterias não será completamente carregado e o ciclo continua, com profundidade de descarga maior.

- Corrente: assim como a capacidade, é determinada baseando-se no período descarga/descarga da bateria:

$$I_{20} = C_{20}/20\text{ h}$$

$$I_{100} = C_{100}/100\text{ h (BLUE-SOL, 2008, p. 87, 88 e 89).}$$

### 3.9.2.4 Efeitos do envelhecimento nas baterias

Vemos em BLUESOL (2008, p. 89) que o grande inconveniente das baterias é a sua curta vida útil, entre 2 e 6 anos (de 10 a 15 anos, para as baterias fotovoltaicas especiais). Os motivos da vida útil reduzida são os processos de envelhecimento sofridos pelos elementos. Esses processos reversíveis ou não, que podem se influenciar e intensificar mutuamente, são listados a seguir:

- Estratificação do Eletrólito (reversível): com o processo de carga e descarga, o ácido no eletrólito tende a descer para o fundo da bateria, devido à sua maior densidade em relação à água que é liberada no processo. Durante o processo de recarga, o ácido vai se recombinando com a água, mas continua mais concentrado na parte inferior, provocando maior diferença de potencial e maior desgaste na parte inferior das células. Para evitar a estratificação é recomendável uma pequena gaseificação controlada do eletrólito, através de uma carga de equalização, que consiste em uma sobrecarga por curto período. Os controladores de carga mais sofisticados são capazes de aplicar cargas de manutenção. Caso o sistema PV não disponha desse tipo de controlador, o técnico pela manutenção deve portar um carregador ou transportar a bateria para essa tarefa. Baterias de eletrólito imobilizado não sofrem esse efeito e não podem receber as cargas de equalização, que as danificaria, além de outros riscos operacionais.

- Corrosão (irreversível): a corrosão da grade de chumbo do polo positivo é causada pelo alto potencial positivo, que provoca o aumento da resistência da grade. Ocorre com mais frequência quando a tensão ultrapassa os 2,4 V ou fica abaixo dos 2,0 V. As escamas de material corroído que caem das placas podem provocar curtos-circuitos.

- Sulfatação (Irreversível): Se a bateria não for suficientemente carregada depois de uma descarga, começam a se formar cristais de sulfato que não são mais convertidos em chumbo ou óxido de chumbo durante a recarga. Com isso a matéria ativa diminui e junto, a capacidade de carga da bateria. A parte inferior da célula é a mais afetada, pois raramente recebe uma recarga total.

- Sedimentação (irreversível): a variação de volume durante os processos de carga e descarga provoca o desprendimento de matéria ativa que, com a formação de gás no eletrólito fica solto e cai no fundo do vaso. Se o espaço entre o fundo e as placas for pequeno, esses pedaços de matéria ativa podem causar curto-circuito entre as placas.

- Baterias de eletrólito imobilizado não sofrem desse problema.

- Secagem (irreversível): se ocorrer a gaseificação total do eletrólito e a água (destilada) não for repostada, a bateria secará e não funcionará mais.

Baterias de eletrólito imobilizado não sofrem desse problema. (BLUE-SOL, 2008, p. 89).

### 3.9.2.5 Cuidados com baterias estacionárias

Em BLUESOL (2008, p. 89 e 90) vemos que para uma maior vida útil do banco de baterias, alguns cuidados devem ser tomados:

- Evitar descargas diárias maiores que 30% de profundidade.
- Evitar descargas no fim da autonomia maiores que 60%.
- Sempre instalar as baterias em locais ventilados (exceto as de eletrólito imobilizado) e de acesso restrito.
- Conferir periodicamente o nível de eletrólito das baterias úmidas, pois a secagem do eletrólito determina o fim da bateria.
- Manter os terminais limpos e apertados, evitando aumento de resistência ou possibilidade de curto-circuito causado pelo acúmulo de sujeira úmida.
- Usar EPI durante o trabalho com as baterias. As baterias são a maior fonte de perigo numa instalação PV autônoma. As medidas de segurança são aplicadas tanto à parte elétrica, quanto à parte química, pois o ácido sulfúrico é nocivo para seres humanos e para o meio ambiente, podendo provocar sérias queimaduras em contato com a pele. Os olhos e narinas devem estar protegidos durante o manuseio das baterias. As baterias de eletrólito imobilizado têm a vantagem serem menos críticas quanto à segurança.
- Fazer manutenção periódica, no mínimo a cada 6 meses, ao utilizar baterias de eletrólito úmido. Nas baterias de eletrólito imobilizado é recomendável a manutenção anual.
- Evitar baterias automotivas para a concepção do banco de baterias, pois não são adequadas e terão que ser substituídas em períodos muito curtos.

Quanto à reciclagem, o Brasil já tem legislação que exige que o fabricante recolha uma bateria para cada unidade vendida.

