

VERSÃO 0.9.1

Geração Solar Fotovoltaica

Conceitos Básicos

Prof. Eng. Dennys Lopes Alves.

Sobre o Autor

- Eletricista Industrial pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial do RN – Senai/RN;
- Eletricista de Automação e Instrumentação Industrial pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial do RN – Senai/RN;
- Técnico em Eletrotécnica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do RN – IFRN;
- Técnico em Telecomunicações pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial do RN – Senai/RN;
- Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN;
- Engenheiro de Segurança do Trabalho pela Universidade Potiguar – UNP;
- Mestre em Engenharia de Petróleo e Gás com Ênfase em Automação Industrial pela Universidade Potiguar – UNP;

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2006). Pós-Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho (*Lato Sensu*) pela Universidade Potiguar (2013) e Mestrado Profissional em Engenharia de Petróleo e Gás (*Stricto Sensu*) com ênfase em Automação Industrial pela Universidade Potiguar (2014).

Atualmente é professor efetivo do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) vinculado ao campus João Câmara. Tem experiência nas áreas de Engenharia Elétrica e Engenharia de Segurança do Trabalho, atuando principalmente nos seguintes temas: Eletrônica Industrial, Qualidade da Energia Elétrica, Energia Eólica e Energia Solar Fotovoltaica.

Link Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1862473549371846>

Lista de Figuras

Figura 1: Aplicações da placa solar térmica X aplicações da placa solar fotovoltaica, disponível em: < http://www.tudoenergiasolar.com.br/energia-solar-termica-e-fotovoltaica/ >. Acesso em 02/06/2016.	13
Figura 2: Energia solar térmica X Energia solar fotovoltaica, disponível em: < http://forcaforte.com.br/energia-solar/ >, acesso em 02/06/2016.....	14
Figura 3: Geração de vapor para acionamento de conjunto turbina + gerador a partir de sistema concentrador do tipo torre, disponível em: < http://focusolar.com.br/concentracao-de-energia-solar-para-geracao-de-potencia-eletrica/ >, acesso em 02/06/2016.	14
Figura 4: Geração de vapor para acionamento de conjunto turbina + gerador através de coletores côncavos, disponível em: < http://www.sustentator.com/blog-es/2009/04/planta-solar-termica-mas-grande-del-mundo-a-ser-construida-en-arizona/ >. Acesso em 02/06/2016.	15
Figura 5: Princípio de funcionamento básico de um sistema solar térmico, disponível em: < http://ecohospedagem.com/diferenca-entre-painel-fotovoltaico-e-painel-para-aquecimento-de-agua/ >. Acesso em 02/06/2016.	15
Figura 6: Deslocamento do fluido entre o coletor solar e reservatório térmico, disponível em: < http://pt.slideshare.net/luke Duarte/coletores-solares >. Acesso em 02/06/2016.	16
Figura 7: Representação esquemática de sistema de aquecimento térmico, disponível em: < http://www.upf.br/comarte/?p=737 >. Acesso em 02/06/2016.	16
Figura 8: Energia solar térmica destinada a aplicações residenciais, disponível em: < http://javiponce-formatec.blogspot.com.br/2012_01_01_archive.html >. Acesso em 02/06/2016.	17
Figura 9: Aspecto visual de um coletor solar côncavo, disponível em: < https://sites.google.com/a/mirako.org/www/pensedenovo/energiasolar >. Acesso em 02/06/2016.	17
Figura 10: Diagrama esquemático do coletor côncavo, disponível em: < http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_heliotermica_2012.pdf >. Acesso em 02/06/2016.	18
Figura 11: Conjunto de coletores solares côncavos, disponível em: < http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_solar/3_3.htm >. Acesso em 02/06/2016.	18
Figura 12: Representação simplificada do sistema térmico via coletores côncavos, disponível em: < http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/energia-heliotermica/como-funciona >, acesso em 02/06/2016.	19
Figura 13: Conjunto de coletores solares parabólicos, disponível em: < http://objectifterre.over-blog.org/article-34536767.html >. Acesso em 02/06/2016.	19
Figura 14: Usina solar térmica utilizando coletores parabólicos, disponível em: < http://outilssolaires.com/developpement-durable/energie-solaire/capteurs-paraboliques+a154.html >. Acesso em 02/06/2016.....	20
Figura 15: Vista aérea de uma usina solar térmica com concentrador do tipo torre, disponível em: < http://img01.lavanguardia.com/2011/10/04/Vista-aerea-de-la-planta-termo_54226113697_53389389549_600_396.jpg >, acesso em 02/06/2016.	20

Figura 16: Exemplo de aplicação do concentrador tipo torre, disponível em: < http://blog.is-arquitectura.es/2014/11/09/nuevo-nanomaterial-hace-mas-eficientes-plantas-energia-termica-concentrada/ >. Acesso em 02/06/2016.....	21
Figura 17: Detalhe do elemento concentrador do tipo torre, disponível em: < https://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_heliot%C3%A9rmica >, acesso em 02/06/2016.	21
Figura 18: Placa fotovoltaica instalada em telhado residencial, disponível em: < http://www.placassolaresbrasil.com.br/ >. Acesso em 02/06/2016.	22
Figura 19: Placa fotovoltaica instalada na janela da edificação, disponível em: < http://www.cpt.com.br/noticias/sharp-lanca-placas-fotovoltaicas-para-serem-usadas-em-janelas >. Acesso em 02/06/2016.....	22
Figura 20: Placa fotovoltaica integrada a fachada da instalação, disponível em: < http://www.pensamentoverde.com.br/sustentabilidade/como-funciona-energia-solar-e-quais-suas-vantagens-e-desvantagens/ >. Acesso em 02/06/2016.....	23
Figura 21: Representação esquemática de um sistema fotovoltaico não conectado à rede, disponível em: < http://www.reformaai.com/2013/10/energia-fotovoltaica.html >. Acesso em 02/06/2016.	23
Figura 22: Exemplo de sistema fotovoltaico aplicado a uma residência, disponível em: < https://www.youtube.com/watch?v=u4wMc05Th3I >. Acesso em 02/06/2016.	24
Figura 23: Representação simplificada de um sistema fotovoltaico, disponível em: < https://sites.google.com/a/mirako.org/www/pensedenovo/energiasolar >. Acesso em 02/06/2016.	24
Figura 24: Representação simplificada do efeito fotovoltaico em uma célula fotovoltaica, disponível em: < http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfrAgAK/metodos-dimensionamento-sistemas-fotovoltaicos?part=2 >, acesso em 19/08/2016.....	25
Figura 25: Exemplo de gráfico de comportamento da radiação solar, disponível em: < http://www.osetoreletrico.com.br/web/colunistas/1308-impacto-da-microgeracao-e-da-tarifa-branca-nos-sistemas-de-baixa-tensao.html >, acesso em 04/05/2016.....	27
Figura 26: Representação do espectro eletromagnético, disponível em: < http://blog.clickgratis.com.br/radicacoes2/ >, acesso em 05/05/2016.....	28
Figura 27: Detalhamento do espectro eletromagnético, disponível em: < http://www.areaseg.com/luz/ >, acesso em 05/05/2016.	28
Figura 28: Comportamento da radiação solar em relação ao espectro eletromagnético, disponível em: < http://energiasrenovaveis.com/DetalheNoticias.asp?ID_conteudo=102&ID_area=15 >, acesso em 05/05/2016.....	29
Figura 29: Comportamento da radiação solar em relação a radiação do corpo negro, disponível em: < http://www.oal.ul.pt/vt2004/Venus%20Transit%20Safety_radiacao.htm >, acesso em 05/05/2016.....	29
Figura 30: Tipos de radiação solar, disponível em: < http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAsG8AL/energia-renovaveis?part=4 >, acesso em 05/05/2016.	30
Figura 31: Exemplo de radiação direta e radiação difusa, disponível em: < http://www.fcsolar.eco.br/aprenda-aqui/ >, acesso em 05/05/2016.....	31

Figura 32: Exemplo de sistema solar concentrado, disponível em: < http://www.apolo11.com/energias_alternativas.php?posic=dat_20100924-103452.inc >, acesso em 05/05/2016.....	31
Figura 33: Exemplo de sistema de geração solar com elemento concentrador, disponível em: < http://detudoblogue.blogspot.com.br/2011_02_01_archive.html > , acesso em 05/05/2016.	31
Figura 34: Representação da radiação devido ao albedo, disponível em: < http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000022002000100036&script=sci_arttext > , acesso em 06/05/2016.....	32
Figura 35: Radiação devido ao albedo incidindo sobre a superfície receptora, disponível em: < http://docplayer.com.br/8204762-Faculdade-de-engenharia-da-universidade-do-porto.html > , acesso 06/05/2016.	32
Figura 36: Representação dos tipos de radiações solares, disponível em: < http://docplayer.com.br/8395823-Requisitos-para-a-certificacao-pv.html > , acesso em 06/05/2016.	33
Figura 37: Representação gráfica da altura solar e do angulo de azimute, disponível em: < https://radiobarrio.wordpress.com/rain-space/ > , acesso em 06/05/2016.	34
Figura 38: Ângulos relativos à posição do sol, disponível em: < http://docplayer.com.br/12817568-Sistema-de-seguimento-solar-em-producao-de-energia-fotovoltaica.html > , acesso em 06/05/2016.	34
Figura 39: Caminhos distintos que a radiação solar percorre para atravessar a atmosfera, disponível em: < http://docplayer.com.br/8204368-Eee934-impactode-gd-asredes-eletricas-http-www-cpdee-ufmg-br-selenios.html > , acesso em 06/05/2016.	35
Figura 40: Aspecto visual do heliógrafo, disponível em: < http://meteoropole.com.br/2012/03/bola-de-cristal/ > , acesso em 06/05/2016.....	38
Figura 41: Heliógrafo, disponível em: < http://www.ebah.com.br/content/ABAAABPIEAK/meteorologia-basica?part=3 > , acesso em 06/05/2016.	38
Figura 42: Diferentes modelos de fitas de heliógrafo. 1, 2 e 3 - modelo curva comprida, 4 e 5 modelo reto, 6,7 e 8 - modelo curva curta, disponível em: < http://meteoropole.com.br/2012/03/bola-de-cristal/ > , acesso em 06/05/2016.....	39
Figura 43: Aspecto visual do actinógrafo, disponível em: < https://www.flickr.com/photos/87668408@N04/8024342930 > , acesso em 06/05/2016.	40
Figura 44: Actinografo, disponível em: < http://sonda.ccst.inpe.br/fotos/CAI/2002/caico_06.html > , acesso em 06/05/2016.	41
Figura 45: Actinógrafo e heliógrafo, disponível em: < http://meteoropole.com.br/2014/02/detalhe-do-termometro-de-maxima-temperatura-e-informacoes-diversas-sobre-instrumentos-convencionais/ > , acesso em 06/05/2016.....	41
Figura 46: Fita do heliógrafo e registro do actinógrafo, disponível em: < https://www.flickr.com/photos/87668408@N04/8026520822 > , acesso em 06/05/2016.	42
Figura 47: Piranômetro, disponível em: < http://sensovant.com/productos/meteorologia/radiacion-solar/articulo/piranometro-estandar-secundario-secondary-standard-SR20-D1-MODBUS.html > , acesso em 06/05/2016.....	43