O chumbo e a carcaça podem ser reciclados para a criação de uma nova unidade, enquanto os restos de ácido podem ser tratados antes de serem depositos. Esses procedimentos minimizam o impacto ambiental de se utilizar as baterias de chumbo para acumular energia em instalações fotovoltaicas autônomas. (BLUE-SOL, 2008, p. 89 e 90).

### 3.9.3 Controlador/regulador de cargas

Ainda em BLUESOL (2008, p. 90), em um sistema fotovoltaico autônomo, a tensão do arranjo fotovoltaico deve ser compatível com a tensão nominal do banco de baterias, que costuma ser de 12 V, 24 V, ou 48 V.

O controlador (ou regulador) de carga/descarga aumenta o rendimento do sistema fotovoltaico e a vida útil (quantidade de ciclos) das baterias. As tensões de carga e equalização devem ser maiores que a tensão nominal, podendo ser em torno de 14,4 V numa bateria com tensão nominal de 12 V. Módulos standard, com 36 a 40 células fotovoltaicas de silício cristalizado, geram tensões nominais entre 15 V e 18 V. Com o aumento da temperatura, a tensão dos módulos PV diminui, mas ainda assim deve ser maior que a tensão de carga das baterias. Quando a temperatura é menor, a tensão em ponto de máxima potência ( $V_{mpp}$ ) do módulo citado acima será de aproximadamente 21 V e a tensão em circuito aberto será de 25 V, ultrapassando o limite máximo de tensão para recarga das baterias. Um controlador de carga mede a tensão das baterias e as protege de sobrecargas indevidas, de uma das seguintes formas:

- Desconectando o arranjo fotovoltaico quando sua tensão ultrapassa a tensão limite para recarga, como fazem os controladores em série.
- Aplicando um curto-circuito no arranjo PV através de um controlador shunt.
- Ajustando a tensão do arranjo, como fazem os controladores com MPPT.

Quando o nível de irradiância é baixo, o nível de tensão do arranjo PV será inferior à das baterias, fazendo com que as baterias se descarreguem nos módulos. Para evitar isto, os controladores possuem diodos de bloqueio integrados. (BLUE-SOL, 2008, p. 90).

Figura 104: Controladores de carga



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

Consta em BLUESOL (2008, p. 91) que as funções fundamentais de um controlador de carga são:

- Controle da perfeita recarga do banco de baterias.

- Proteção contra sobrecargas indevidas.
- Proteção contra descarga excessiva (acima de 80%, ou ajustável).
- Informação do nível de carga do banco de baterias.

O melhor funcionamento das baterias para um longo período de vida, requer certa inteligência dos controladores de carga, que devem se adequar as tensões de carga, ao nível de carga, idade, temperatura de operação e tipo (gel, eletrólito líquido, etc.) de bateria.

Como a tensão de recarga deve variar em função da temperatura, os controladores de carga devem possuir um sensor, que se for integrado ao controlador, esse deve ser instalado próximo ao banco de baterias. Em alguns modelos o sensor é externo, permitindo sua instalação sobre as baterias. Os controladores de carga e descarga possuem um sistema de Desconexão em Baixa Tensão (LVD — Low Voltage Disconnect), que protegem as baterias de descargas excessivas que evitam profundidades de descarga maiores que 80%. Essa proteção é ativa quando a tensão do banco de baterias cai abaixo de determinado valor, e pode ser ajustado em alguns modelos de controladores.

Os controladores suportam correntes limitadas, tanto de entrada (do arranjo fotovoltaico), quanto de saída (das cargas CC). Possuem fusíveis de proteção para os componentes sensíveis contra o excesso de corrente e, geralmente possuem o mesmo limite tanto na entrada quanto na saída. Os controladores comerciais têm capacidade que vão de 5 A até 60 A. Para arranjos fotovoltaicos maiores, podem ser utilizados vários controladores em paralelo, ou o arranjo é dividido em painéis menores ligados ao mesmo banco de baterias. Esta última configuração dá mais segurança e flexibilidade ao sistema pois, no caso de falha de um dos painéis, os demais continuam fornecendo potencial. Nos dois casos, não é recomendado o uso de controladores diferentes. (BLUE-SOL, 2008, p. 91).

### 3.9.3.1 Formas de controle de carga

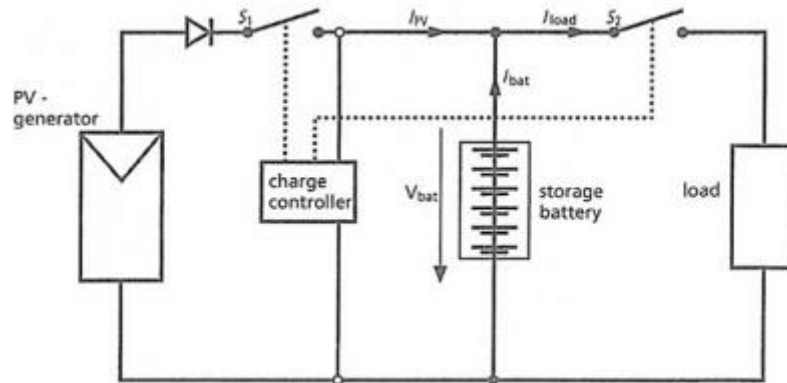
“De acordo à forma como controlam a carga do banco de baterias, os controladores podem ser classificados em: controladores série, controladores shunt ou controladores com MPPT. Vejamos o funcionamento de cada um desses tipos.” (BLUE-SOL, 2008, p. 92).

#### 3.9.3.1.1 Controladores Série

Quando o banco de baterias alcança a tensão máxima de carga, esse tipo de controlador desconecta o arranjo fotovoltaico através de um relê ou uma chave de estado sólido, voltando a conectar o arranjo PV quando a tensão cai para determinado

valor. Essas conexões e desconexões criam uma oscilação de tensão próxima à tensão máxima de carga, mas também cria perdas de energia. (BLUE-SOL, 2008, p. 92).

Figura 105: Esquema de funcionamento de um controlador de carga do tipo série

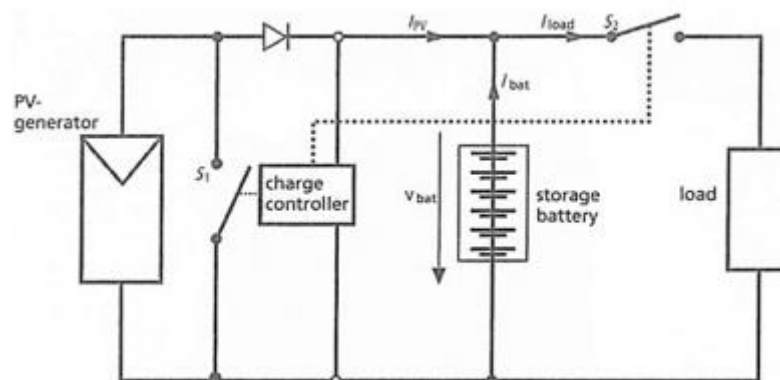


Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

### 3.9.3.1.2 Controladores Shunt

Um controlador shunt reduz continuamente a potência do arranjo fotovoltaico, a partir do momento em que a tensão máxima de carga é alcançada. Como o arranjo continua gerando energia, a corrente excedente é usada como corrente de curto circuito no arranjo PV, que pode trabalhar em curto circuito – sofrendo apenas um leve aumento de temperatura. Este é o método ideal para as baterias, pois a recarga é feita de forma segura e eficiente. (BLUE-SOL, 2008, p. 92).

Figura 106: Esquema de funcionamento de um controlador de carga do tipo Shunt



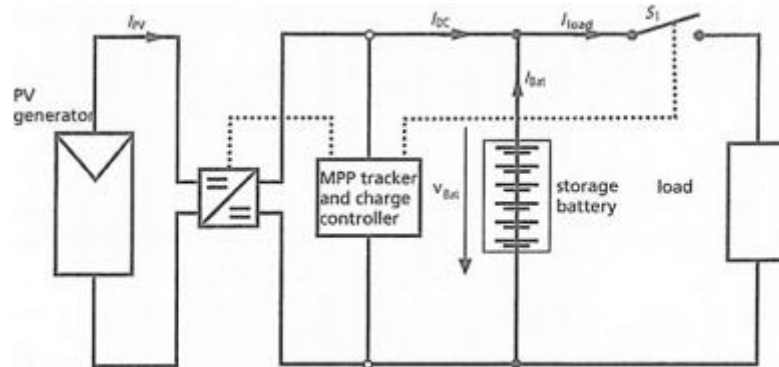
Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

### 3.9.3.1.3 Controladores com MPPT

Como é a tensão das baterias que determina o ponto de operação do arranjo fotovoltaico, fazendo com estes trabalhem fora do ponto de máxima potência na maior parte do tempo, os controladores de carga do tipo shunt ou série nem sempre conseguem aproveitar o máximo da energia solar disponível. As perdas energéticas

podem ficar entre 10% e 40%, de acordo à tensão das baterias, da irradiância e da temperatura. Essas perdas podem ser evitadas ao se utilizar um sistema de seguimento do ponto de máxima potência (MPPT) que é, basicamente, um conversor DC/DC regulado. A regulação é feita por um MPPT que a cada 5 minutos (aproximadamente) estuda a curva característica I-V do arranjo fotovoltaico e determina o ponto de máxima potência, regulando o conversor DC/DC para aproveitar ao máximo a potência do arranjo e ajustando-o em função da tensão de carga das baterias. A eficiência do conversor DC/DC está em torno de 90% a 96%. (BLUE-SOL, 2008, p. 93).