Figura 48: Piranômetro portátil, disponível em: < <http://sensovant.com/productos/meteorologia/radiacion-solar/articulo/piranometro-portatil-precio-venta-economico-LP02.html> >, acesso em 06/05/2016..... 43

Figura 49: Pireliômetro conectado ao robô rastreador, disponível em: < http://sonda.ccst.inpe.br/fotos/CAI/2002/caico_20.html >, acesso em 06/05/2016. 44

Figura 50: Pireliômetro, disponível em: < http://recursosolar.geodesign.com.br/Pages/Pyrheliometer_RS.html >, acesso em 06/05/2016. 45

Figura 51: Trajetória solar, disponível em: < <http://wgsol.com.br/energia-solar-parte-1/> >, acesso em 06/05/2016..... 45

Figura 52: Movimento do sol ao longo do dia, disponível em: < http://www.cienciaviva.pt/equinocio/lat_long/cap4.asp >, acesso em 06/05/2016. 46

Figura 53: Representação da célula, módulo e painel/arranjo fotovoltaico, disponível em: < <http://inergieae.com.br/site/paineis-fotovoltaicos/> >. Acesso em 03/06/2016. 47

Figura 54: Hierarquia fotovoltaica, disponível em: < http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022004000200020&script=sci_arttext >, acesso em 03/06/2016..... 48

Figura 55: Exemplo de associação de células FV em série, disponível em: < <https://plus.google.com/+IbytesBr> >. Acesso em 03/06/2016. 48

Figura 56: Exemplo de célula e de painel fotovoltaico, disponível em: < <https://solectricenergiasolar.wordpress.com/2013/11/25/de-que-estao-hechos-los-paneles-solares/> >, acesso em 24/06/2016. 48

Figura 57: Vista explodida do painel solar, disponível em: < http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-706861504-painel-solar-75w-_JM >, acesso em 24/06/2016. 49

Figura 58: Células de silício monocristalino, policristalino e filme fino, disponível em: < www.sunflower-solar.com >, acesso em 24/06/2016. 50

Figura 59: Aspecto visual dos painéis policristalino e monocristalino, disponível em: < <https://solectricenergiasolar.wordpress.com/2013/11/25/de-que-estao-hechos-los-paneles-solares/> >, acesso em 24/06/2016. 51

Figura 60: Exemplo de conexão de painéis FV em série, disponível em: < <http://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-serie.html> >. Acesso em 03/06/2016. 53

Figura 61: Exemplo de conexão série entre dois painéis com as mesmas especificações elétricas, disponível em: < <http://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-serie.html> >. Acesso em 03/06/2016..... 53

Figura 62: Exemplo de instalação FV utilizando painéis conectados em série, disponível em: < http://www.sunlab.com.br/Dimensionamento_solar_fotovoltaico.htm >. Acesso em 03/06/2016. 54

Figura 63: Exemplo de conexão paralela de painéis com as mesmas especificações elétricas, disponível em: < <https://br.pinterest.com/pin/527976756291607681/> >. Acesso em 03/06/2016. 55

Figura 64: Exemplo de conexão paralela entre painéis com especificações elétricas distintas, disponível em: < <http://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-paralelo.html> >. Acesso em 03/06/2016. 55

Figura 65: Exemplo de instalação FV utilizando painéis conectados em paralelo, disponível em: < http://www.sunlab.com.br/Dimensionamento_solar_fotovoltaico.htm >. Acesso em 03/06/2016.	56
Figura 66: Comparativo entre a conexão de painéis em série ou em paralelo, disponível em: < http://www.osol.com.br/dimensionamento-de-sistema-solar-autonomo-off-grid/ >. Acesso em 03/06/2016.	56
Figura 67: Exemplo de conexão de painéis FV em série-paralelo, disponível em: < https://br.pinterest.com/pin/527976756291607681/ >. Acesso em 03/06/2016.	57
Figura 68: Exemplo de sistema de aquecimento via energia solar térmica por circulação "natural", disponível em: < http://wwwo.metallica.com.br/energia-a-abundancia-solar >, acesso em 14/07/2016.	58
Figura 69: Exemplo de sistema de aquecimento via energia solar térmica utilizando circulação através de bomba hidráulica, disponível em: < http://wwwo.metallica.com.br/energia-a-abundancia-solar >, acesso em 14/06/2016.	59
Figura 70: Exemplos de aplicações para energia solar fotovoltaica, disponível em: < http://filipefs.weebly.com/tecnologia-fv.html >, acesso em 24/06/2016.	60
Figura 71: Exemplos de painéis fotovoltaicos, disponível em: < https://universosolar.wordpress.com/energia-fotovoltaica/paineis-fotovoltaicos/ >, acesso em 23/06/2016.	61
Figura 72: Diagrama básico de um sistema fotovoltaico isolado, disponível em: < http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=341 >, acesso em 14/07/2016.	62
Figura 73: Exemplo de sistema fotovoltaico autônomo, disponível em: < http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_solar/3_3_2.htm >, acesso em 25/06/2016.	63
Figura 74: Exemplo de topologia de sistema fotovoltaico autônomo, disponível em: < http://www.viridian.com.br/tecnologia/energia+solar+fotovoltaica/4 >, acesso em 14/07/2016.	63
Figura 75: representação esquemática do fluxo de energia em um sistema fotovoltaico autônomo, disponível em: < http://wwwo.metallica.com.br/energia-a-abundancia-solar >, acesso em 14/07/2016.	64
Figura 76: Sistema FV isolado alimentando cargas CC e CA, disponível em: < http://www.altogagreen.com/sf/if/pt/solar/sistema.htm >, acesso em 14/07/2016.	65
Figura 77: Aplicação FV isolada com consumidores alimentados em corrente contínua e em corrente alternada, disponível em: < http://real-solar.com/como-funciona.php >, acesso em 14/07/2016.	65
Figura 78: Possíveis configurações para um sistema fotovoltaico <i>offgrid</i> , disponível em: < http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=341 >, acesso em 14/07/2016.	65
Figura 79: Sistema FV autônomo alimentando circuito de iluminação e bomba de água em CC, disponível em: < http://www.diariodeciencias.com.ar/energia-solar-fotovoltaica-y-termica-diferencias-y-aplicaciones/ >, acesso em 14/07/2016.	66
Figura 80: Controlador de carga com display digital, disponível em: < http://www.preservasolar.com.br/s_isolados_minirede.php?act=produtos >, acesso em 14/07/2016.	66

Figura 81: Representação de arranjo FV autônomo de 3KW, disponível em: < https://plus.google.com/106472163037129415313 >, acesso em 14/07/2016.	67
Figura 82: Exemplo das ligações em um controlador de carga destinado a sistemas fotovoltaicos autônomos, disponível em: < >, acesso em 14/07/2016.	68
Figura 83: Configuração básica de um sistema FV conectado a rede elétrica de distribuição da concessionária, disponível em: < http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=341 >, acesso em 14/07/2016.	69
Figura 84: Exemplo de sistema FV interligado a rede, disponível em: < https://www.energiapura.com/content/sistema-solar-fotovoltaico-grid-tie-7-kw >, acesso em 14/07/2016.	70
Figura 85: Exemplo de uma aplicação residencial para um sistema FV interligado a rede, disponível em: < http://energiaesol.com.br/energia-solar/ >, acesso em 14/07/2016.	70
Figura 86: Fluxo de corrente CC e CA em um sistema FV integrado a rede, disponível em: < http://behinniro.com/?category >, acesso em 14/07/2016.	71
Figura 87: Sistema FV interligado a rede utilizando 2 medidores (venda e consumo), disponível em: < http://www.altogagreen.com/sf/if/pt/solar/sistema.htm >, acesso em 14/07/2016.	72
Figura 88: Representação esquemática da energia solar conectada à rede, disponível em: < http://www.sitiosolar.com.br/?_escaped_fragment_=contact/c24vq >, acesso em 14/07/2016.	73
Figura 89: Exemplo de sistema FV interligado a rede utilizando medidor bidirecional, disponível em: < http://www.viridian.com.br/tecnologia/energia+solar+fotovoltaica/4 >, acesso em 14/07/2016.	73
Figura 90: Diagrama esquemático de sistema FV interligado a rede utilizando dois medidores (produção e consumo), disponível em: < http://www.energiasolar.com.es/seccion/placa-solar-luz/instalaciones-conectadas-a-red >, acesso em 14/07/2016.	74
Figura 91: Medidor bidirecional aplicado em sistema FV <i>on grid</i> disponível em: < http://wwwo.metallica.com.br/energia-a-abundancia-solar >, acesso em 14/07/2016.	74
Figura 92: Sistema FV conectado à rede incluindo dispositivos de seccionamento, disponível em: < http://www.solarcontroller-inverter.com/products/I-Panda-12V-24v-48v-Series-mppt-solar-controller-50A.html#.V20bCbgrLIU >, acesso em 14/07/2016.	75
Figura 93: Exemplo de sistema FV híbrido constituído por painéis FV fixos, painéis FV com rastreador solar e aéro geradores, disponível em: < https://processo-industrial.blogspot.com.br/2014_01_01_archive.html >, acesso em 15/07/2016.	76
Figura 94: Topologia de sistema híbrido solar + eólico + diesel, disponível em: < http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=341 >, acesso em 15/07/2016.	77
Figura 95: Sistema de geração híbrida com 2 inversores, disponível em: < http://www.sitecnosolar.com/pt/sistema-hibrido-compatible-con-generator-diesel-sin-red/ >, acesso em 15/07/2016.	77
Figura 96: Exemplo de sistema híbrido off grid, disponível em: < http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-713979351-kit-off-eolico-aerogerador-ista-500w-inversor-controlador-_JM >, acesso em 15/07/2016.	78