Figura 107: Esquema de funcionamento de um controlador com MPPT



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

O uso de controladores MPPT só é eficiente em sistema com potência pico superior a 200Wp, pois em potências menores as perdas no conversor DC/DC são maiores que os ganhos. Devido à maior complexidade e sofisticação do circuito eletrônico, os controladores MPPT são mais caros que os controladores do tipo Série ou Shunt, e seu uso é benéfico em sistema com potência pico superior a 500Wp. (BLUE-SOL, 2008, p. 93).

### 3.9.3.2 Critérios de Seleção de um Controlador

Como podemos ver em BLUESOL (2008, p. 93), na hora de escolher o regulador/controlador para um sistema fotovoltaico, levamos em consideração:

- Tensão Nominal do Sistema PV: o controlador deve ter tensão nominal igual à tensão do banco de baterias, que é a tensão nominal do sistema fotovoltaico, que é quem determina o modo de associação dos módulos fotovoltaicos e das baterias.
- Corrente de Curto Circuito do Arranjo Fotovoltaico: os controladores devem ser capazes de receber a totalidade de corrente enviada pelo arranjo fotovoltaico, que é a corrente de curto-circuito. A corrente de curto-circuito do arranjo é a soma das correntes dos módulos ligados em paralelo. Deve-se considerar um fator de segurança entre 10% e 25%, e a ligação de fusíveis entre o arranjo PV e o controlador de carga.



- Corrente de Saída: no caso de cargas CC ligadas ao controlador, deve-se considerar um fator de segurança entre 10% e 25% para a corrente que vai das baterias para essas cargas. Para calcular a corrente de saída, somam-se as correntes de partida de todas as cargas que funcionarão simultaneamente.

Fabricantes de controladores de carga: ATT TBB, Heliotrope, Mastervolt, Meyer Solar Technologic, Morningstar, Phocos, Reusolar, Schams Electronic, Solarwat, Steca, SunSelector, Sun Ware, Trace, Uhlmann Solarelectronic, Xantrex. (BLUE-SOL, 2008, p. 93).

### 3.9.4 Inversores autônomos

Nos sistemas fotovoltaicos, a geração, armazenamento e disponibilização da eletricidade é na forma de corrente contínua (CC). Para a utilização de aparelhos que funcionam com corrente alternada (CA) é necessário um conversor que transforme a corrente contínua com tensões entre 12 V e 48 V, em corrente alternada com tensões de 127 V ou 240 V. Essa é a função dos Inversores Autônomos, utilizados em sistemas fotovoltaicos isolados. (BLUE-SOL, 2008, p. 94).

Figura 108: Inversores para uso fotovoltaico



Fonte: (BLUE-SOL, 2008).

#### 3.9.4.1 Características dos inversores autônomos

De acordo com BLUESOL (2008, p. 94 e 95), as características desejáveis para a escolha de um bom inversor para um sistema fotovoltaico autônomo são listadas abaixo:

- Boa eficiência na conversão elétrica: É recomendado que o(s) inversor(es) tenha(m) eficiência acima de 80%. A eficiência máxima de um inversor acontece, geralmente, quando este está fornecendo entre 50% e 70% de sua capacidade nominal contínua. Inversores mais sofisticados conseguem altas eficiências mesmo quando parcialmente carregado, ou com carga próxima à máxima nominal.

- Alta capacidade de sobrecarga: um inversor deve ser capaz de fornecer uma potência instantânea bem maior que a potência nominal, o que permitirá a partida de dispositivos elétricos

que consumam alta corrente de partida (ex.: motores), sem a necessidade de super dimensionar o inversor na fase de projeto.

- Tolerância para as flutuações de tensão das baterias: durante os processos de carga e descarga, a tensão das baterias varia de tal maneira, que pode ser nociva a dispositivos mais sensíveis.

- Baixo autoconsumo: (quando em stand-by) e detecção automática de cargas.

- Proteção contra curto-circuito na saída CA.

- Alta proteção eletromagnética.

- Baixa distorção harmônica: se refere à qualidade da forma de onda de saída da corrente alternada. Quanto menor a distorção, mais qualidade tem a corrente de saída.

- Proteção contra surtos.

Alguns inversores possuem um sistema de controle que lhes permite carregar o banco de baterias por uma fonte de energia elétrica em corrente alternada. Esses inversores, chamados de inversor-carregador, não são inversores grid-tie e não podem ser utilizados em sistema on-grid.

#### Tipos de Inversores

De acordo ao formato de onda de saída os inversores autônomos podem ser classificados em:

- Inversores de onda quadrada: São os mais baratos. A onda de saída tem uma grande quantidade de harmônicos indesejados, que geram interferências em alguns aparelhos, e também perdas de potência. Costumam ser utilizados com cargas pequenas (ex.: tv's, notebooks, etc.) e não são adequados para motores. Tem distorção harmônica que pode chegar a até 40%, e rendimentos em torno de 60%.