Figura 97: Sistema de geração híbrida com múltiplos inversores, disponível em: < http://personal.unizar.es/rdufo/index.php?option=com_content&view=article&id=13:sistema-s-hibridos&catid=10&Itemid=120&lang=es >, acesso em 15/07/2016..... 78

Figura 98: Exemplo de sistema híbrido autônomo, disponível em: < <http://www.ffsolar.com/index.php?lang=PT&page=sistemas-autonomos> >, acesso em 15/07/2016. 79

Figura 99: Princípio operativo básico de um sistema híbrido solar- eólico, disponível em: < <http://energiahibrida.blogspot.com.br/> >, acesso em 15/07/2016..... 80

Figura 100: Sistema híbrido incluindo turbina hidráulica, disponível em: < <http://blogdfely.blogspot.com.br/2010/11/sistemas-hibridos.html> >, acesso em 15/07/2016. 80

Figura 101: Sistema de geração híbrida solar + eólica em aplicações residenciais, disponível em: < <https://autosolar.es/kits-solares/kit-solar-eolico-hibrido> >, acesso em 15/07/2016.... 81

Figura 102: Logotipo do *software PVSyst*, disponível em: < <http://www.pvsyst.com/en/> >, acesso em 22/08/2016..... 83

Figura 103: Logotipo do *software PSIM* em sua versão 10.0, disponível em: < <https://powersimtech.com/products/> >, acesso em 22/08/2016. 84

Figura 104: Tela do *software PVSYST*, disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=zuOExeuJkko> >, acesso em 22/08/2016. 84

Figura 105: Exemplo de simulação fotovoltaica utilizando o *software PSIM*, disponível em: < http://www.powersimtech.co.kr/category/ren_energy_package >, acesso em 22/08/2016... 85

Figura 106: Tela do *software sketch up*, disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=Ee9zysWd9yo> >, acesso em 22/08/2016. 85

Figura 107: Exemplo de instalação FV representada no *software Google sketch up*, disponível em: < <https://netcad3d.wordpress.com/cursostutoriais/descobrir-o-google-sketchup-2/> >, acesso em 22/08/2016..... 86

Sumário

Sobre o Autor.....	1
Lista de Figuras.....	2
1. Apresentação	10
2. Introdução.....	11
3. Energia Solar Térmica X Energia Solar Fotovoltaica	13
4. Efeito Fotovoltaico.....	25
5. Avaliação do Potencial Solar	26
5.1 Constante Solar (G_{AM0}).....	27
5.2 Radiação Eletromagnética.....	27
5.3 Radiação Solar.....	30
5.3.1 Radiação Direta.....	31
5.3.2 Radiação Difusa.....	31
5.3.3 Radiação Devido ao Albedo	32
5.3.4 Radiação Global.....	33
5.4 Ângulos Relativos à Posição do Sol	33
5.4.1 Altura Solar ou Elevação [γ_S]	33
5.4.2 Ângulo Zenital [θ_Z].....	34
5.4.3 Ângulo Azimutal do Sol [α_S]	34
5.5 AM	35
5.6 Irradiância e Irradiação	36
5.6.1 Irradiância (G).....	36
5.6.2 Irradiação (H)	36
5.7 Instrumentação Solar	36
5.7.1 Sensores de Radiação.....	36
A. Termopilhas	37
B. Células de Silício Monocristalino.....	37
5.7.2 Principais Instrumentos	37
A. Heliógrafo	37
B. Actinógrafo ou Piranógrafo	39
C. Piranômetro	42
D. Piroeliômetro	43

6.	Célula Fotovoltaica.....	46
6.1	Módulos de Silício Cristalino X Módulos de Filme Fino.....	50
6.2	Array de Módulos.....	52
6.2.1	Conexão Série de Módulos.....	52
6.2.2	Conexão Paralela de Módulos.....	54
6.2.3	Conexão Mista de Módulos.....	56
7.	Aplicações da Geração Fotovoltaica.....	57
7.1	Geração Direta x Geração Indireta de Eletricidade.....	60
7.2	Sistemas Fotovoltaicos Isolados (Autônomos).....	61
7.3	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede.....	69
7.4	Sistemas Fotovoltaicos Híbridos.....	75
7.5	Classificação dos Sistemas Fotovoltaicos Quanto a Potência.....	81
8.	Normatização.....	81
9.	Energia Solar em Bens de Consumo.....	82
10.	Dispositivos/Equipamentos Fotovoltaicos.....	82
10.1	Inversores Fotovoltaicos.....	82
10.2	Controladores de Carga.....	82
10.3	Bancos de Baterias.....	83
11.	Softwares de Apoio.....	83
	Referências Bibliográficas.....	86
	Anexo A – Sugestões de Web Sites.....	87

1. Apresentação

Este trabalho destina-se a apresentar ao leitor os preceitos e prerrogativas básicas associadas à conversão direta da energia solar em energia elétrica, tratando principalmente da geração de eletricidade a partir do aproveitamento e da contextualização do recurso solar englobando suas tecnologias correlatas, tanto na forma de sistemas autônomos (isolados) quanto na forma de sistemas conectados à rede elétrica de distribuição.

Durante o transcorrer dos capítulos versaremos desde aspectos correlacionados a avaliação do potencial solar até aplicações, dimensionamentos, instalação e manutenção dos conversores solares fotovoltaicos e seus principais acessórios, além de outros aspectos técnicos afins a este recurso energético de grande potencial, no que se refere a complementar a geração de eletricidade da matriz energética do Brasil.

Vislumbrando maximizar a curva de aprendizagem, utilizamos como premissa básica o encadeamento de ideias e/ou aplicações de forma objetiva e didática, sempre que possível enfatizando aspectos de natureza prática, alicerçados em normas e padrões correlatos. Tal opção metodológica busca proporcionar aos leitores um aprendizado mais rápido e eficaz.

Por tratar-se de um texto introdutório, escrito com o intuito de explicar o tema de forma acessível, bem como em razão da multidisciplinaridade dos conteúdos explicitados, aconselhamos aos leitores que busquem maior aprofundamento das temáticas consultando as referências bibliográficas apresentadas ao final do texto base.

Autorizamos previamente a reprodução total ou parcial deste texto, por quaisquer meios ou processos, desde que sejam mantidos os créditos do autor. Todas as citações a *web sites*, instituições acadêmicas, fabricantes e empresas destinam-se exclusivamente a ilustrar os conteúdos trabalhados no texto base, ou seja, são citados unicamente para fins acadêmicos, sendo que os mesmos estão devidamente creditados através de legendas e referências.

Receberei com entusiasmo eventuais críticas, reclamações e sugestões acerca de erros ou imprecisões nas informações prestadas ao longo deste texto.

2. Introdução

A maior fonte primária de energia do planeta terra é indubitavelmente o sol, sendo este responsável direto pela vida na terra em razão da imensa quantidade de energia que o mesmo nos fornece de forma gratuita e limpa. A energia solar fornece principalmente luz e calor a terra, suprimindo as necessidades de animais, vegetais e inúmeros processos orgânicos e reações químicas, como por exemplo a fotossíntese. Uma vasta gama de processos e comportamentos são influenciados e guardam estreita relação com o sol, quais sejam:

- a) Movimento dos ventos, ocasionado por diferenças de temperatura e pressão atmosféricas;
- b) Movimento das marés;
- c) Ciclos da água. Ex.: evaporação, chuvas e degelo;
- d) Decomposição de matéria orgânica, dentre inúmeros outros.

Outra aplicação da energia proveniente dos raios solares é o seu aproveitamento para geração direta e indireta de eletricidade (energia solar fotovoltaica e energia solar heliotérmica) e para geração de calor (energia solar térmica) para aquecimento de fluidos, por exemplo.

A energia solar fotovoltaica tem grande potencial em praticamente todo o território nacional, quer sejam em áreas urbanas quer sejam em áreas rurais, em razão dos elevados índices de incidência da radiação solar em vários dos estados brasileiros, deste modo constituindo-se uma excelente fonte de eletricidade limpa e renovável.

Algumas características e vantagens da energia solar fotovoltaica são listadas abaixo:

- a) Possibilidade de geração de energia no próprio local onde a mesma será consumida (eletricidade consumida onde é produzida), no caso da microgeração e da minigeração, aproximando a geração do consumo;
- b) Elimina-se a necessidade de linhas de transmissão ou extensas redes de distribuição, quando instaladas em aplicações residenciais, por exemplo. Este aspecto minimiza consideravelmente as perdas com transmissão, bem como reduz os investimentos em linhas de transmissão e distribuição;
- c) Pode atender pequenos sistemas de eletrificação de localidades remotas (não eletrificadas) ou suprir a demanda energética de instalações (empresas, instituições, órgãos governamentais, complexos esportivos, condomínios, residências, dentre inúmeros outros) localizadas dentro dos grandes centros urbanos que possuem acesso ao sistema de distribuição pública;
- d) Possibilidade de integração dos módulos com a edificação¹, principalmente nos telhados, ou seja, não é exigida uma área física dedicada a instalação dos painéis;
- e) Pode ser utilizada para suprir parcialmente (fonte complementar – sistema alternativo de geração) ou totalmente a demanda energética, bem como para exportar eventuais excedentes da autoprodução;
- f) Apesar da alta tecnologia inerente a fabricação dos módulos, a sua utilização é relativamente simples;
- g) Opção limpa e segura (baixo impacto ambiental: não polui o ar ou a água por não consumir combustíveis) para suprir com eletricidade as comunidades isoladas e de difícil acesso;
- h) Elevada modularidade, permitindo o aumento da potência instalada através de adição de novos módulos e rapidez de instalação;
- i) Fonte energética não poluente, não produz ruídos (totalmente silenciosa) e de natureza renovável, ou seja, tecnologia que corrobora com os preceitos da sustentabilidade ambiental;
- j) Caracterizada por exigir baixíssimas manutenções e por operar satisfatoriamente de maneira desassistida.

¹ Pode ser utilizada para substituir revestimentos arquitetônicos como por exemplo telhados e faixadas ou se sobrepondo a estes revestimentos.

3. Energia Solar Térmica X Energia Solar Fotovoltaica



Figura 1: Aplicações da placa solar térmica X aplicações da placa solar fotovoltaica, disponível em: < <http://www.tudoenergiasolar.com.br/energia-solar-termica-e-fotovoltaica/> >. Acesso em 02/06/2016.