- Inversores de onda senoidal modificada: São os que apresentam a melhor relação custo-benefício. O formato da onda de saída não é uma senóide pura, mas se aproxima muito. Podem alimentar quase todo tipo de carga, mas não são recomendados para aparelhos eletrônicos mais delicados. Tem distorção harmônica em torno de 20%, e rendimentos em torno de 90%.

- Inversores de onda senoidal pura: São os que têm formato de onda de saída igual à rede elétrica das concessionárias. São indicados pra alimentar dispositivos eletroeletrônicos mais sensíveis e atualmente estão sendo mais utilizados que os outros tipos de inversores. Não apresentam problemas quanto a distorções harmônicas ou estabilidade da tensão. São mais caros que os inversores de onda quadrada ou senoidal modificada. (BLUE-SOL, p. 94 e 95).

### 3.9.4.2 Critérios de Seleção de Inversor Autônomo

Finalmente, segundo BLUESOL (2008, p. 95), fontes de energia em corrente contínua de 12 V ou 24 V alcançam seus limites quando é necessário alimentar cargas mais poderosas ou quando é necessário um segmento de cabo muito comprido. Baixas tensões requerem altas correntes para fornecerem o mesmo potencial elétrico, e isso determina o uso de cabeamento com grande seção transversal. Soma-se a estes fatores a não disponibilidade da maioria dos eletrodomésticos e outros aparelhos em corrente contínua. Em alguns casos, o sistema de iluminação fica mais eficiente, se alimentado por um inversor.

Em sistemas fotovoltaicos autônomos (isoladas) o inversor é conectado diretamente à bateria, desde que possua sistema de desconexão por baixa tensão (LVD). Esses inversores são, geralmente, monofásicos em tensão de 110/115 volts (padrão americano) com frequência de 60 Hz, e tensão nominal de entrada de 12 e 24 volts. Temos no mercado grande disponibilidade de inversores em várias potências, que vão desde alguns Watts até quilowatts. Os inversores para potências maiores que 500 W geralmente possuem tensão de entrada de 24 V. Inversores acima de 5 kW de potência, geralmente, tem tensões de entrada igual ou maior que 48 V. Os inversores influenciam diretamente a tensão nominal do sistema fotovoltaico, pois não é recomendável utilizar um conversor CC/CC, o que baixaria o rendimento global do sistema PV.

Para a escolha da potência nominal do inversor, utilizamos a seguinte equação:

$$P_I = \sum W_{AC} * F_S$$

Onde:

PI = Potência nominal do inversor

WAC = Potência das cargas CA ligadas simultaneamente

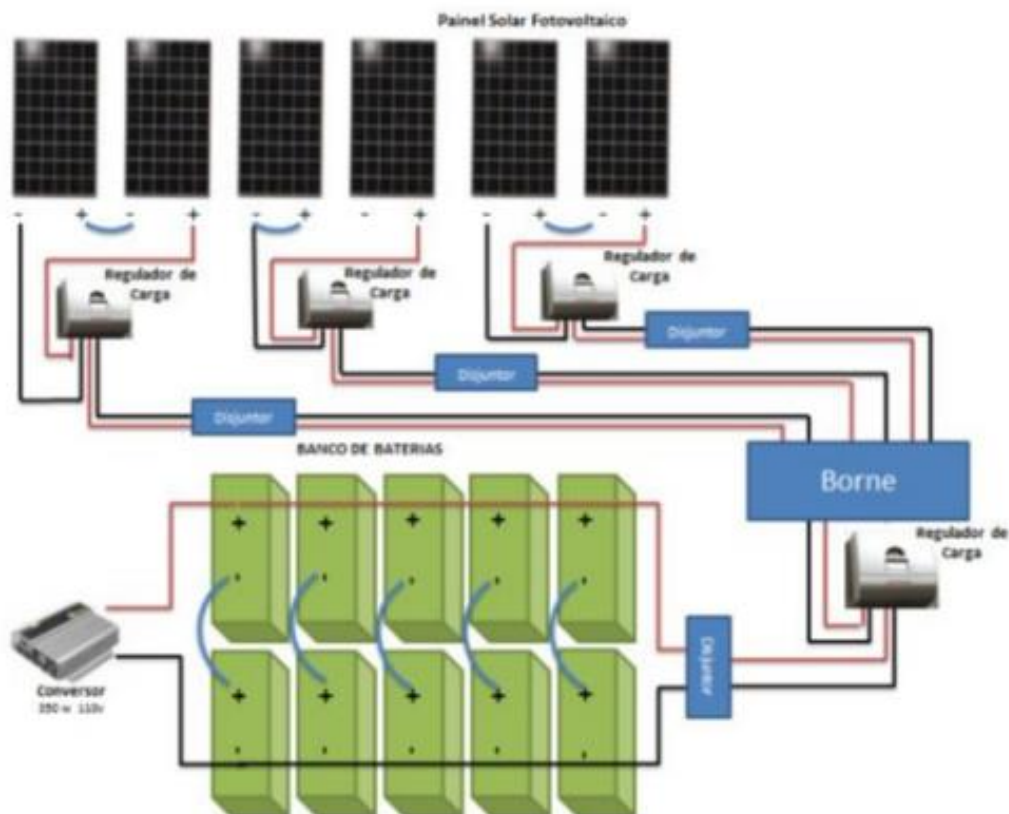
FS = Fator de segurança.