O sol pode ser utilizado como fonte supridora de energia para fins de aquecimento ou ainda para produção de eletricidade de maneira indireta ou direta. Na primeira situação estaremos tratando da energia solar térmica. No caso da geração indireta teremos a energia elétrica sendo gerada a partir do aquecimento de um fluido até transformá-lo em vapor, que por sua vez acionará a turbina de um gerador elétrico. Por fim, na geração direta de eletricidade a partir do sol, entraremos no escopo da energia solar fotovoltaica.

A energia térmica está diretamente correlacionada com a temperatura absoluta de um sistema, que por sua vez relaciona-se com as energias cinéticas microscópicas que suas partículas constituintes possuem. Esta energia deriva, por exemplo, do movimento das partículas (translação, vibração ou rotação).

Em termos de terminologia técnica, na energia solar térmica utilizamos coletores solares, ao passo que na energia solar fotovoltaica utilizamos módulos solares.



Figura 2: Energia solar térmica X Energia solar fotovoltaica, disponível em: < <http://forcaforte.com.br/energia-solar/> >, acesso em 02/06/2016.

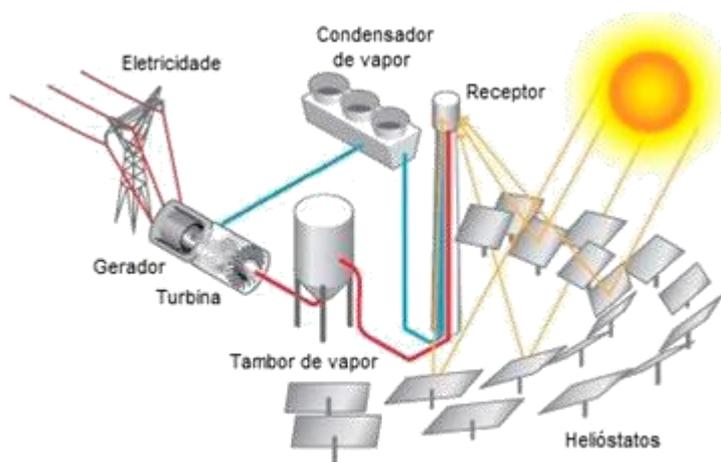


Figura 3: Geração de vapor para acionamento de conjunto turbina + gerador a partir de sistema concentrador do tipo torre, disponível em: < <http://focusolar.com.br/concentracao-de-energia-solar-para-geracao-de-potencia-eletrica/> >, acesso em 02/06/2016.

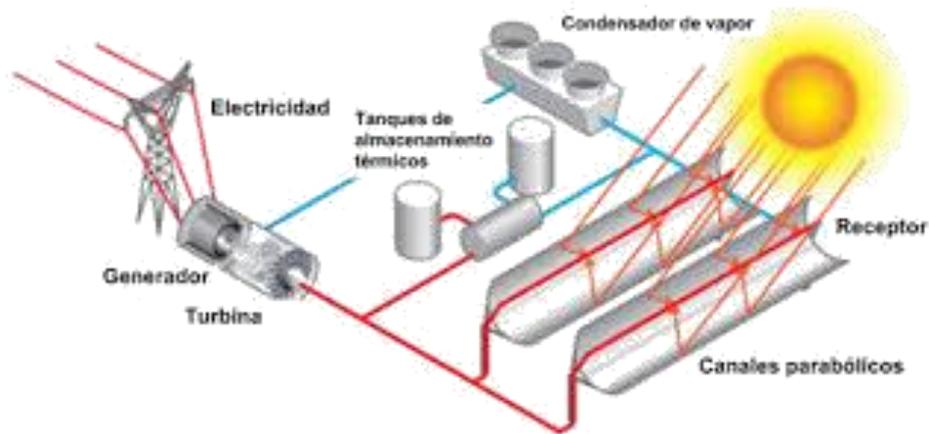


Figura 4: Geração de vapor para acionamento de conjunto turbina + gerador através de coletores côncavos, disponível em: < <http://www.sustentator.com/blog-es/2009/04/planta-solar-termica-mas-grande-del-mundo-a-ser-construida-en-arizona/> >. Acesso em 02/06/2016.

Na energia solar térmica, comumente utilizaremos a captação de calor a partir de dispositivos designados de coletores solares que, de um modo geral, estão instalados no telhado dos empreendimentos. O objetivo central, neste caso, é aquecer água diretamente a partir do calor fornecido pelo sol, ou seja, a partir da transferência de calor.

A vantagem do coletor solar é a possibilidade de gerar aquecimento sem necessidade de queimar combustíveis fósseis ou derivados de petróleo, contribuindo para preservação ambiental, bem como poupando outros recursos energéticos.

Nos sistemas de geração indireta têm-se a geração de energia elétrica a partir do aquecimento de um fluido. Nestas aplicações o calor é captado e concentrado, com a finalidade de aquecer o referido fluido. As instalações que realizam estas ações são designadas de usinas solares térmicas. O calor inerente ao fluido aquecido é canalizado até a central geradora onde será convertido em vapor e acionará uma turbina integrada com um gerador de energia elétrica.

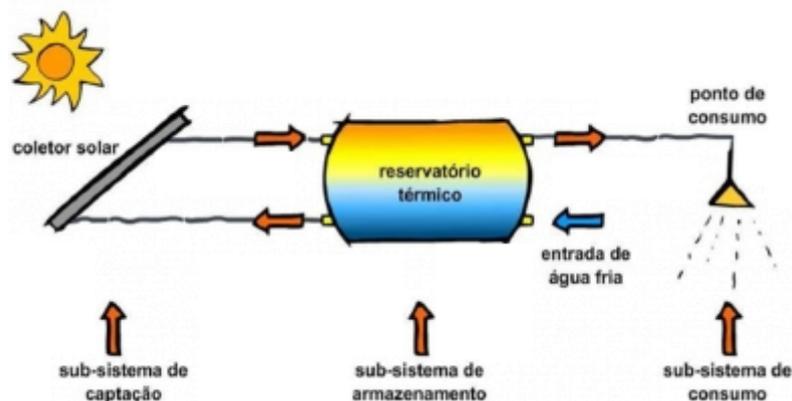


Figura 5: Princípio de funcionamento básico de um sistema solar térmico, disponível em: < <http://ecohospedagem.com/diferenca-entre-painel-fotovoltaico-e-painel-para-aquecimento-de-agua/> >. Acesso em 02/06/2016.

O coletor solar internamente é constituído por tubos, formando um caminho a ser percorrido pelo fluido que será aquecido. Interligado aos coletores e com a finalidade precípua de armazenamento teremos um reservatório térmico.

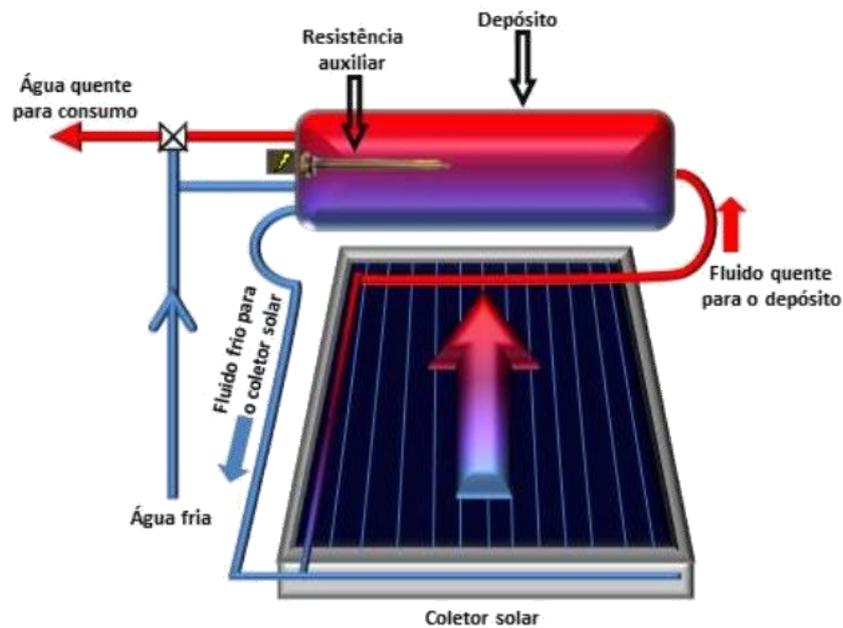


Figura 6: Deslocamento do fluido entre o coletor solar e reservatório térmico, disponível em: < <http://pt.slideshare.net/lukeduarte/coletores-solares> >. Acesso em 02/06/2016.

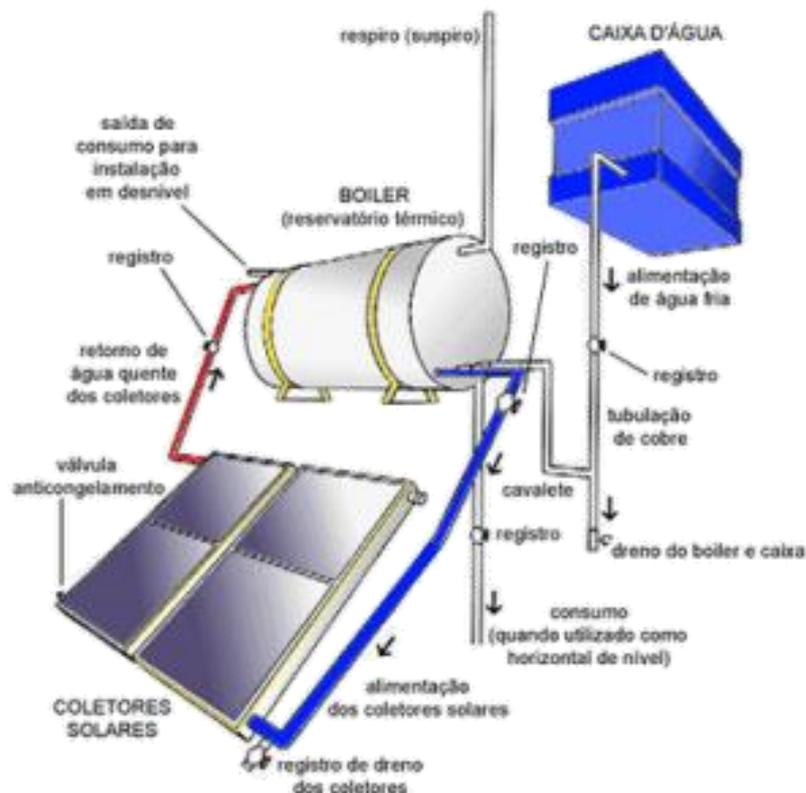


Figura 7: Representação esquemática de sistema de aquecimento térmico, disponível em: < <http://www.upf.br/comarte/?p=737> >. Acesso em 02/06/2016.

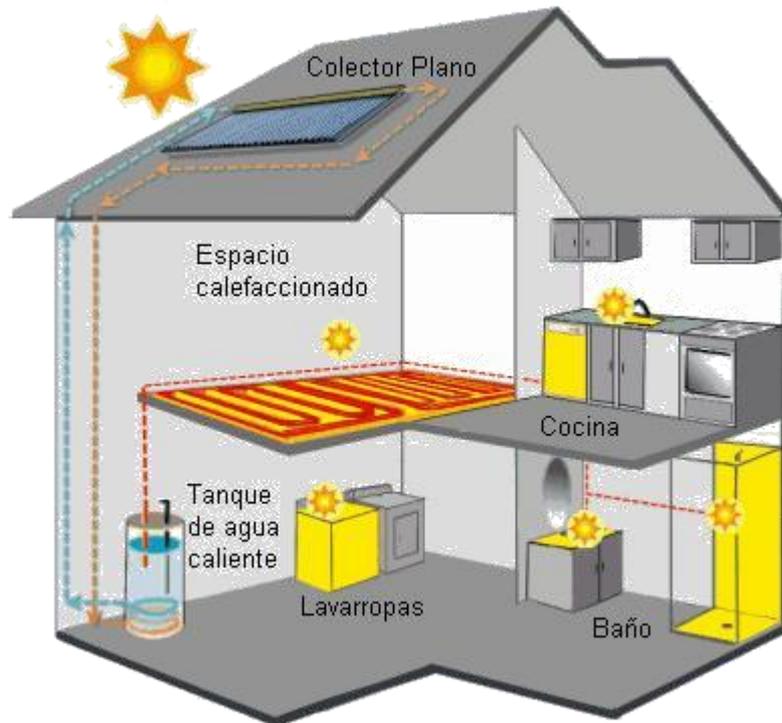


Figura 8: Energia solar térmica destinada a aplicações residenciais, disponível em: < http://javiponce-formatec.blogspot.com.br/2012_01_01_archive.html >. Acesso em 02/06/2016.

As usinas solares térmicas podem ser classificadas:

- a) Quanto ao tipo de sistema de captação utilizado;
- b) Quanto ao tipo de sistema de concentração utilizado.

Podemos citar como exemplos de sistemas de concentração solar:

- a) Coletores côncavos: espelhos côncavos destinados a refletir os raios solares em direção a uma tubulação, concentrando o calor na mesma. Faixa de temperatura: 100 a 400 °C;



Figura 9: Aspecto visual de um coletor solar côncavo, disponível em: < <https://sites.google.com/a/mirako.org/www/pensedenovo/energiasolar> >. Acesso em 02/06/2016.

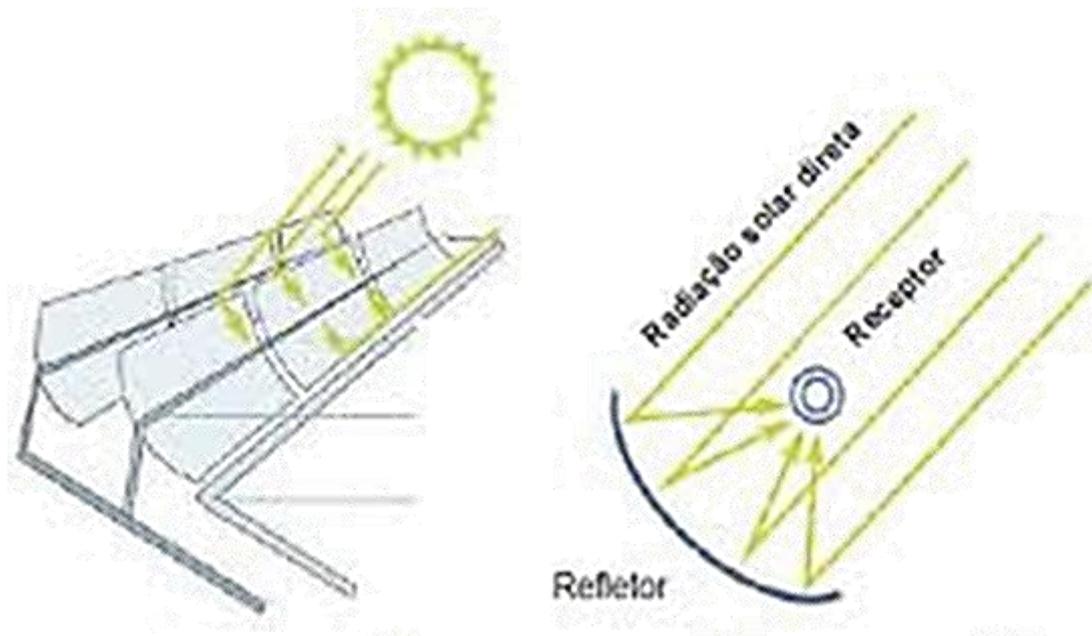


Figura 10: Diagrama esquemático do coletor côncavo, disponível em: < http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_heliotermica_2012.pdf >. Acesso em 02/06/2016.



Figura 11: Conjunto de coletores solares côncavos, disponível em: < http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_solar/3_3.htm >. Acesso em 02/06/2016.

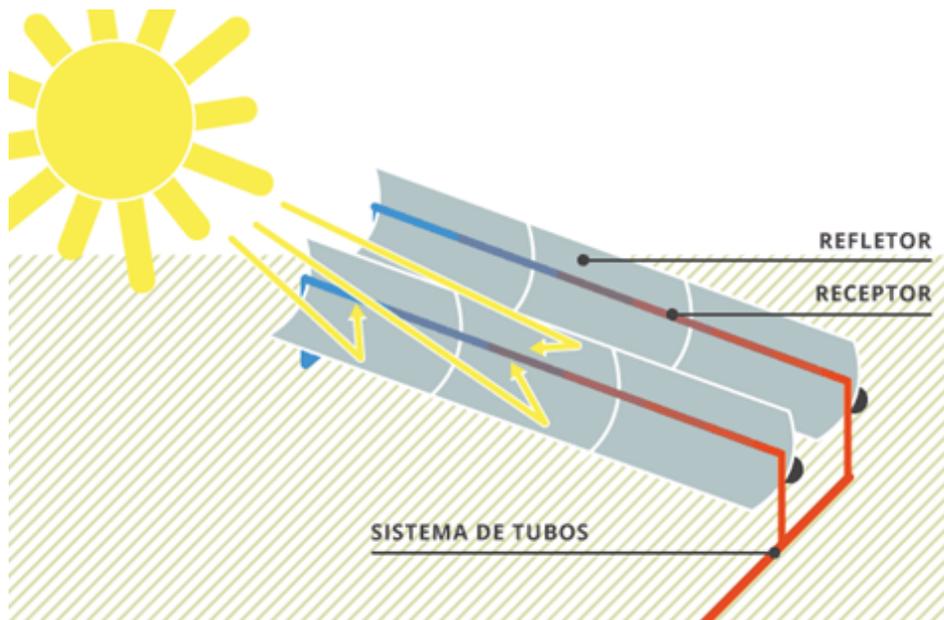


Figura 12: Representação simplificada do sistema térmico via coletores côncavos, disponível em: < <http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/energia-heliotermica/como-funciona> >, acesso em 02/06/2016.

- b) Coletores parabólicos: tratam-se de espelhos parabólicos destinados a concentrar os raios solares em direção a um ponto central específico designado de cápsula térmica. Faixa de temperatura: acima de 400° C;



Figura 13: Conjunto de coletores solares parabólicos, disponível em: < <http://objectiferre.over-blog.org/article-34536767.html> >. Acesso em 02/06/2016.



Figura 14: Usina solar térmica utilizando coletores parabólicos, disponível em: < <http://outilssolaires.com/developpement-durable/energie-solaire/capteurs-paraboliques+a154.html> >. Acesso em 02/06/2016.

- c) Espelhos planos com torre concentradora: os espelhos passam a ser planos e a cápsula térmica é instalada na parte superior de uma torre. Faixa de temperatura: superior a 400 °C.



Figura 15: Vista aérea de uma usina solar térmica com concentrador do tipo torre, disponível em: < http://img01.lavanguardia.com/2011/10/04/Vista-aerea-de-la-planta-termo_54226113697_53389389549_600_396.jpg >, acesso em 02/06/2016.



Figura 16: Exemplo de aplicação do concentrador tipo torre, disponível em: < <http://blog.is-arquitectura.es/2014/11/09/nuevo-nanomaterial-hace-mas-eficientes-plantas-energia-termica-concentrada/> >. Acesso em 02/06/2016.



Figura 17: Detalhe do elemento concentrador do tipo torre, disponível em: < https://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_heliot%C3%A9rmica >, acesso em 02/06/2016.

Quanto a energia solar fotovoltaica, por vezes designada de energia solar FV, teremos a conversão de energia a partir do efeito fotovoltaico, convertendo-se diretamente a luz captada do sol em energia elétrica. A captação da luz solar é realizada a partir das placas fotovoltaicas instaladas nas fachadas, telhados ou coberturas das instalações que farão uso da eletricidade produzida. No caso dos grandes centros de geração fotovoltaica, o conjunto de placas serão interligadas de modo a constituir as chamadas usinas fotovoltaicas.



Figura 18: Placa fotovoltaica instalada em telhado residencial, disponível em: < <http://www.placassolaresbrasil.com.br/> >. Acesso em 02/06/2016.



Figura 19: Placa fotovoltaica instalada na janela da edificação, disponível em: < <http://www.cpt.com.br/noticias/sharp-lanca-placas-fotovoltaicas-para-serem-usadas-em-janelas> >. Acesso em 02/06/2016.



Figura 20: Placa fotovoltaica integrada a fachada da instalação, disponível em: < <http://www.pensamentoverde.com.br/sustentabilidade/como-funciona-energia-solar-e-quais-suas-vantagens-e-desvantagens/> >. Acesso em 02/06/2016.

Os sistemas fotovoltaicos são caracterizados por utilizarem dispositivos controladores (controlador de carga) e conversores (*choppers*, inversores, etc.), podendo ainda utilizar baterias ou estar conectados diretamente a rede elétrica. Destinam-se a eletrificação rural ou de outras localidades não contempladas pelo sistema de distribuição das concessionárias locais, ou ainda para complementação energética, quando os consumidores já possuem acesso a rede de distribuição pública convencional.