O fator de segurança será dimensionado de acordo à quantidade de cargas com altas potências de partida, como geladeira, lavadora de roupas, ferramentas e outros motores.

Sistemas fotovoltaicos autônomos residenciais podem se beneficiar do uso de vários inversores, dividindo as cargas de acordo ao perfil de uso e simultaneidade. Como exemplo, poderia todo o circuito do sistema de iluminação estar concentrado em um inversor de menor capacidade; os aparelhos eletrônicos comuns às salas de estar poderiam ser ligados a outro inversor; a geladeira poderia ter um inversor devidamente calculado para as suas necessidades; enquanto os pequenos eletrodomésticos comuns à cozinha poderiam fazer uso do inversor

dedicado à lavadora de roupas e micro-ondas, que não são ativados simultaneamente. Tal configuração pode tornar o sistema mais confiável, além de mais barato em alguns casos, pois um inversor que suportasse todas as cargas seria mais caro que vários inversores menores. (BLUE-SOL, 2008, p. 95).

Figura 109: Esquema de ligação simplificado



Fonte: (BLUE-SOL,2008).

## 4 LEVANTAMENTOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Preço, como e onde comprar

Os preços das placas solares variam de acordo com a quantidade, eficiência, fabricante e local de fabricação.

#### 4.1.1 Qual é o preço das placas solares hoje?

Hoje as placas solares fotovoltaicas são vendidas aos milhões em todos os países do mundo (o Brasil, como sempre um pouco atrasado, começou recentemente). Há uma enorme variação no custo das placas solares com base nos tipos de painel solar (tecnologia) e na eficiência das placas solares. No entanto, o tipo de placa usada para instalações solares residenciais é bastante padrão e os custos são basicamente definidos globalmente. Esse custo caiu tremendamente nos últimos anos. O preço da placa solar é agora cerca da metade do preço que eles estavam em 2008, e cerca de 100 vezes menor do que eram em 1977. (Portal Solar).

#### 4.1.2 Preço da placa solar em 2018 = U\$ por Watt

O preço da Placa Solar no mundo todo é negociado em dólares (U\$) por Watt. Mesmo que o painel solar seja fabricado no Brasil a célula ainda não é. O preço da célula varia de acordo com o dólar. Como referência, 60% do custo do painel solar é a célula fotovoltaica. (PORTAL SOLAR).

Em janeiro de 2018, uma placa solar fotovoltaica de 330Watts no Brasil, está sendo vendida no varejo por R\$849,00 (podendo variar um pouco de acordo com a cotação do Dólar). Desta forma o seu preço calculado em R\$/Watt é neste exemplo:  $R\$849/330 = R\$2,57/\text{watt}$ . (PORTAL SOLAR).

#### 4.1.3 O preço da placa solar varia de acordo com a quantidade, fabricante e local

As empresas de energia solar compram as placas normalmente em “Pallets” ou em contêineres. As “Pallets” tem 24 placas solares, contêineres de 20 pés possuem 350 placas solares e os contêineres de 40 pés podem ter até 700 placas solares fotovoltaicas. Se uma empresa for comprar dezenas de contêineres de um grande fabricante Chinês, ela vai negociar o preço em dólares na fábrica na China (Preço FOB). Hoje, em 2018, o preço FOB das placas fotovoltaicas esta aproximadamente U\$0,35/Watt. Para calcular o preço das placas solares no Brasil você precisa contabilizar também a taxa de câmbio, desembaraço, frete e impostos. Ou seja, estes U\$0,35/Watt acabam virando U\$0,47/Watt. (PORTAL SOLAR).

#### 4.1.4 O preço da placa solar para consumidores finais

Sabemos que um grande distribuidor, que pode importar grandes quantidades de placas solares, paga aproximadamente R\$1,80/Watt (variando de acordo com o dólar

é claro). Se você for comprar uma única placa desta empresa ela provavelmente irá lhe vender por R\$2,57/Watt, ou seja, a placa solar de 330 Watts tem um preço de R\$849,00 para o consumidor final (Isso varia é claro!). Se você for comprar desta empresa importadora um “Pallet” (24 placas) provavelmente irá pagar entre R\$2,4/Watt na placa solar, ou seja, a placa solar de 330Watts custará por volta de R\$ 790,00. (PORTAL SOLAR).