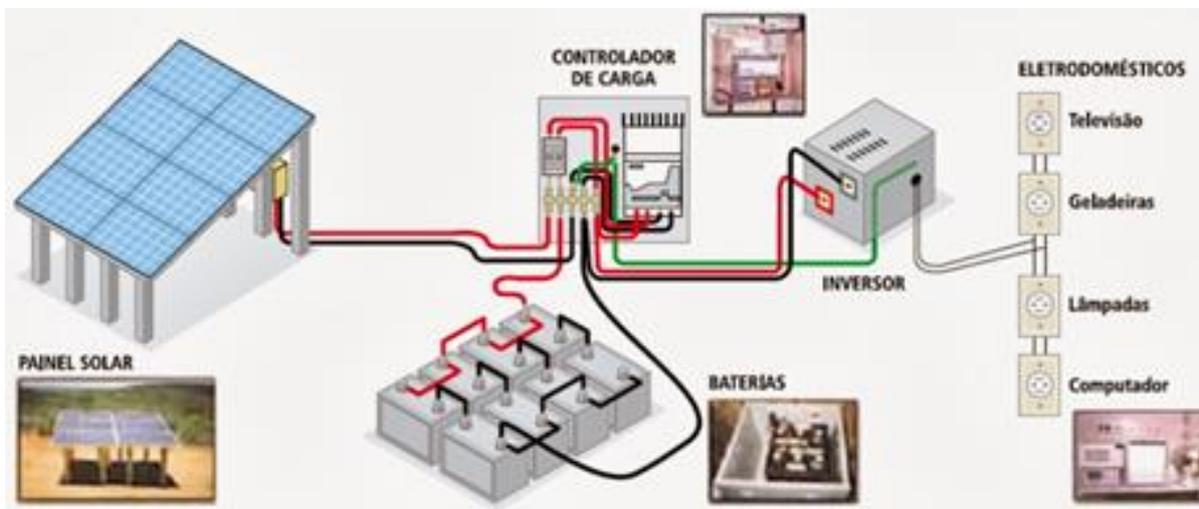


Figura 21: Representação esquemática de um sistema fotovoltaico não conectado à rede, disponível em: < <http://www.reformaai.com/2013/10/energia-fotovoltaica.html> >. Acesso em 02/06/2016.

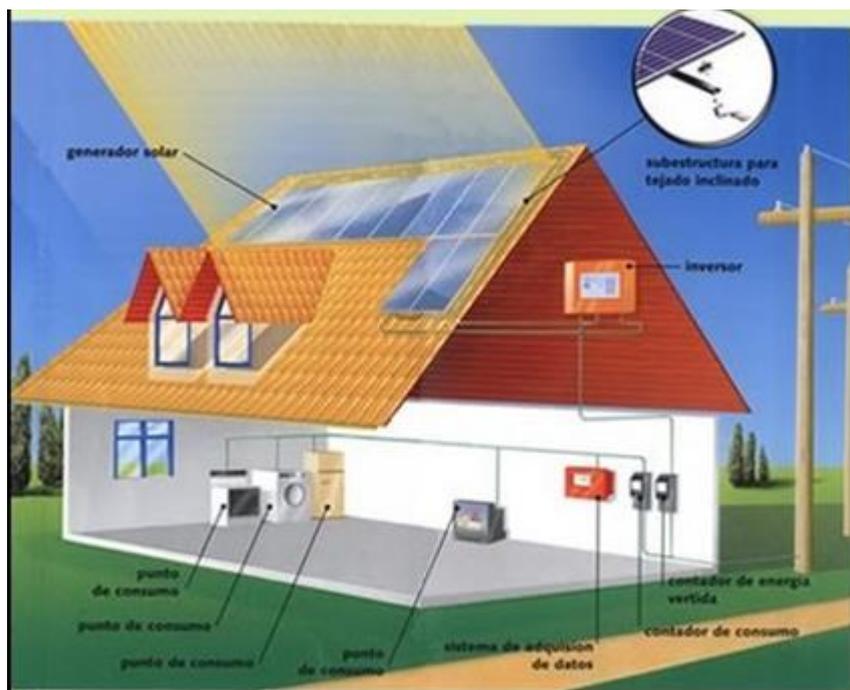


Figura 22: Exemplo de sistema fotovoltaico aplicado a uma residência, disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=u4wMc05Th3I> >. Acesso em 02/06/2016.



Figura 23: Representação simplificada de um sistema fotovoltaico, disponível em: < <https://sites.google.com/a/mirako.org/www/pensedenovo/energiasolar> >. Acesso em 02/06/2016.

4. Efeito Fotovoltaico

Pode ser definido como o fenômeno resultante da interação entre a luz (fótons) e os materiais semicondutores utilizados na fabricação das células fotovoltaicas². Como consequência do efeito fotovoltaico teremos a transformação de energia solar em energia elétrica.

O termo fotovoltaica origina-se da fusão entre as palavras foto, que em grego significa luz, e voltaica derivada da unidade de tensão elétrica designada de Volts.

Historicamente atribui-se ao físico francês Alexandre Edmond Becquerel, no ano de 1839, a primeira observação e descrição do efeito fotovoltaico. A primeira célula fotovoltaica de silício monocristalino de maior aplicabilidade prática foi desenvolvida em 1954 nos laboratórios Bell, em pesquisa conduzida pelos pesquisadores Pearson, Fuller e Chapin.

A incidência de fótons na superfície das células FV's provoca a absorção destes por parte das células, excitando os elétrons do material semicondutor. Ao ser estabelecida uma diferença de potencial entre as camadas de material semicondutor que constituem a célula FV os elétrons excitados na etapa anterior passam a se deslocar de maneira ordenada estabelecendo uma corrente elétrica. O número de elétrons em movimento será proporcional a intensidade da luz incidente e absorvida pelas células FV.

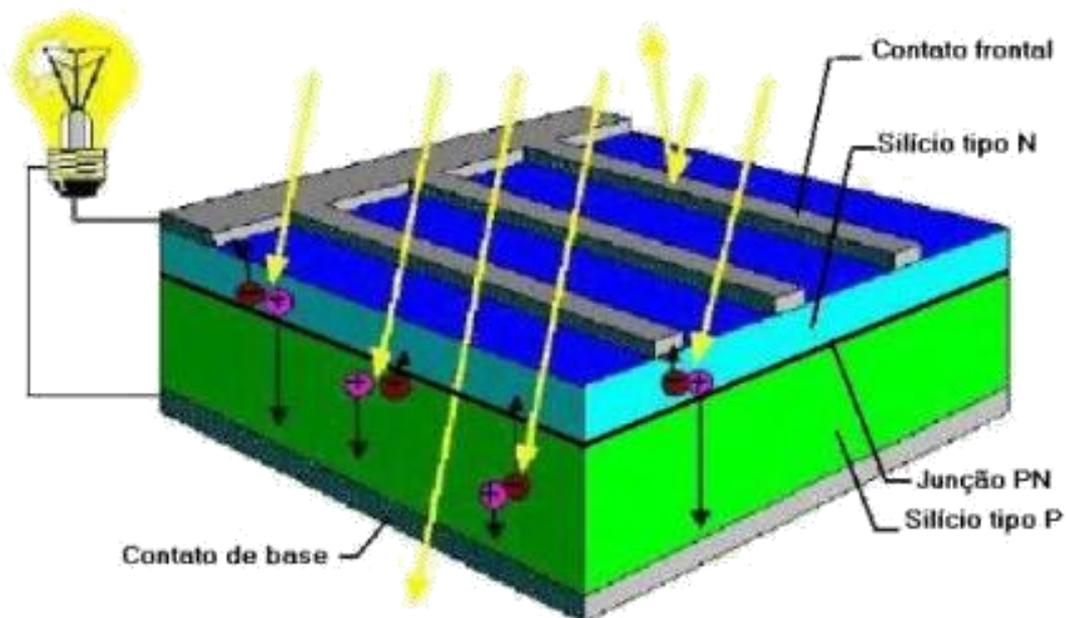


Figura 24: Representação simplificada do efeito fotovoltaico em uma célula fotovoltaica, disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAfrAgAK/metodos-dimensionamento-sistemas-fotovoltaicos?part=2> >, acesso em 19/08/2016.

² Conforme veremos mais adiante neste texto, existem inúmeros materiais utilizados na fabricação de células fotovoltaicas, entretanto em razão de sua maior abundância na natureza, o silício é o material de maior utilização na fabricação de células fotovoltaicas comerciais.

5. Avaliação do Potencial Solar

Antes da instalação e operação propriamente ditas, é indispensável uma análise preliminar da viabilidade técnica e econômica da instalação de conversores fotovoltaicos, desde aplicações destinadas à microgeração até os grandes complexos de geração fotovoltaica.

A análise preliminar supracitada destina-se a mensurar, ainda que de maneira aproximada, a ordem de grandeza do potencial de geração solar disponível naquela localidade. A premissa básica é o desejo em avaliar a disponibilidade do recurso energético, congregando aspectos como sua variabilidade espacial e temporal e assim obter um planejamento energético mais coerente e consistente.

Em razão da inconstância dos aspectos climatológicos (métodos e ferramentas da meteorologia), o potencial de geração fotovoltaica de um determinado local deve ser entendido como uma aproximação e não como uma verdade absoluta. Levantamentos mais precisos podem ser obtidos a partir de pesquisa a dados climáticos provenientes de fontes de elevada confiabilidade, sendo esta última associada ao acúmulo de dados provenientes de vários anos³. Os dados climáticos citados buscam preencher a crescente demanda acerca da influência da variabilidade climática sobre a disponibilidade do recurso solar.

A previsão de produção das plantas solares leva em consideração aspectos técnicos diversos como por exemplo:

- a) Radiação solar;
- b) Temperatura ambiente;
- c) Velocidade do vento;
- d) Direção dos ventos;
- e) Índice pluviométrico;
- f) Umidade relativa do ar.

A inconstância da radiação mencionada anteriormente gera diferentes comportamentos do potencial de geração solar, mesmo dentro de curtos intervalos de tempo de análise, ou seja, variações de radiação podem ser observadas de um mês para outro, de um dia para outro e, a depender do sistema de aquisição de dados utilizados, de minuto a minuto.

³ Algumas bibliografias recomendam um período de 11 anos de avaliação da radiação solar (tempo correspondente a um ciclo solar principal).