#### 4.1.5 O preço da placa solar varia de acordo com a sua eficiência

Em PORTAL SOLAR, vemos que quanto maior a eficiência da placa solar melhor é a placa solar. Ou seja, quanto mais eficiente for a sua placa solar mais cara será o preço dela. (Apenas lembrando, quanto maior a eficiência mais energia a placa gera por m<sup>2</sup>). Ex:

1. Placa Solar com eficiência de 16.5% pode custar, fora do Brasil, US\$ 0,36/Watt.
2. Placa Solar com eficiência de 20.0% pode custar, fora do Brasil, US\$ 0,42/Watt

A diferença é que a placa de 16.5% gera 165 Watts por m<sup>2</sup> e a Placa Solar com eficiência de 20.0% vai gerar 200 Watts por m<sup>2</sup>.

Obs: Placas mais eficientes tendem a ser de melhor qualidade. (PORTAL SOLAR).

#### 4.1.6 Onde comprar placas solares

No Brasil você poderá comprar apenas placas solares que estiverem aprovadas pelo Inmetro. (Sim, existe a possibilidade de você achar um fabricante de placas fora do Brasil e trazer as placas dele para serem certificadas pelo Inmetro, mas isto somente se aplica a grandes empresas). Você pode comprar as placas de energia solar uma empresa instaladora de energia solar, pode comprar direto do fabricante ou pode comprar elas em um pacote com todos os outros equipamentos que compõe um sistema fotovoltaico. Você também pode ouvir o termo "placas fotovoltaicas" ao pesquisar sobre onde comprar este tipo de solução, porém saiba que é o mesmo equipamento. (PORTAL SOLAR).

## 4.2 Economia de energia com usina solar fotovoltaica pode chegar a 12%

Segundo estudo de caso que compõe tese de mestrado apresentada no Centro Técnico Científico da Puc-Rio (CTC/PUC-Rio).

A economia de energia com instalação de placas solares fotovoltaicas pode chegar a aproximadamente 12% com retorno sobre o investimento em cerca de 7,5 anos, segundo estudo de caso que compõe tese de mestrado apresentada no Centro Técnico Científico da PUC-Rio (CTC/PUC-Rio). Segundo o estudo, a economia de energia considera todas as restrições de sombra e uma vida útil de 25 anos para as placas solares. (ECOIA, 2017).

A tese de mestrado “Análise da Inserção de Geração Solar Fotovoltaica em Grandes Consumidores do Rio de Janeiro” foi defendida pelo aluno de Mestrado Profissional em Engenharia Urbana e Ambiental Pedro Comarella Nogueira, que é economista, e sob orientação do professor Reinaldo Castro Souza, do Departamento de Engenharia Elétrica do CTC/PUC-Rio. (ECOIA, 2017).

O trabalho considerou o prédio do Ministério da Fazenda, localizado no Centro do Rio de Janeiro, como base de seu estudo, tendo como foco clientes de média ou alta tensão, cuja curva de consumo coincide com a curva média de radiação solar. (ECOIA, 2017).

O aluno desenvolveu um projeto integral que considerou a implantação de placas solares no prédio do Ministério da Fazenda e análise de 12 cenários econômicos diferentes, tendo como variáveis o câmbio, que utilizou como parâmetro a cotação do euro a R\$ 4,50, taxas de inflação, taxas de desconto (ou taxa mínima de retorno exigida pelo investidor), adoção ou não de crédito para investimento inicial, entre outros, a fim de confirmar a viabilidade econômico-financeira da iniciativa. (ECOIA, 2017).

### 4.3 Iniciativas estrangeiras

No mundo, são restritos os países que fazem uso desse tipo de energia em grande escala, são raros os casos como de Israel, em que aproximadamente 70% das casas tem placas coletoras; e na Indonésia, onde cerca de 15 mil casas são iluminadas totalmente por energia solar. Além disso, já existem projetos de veículos movidos à energia solar no Japão, Alemanha e Estados Unidos. (FRANCISCO).

Iniciativas como da Alemanha são importantes para o fornecimento de energia, o governo desse país, em fase de experiência, oferece subsídio às famílias que instalam equipamentos que transformam energia solar em eletricidade, o excedente é repassado para outras áreas da cidade e o governo paga por isso. (FRANCISCO).

Os custos para instalação desse tipo de equipamento são elevados, o que prejudica a dispersão do uso em escala global, porém isso será uma boa perspectiva para um futuro próximo. (FRANCISCO).

## 5 CONCLUSÃO

O sistema de geração de energia elétrica através da energia solar é altamente simples, confiável, segura, rentável, ecológica, sustentável, renovável, limpa e eficiente. No mundo cada vez mais globalizado as pessoas procuram cada vez mais a simplicidade, e pela gama de aplicações da energia solar fotovoltaica e simplicidade em suas instalações, fica cada vez mais difícil negar sua vantagem e importância dentro do panorama atual. Com a escassez de recursos energéticos e minerais cada vez mais acentuada, uma fonte de energia gratuita, perene e potente se torna uma alternativa clara para suprir os anseios humanos, resguardando as outras tecnologias e suprimentos para necessidades que fogem do planejamento e previsão humana, ou até mesmo, e talvez, simplesmente, somente pelo luxo de poder contar com determinada fonte de energia.

O panorama social atual não permite mais o esbanjamento de fontes de energias não renováveis e que poluem agressivamente e de forma irreversível o meio ambiente. É chegado o momento de a humanidade despertar para sua verdadeira função na Terra, que é de cuidar e de preservar da sua morada eterna e não de abusar de seus recursos e tesouros sem se importar com as consequências negativas que elas podem trazer. A vida oferece várias coisas boas, na grande maioria das vezes de graça, a energia elétrica através do sistema de captação da energia solar através do sistema fotovoltaico de energia é uma delas, vamos aproveitar.



## REFERÊNCIAS

ANEEL. **ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL**. 2003. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/petroleo/7\\_3.htm](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/petroleo/7_3.htm)>. Acesso em: 30/09/2018.

ANEEL. **ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL**. 3. ed. Brasília, DF. 2008. 236 p. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 02/10/2018.

ANEEL. Parte 2. Capítulo 3. Energia hidráulica. **ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL**. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par2\\_cap3.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap3.pdf)>. Acesso em: 01/10/2018.

ANEEL. Parte 2. Capítulo 4. Biomassa. **ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL**. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par2\\_cap4.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf)>. Acesso em: 02/10/2018.

ANEEL. Parte 2. Capítulo 5. Outras fontes. **ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL**. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par2\\_cap5.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap5.pdf)>. Acesso em: 02/10/2018.

ANEEL. Parte 3. Capítulo 6. Gás natural. **ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL**. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par3\\_cap6.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par3_cap6.pdf)>. Acesso em: 01/10/2018.

ANEEL. Parte 3. Capítulo 8. Energia nuclear. **ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL**. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par3\\_cap8.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par3_cap8.pdf)>. Acesso em: 01/10/2018.

ANEEL. Parte 3. Capítulo 9. Carvão mineral. **ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL**. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par3\\_cap9.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par3_cap9.pdf)>. Acesso em: 01/10/2018.

BLUESOL. **OS SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**. Livro digital de introdução aos sistemas solares. Disponível em: <[www.blue-sol.com.br](http://www.blue-sol.com.br)>. Acesso em: 01/10/2018.

BP. **BP Global**. Disponível em: <[www.bp.com](http://www.bp.com)>. Acesso em: 01/10/2018.

EOA. **ECONOMIA DE ENERGIA COM USINA SOLAR FOTOVOLTAICA PODE CHEGAR A 12%**. 10 jan. 2017. Disponível em: <<http://eoa.org.br/economia-de-energia-com-usina-solar-fotovoltaica-pode-chegar-a-12/>>. Acesso em: 05/10/2018.

EPE. Empresa de Pesquisa Energético. ABCDEnergia – **MATRIZ ENERGÉTICA E ELÉTRICA**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 30/09/2018.

FRANCISO, Wagner de Cerqueira e. **ENERGIA SOLAR**. Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/energia-solar.htm>>. Acesso em: 05/10/2018.

IEA. **INTERNATIONAL ENERGY AGENCY**. Disponível em: <[www.iea.org](http://www.iea.org)>. Acesso em: 01/10/2018.

MIRANDA, Ângelo Tiago de. Fontes de energia (2): carvão, petróleo, gás, água e urânio. **UOL EDUCAÇÃO**. 06 mar. 2009. Disponível em: <<https://educacao.uol.com.br/disciplinas/geografia/fontes-de-energia-2-carvao-petroleo-gas-agua-e-uranio.htm?tipo=0>>. Acesso em: 01/10/2018.

PENA, Rodolfo F. Alves. Fontes não renováveis de energia. **BRASIL ESCOLA**. Disponível em: <<https://brasilescola.uol.com.br/geografia/fontes-nao-renovaveis-energia.htm>>. Acesso em: 01/10/2018.

PORTAL ENERGIA. Energias renováveis. **FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS E NÃO RENOVÁVEIS**. 12 set. 2015. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/fontes-de-energia/>>. Acesso em: 30/09/2018.

PORTAL SOLAR. **PLACA SOLAR PREÇO**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/placa-solar-preco.html>>. Acesso em: 05/10/2018.

WCI. **WORLD COAL INSTITUTE**. Disponível em: <[www.worldcoal.org](http://www.worldcoal.org)>. Acesso em: 01/10/2018.

WWEA. **World Wind Energy Association**. Disponível em: <[www.windea.org](http://www.windea.org)>. Acesso em: 02/10/2018.