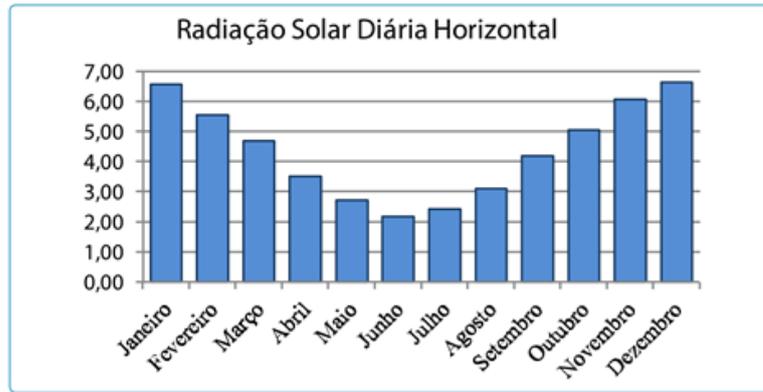


Figura 25: Exemplo de gráfico de comportamento da radiação solar, disponível em: < <http://www.osetoreletrico.com.br/web/colunistas/1308-impacto-da-microgeracao-e-da-tarifa-branca-nos-sistemas-de-baixa-tensao.html> >, acesso em 04/05/2016.

5.1 Constante Solar (G_{AM0})

Trata-se da quantidade de energia incidente numa superfície de área unitária, sendo esta área posicionada de modo perpendicular aos raios solares, por unidade de tempo. Tal definição considera que a região se situa no topo da atmosfera. A intensidade da radiação solar incidente na atmosfera terrestre sofre variações em função da distância da terra ao sol.

A intensidade média da radiação incidente na atmosfera, apesar de receber a designação de "constante", poderá sofrer variações em função da distância entre a terra e o sol. O valor da constante solar (G_{AM0}) corresponde a: 1353 W/m^2 com erro de $\pm 1,5\%$.

No caso da parcela de radiação que incide na superfície da terra (G_{HOR}), seu valor máximo é estipulado como sendo: $G_{HOR} = 1000 \text{ W/m}^2$.

5.2 Radiação Eletromagnética

A radiação proveniente do sol é constituída por um espectro contínuo de diferentes comprimentos de onda englobando:

- Parte do espectro infravermelho – 47% da energia total recebida;
- Toda região do espectro visível entre o violeta e o vermelho – 46% da energia total recebida;
- Parte do espectro ultravioleta – 7% da energia total recebida;

Caso a análise seja referenciada ao topo da atmosfera, a distribuição do espectro solar aproxima-se a de um corpo negro (emissor ideal de radiação) a uma temperatura aproximada de 5900 K.

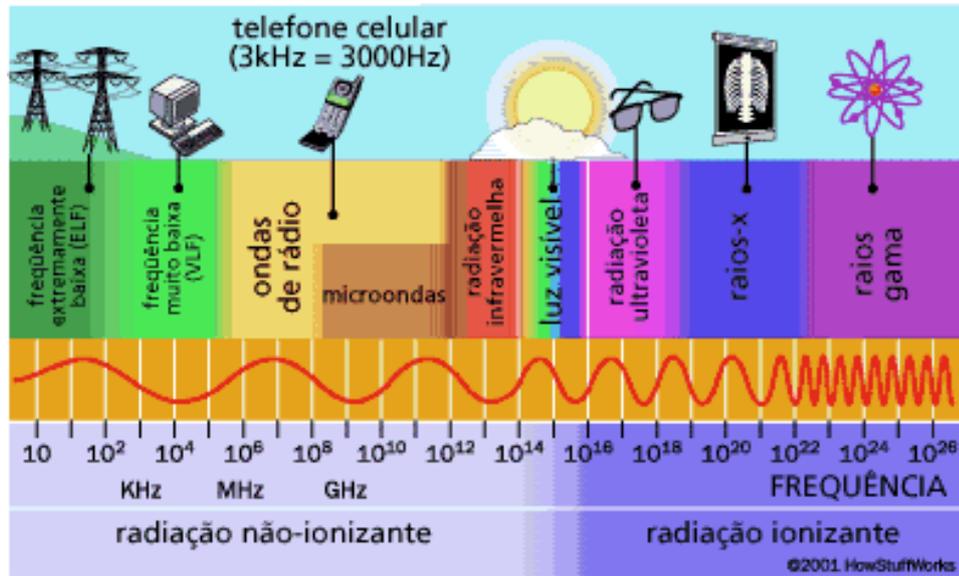


Figura 26: Representação do espectro eletromagnético, disponível em: < <http://blog.clickgratis.com.br/radicacoes2/> >, acesso em 05/05/2016.

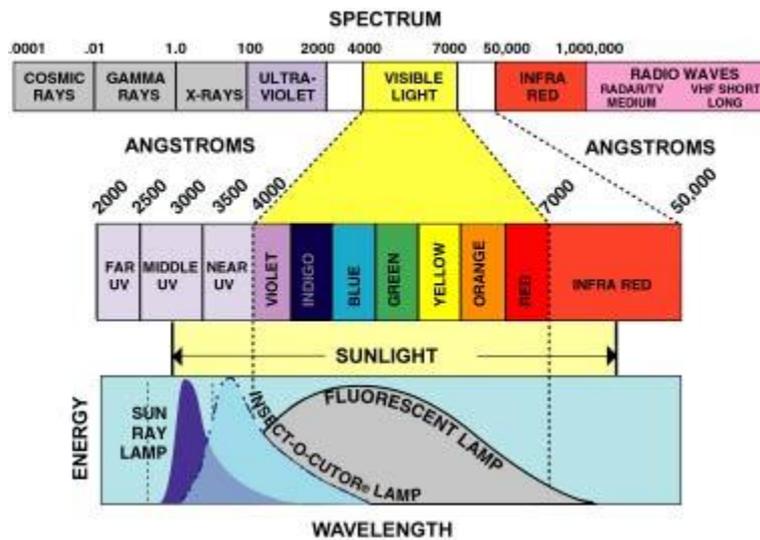


Figura 27: Detalhamento do espectro eletromagnético, disponível em: < <http://www.areaseg.com/luz/> >, acesso em 05/05/2016.

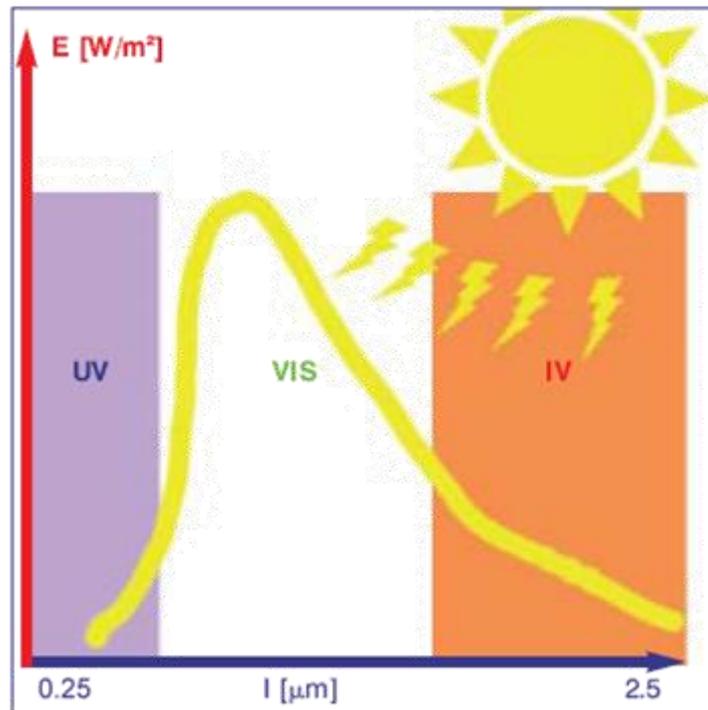


Figura 28: Comportamento da radiação solar em relação ao espectro eletromagnético, disponível em: < http://energiasrenovaveis.com/DetailNoticias.asp?ID_conteudo=102&ID_area=15 >, acesso em 05/05/2016.

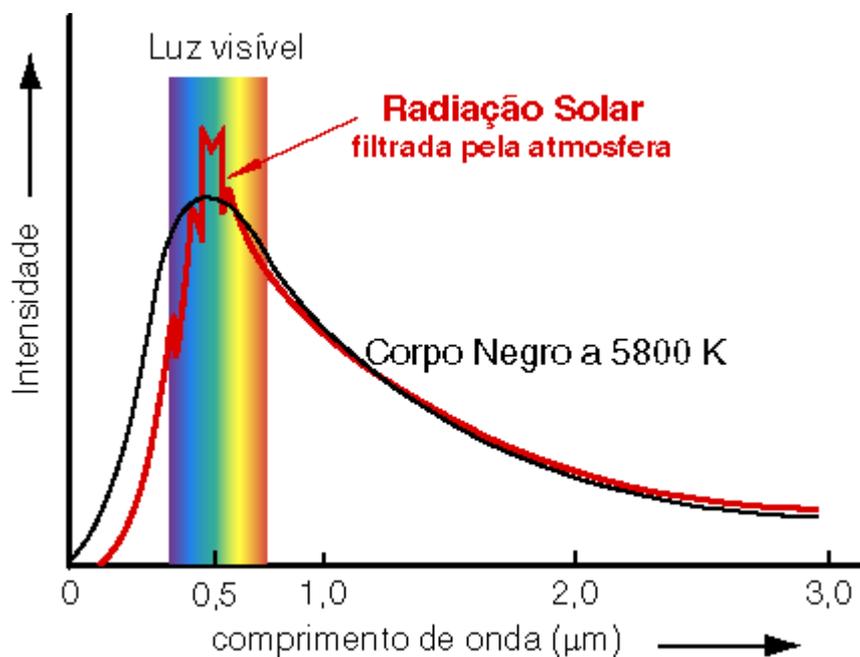


Figura 29: Comportamento da radiação solar em relação a radiação do corpo negro, disponível em: < http://www.oal.ul.pt/vt2004/Venus%20Transit%20Safety_radiacao.htm >, acesso em 05/05/2016.

5.3 Radiação Solar

Pode ser definida como uma forma de transferência de energia proveniente do sol e que se propaga pela terra na forma de ondas eletromagnéticas. Divide-se em radiação direta, radiação difusa e radiação devido ao albedo.

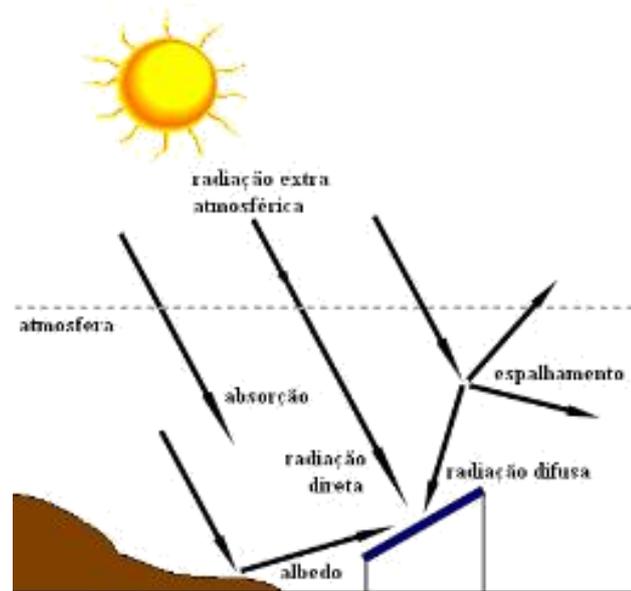


Figura 30: Tipos de radiação solar, disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAsG8AL/energia-renovaveis?part=4> >, acesso em 05/05/2016.

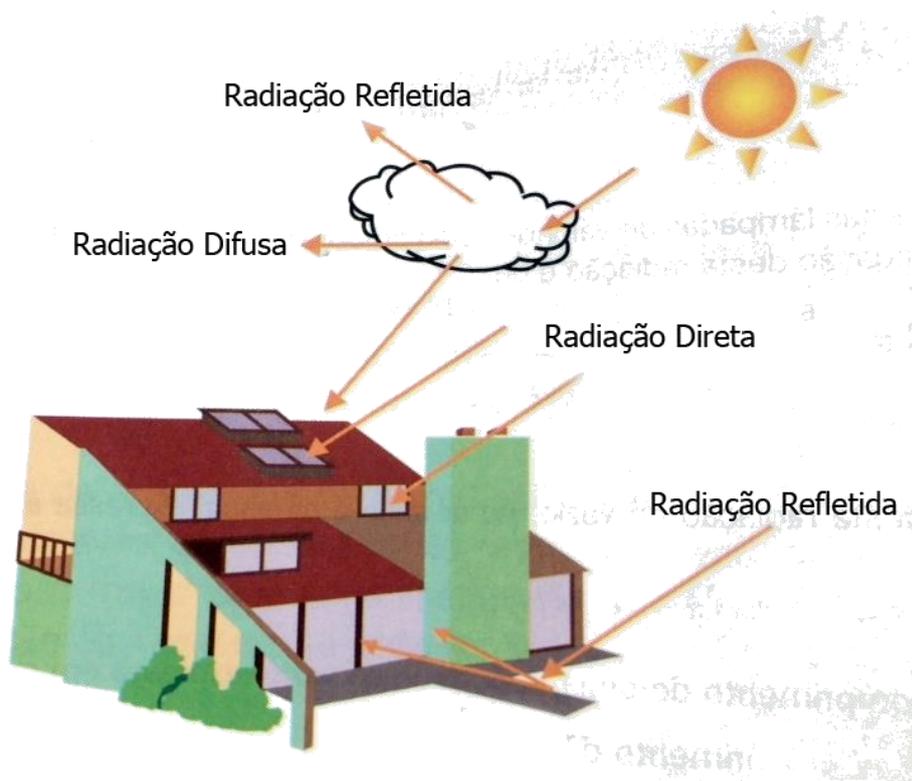


Figura 31: Exemplo de radiação direta e radiação difusa, disponível em: < <http://www.fcsolar.eco.br/aprenda-aqui/> >, acesso em 05/05/2016.

5.3.1 Radiação Direta

Parcela da radiação solar que incide sobre a superfície terrestre sem sofrer interferência de nenhum obstáculo, ou seja, sem sofrer desvios. É a radiação utilizada em sistemas solares de concentração.

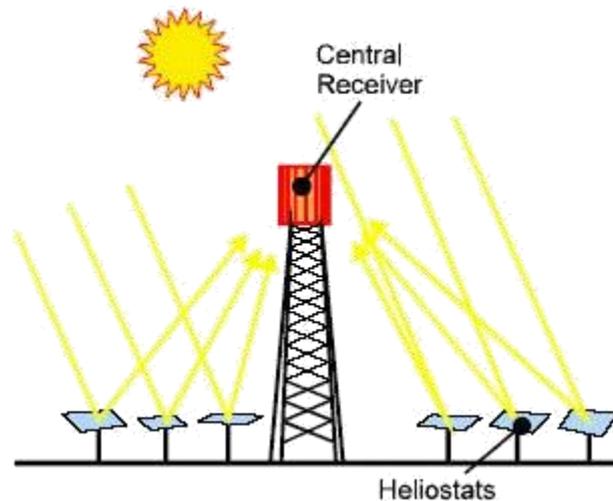


Figura 32: Exemplo de sistema solar concentrado, disponível em: < http://www.apolo11.com/energias_alternativas.php?posic=dat_20100924-103452.inc >, acesso em 05/05/2016.

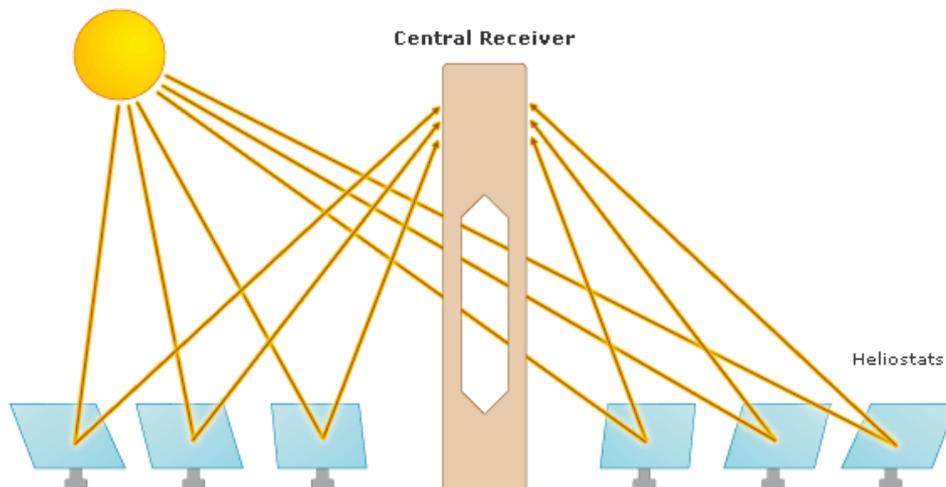


Figura 33: Exemplo de sistema de geração solar com elemento concentrador, disponível em: < http://detudoblogue.blogspot.com.br/2011_02_01_archive.html >, acesso em 05/05/2016.

5.3.2 Radiação Difusa

Trata-se da parcela da radiação solar que incide na superfície da terra após sofrer desvios na atmosfera e nas nuvens. Caracterizada por chegar à superfície terrestre em

diversas direções (direções aleatórias). Os sistemas solares não concentradores utilizam a radiação direta e a radiação difusa.

5.3.3 Radiação Devido ao Albedo

Considerando-se que a superfície receptora está inclinada, uma parcela da radiação será refletida no solo e incidirá sobre a face receptora, esta parcela de radiação recebe a designação de radiação devido ao albedo.

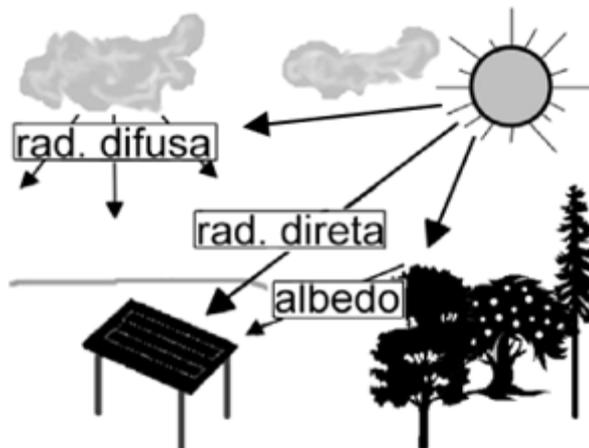


Figura 34: Representação da radiação devido ao albedo, disponível em: < http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000100036&script=sci_arttext >, acesso em 06/05/2016.

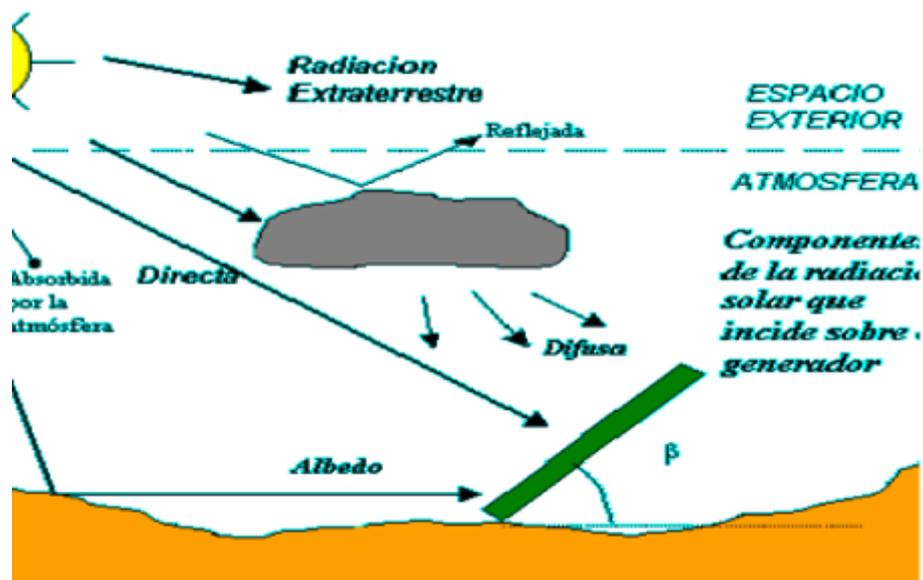


Figura 35: Radiação devido ao albedo incidindo sobre a superfície receptora, disponível em: < <http://docplayer.com.br/8204762-Faculdade-de-engenharia-da-universidade-do-porto.html> >, acesso 06/05/2016.

5.3.4 Radiação Global

Também pode ser designada de radiação total e corresponde a soma das radiações direta e difusa.

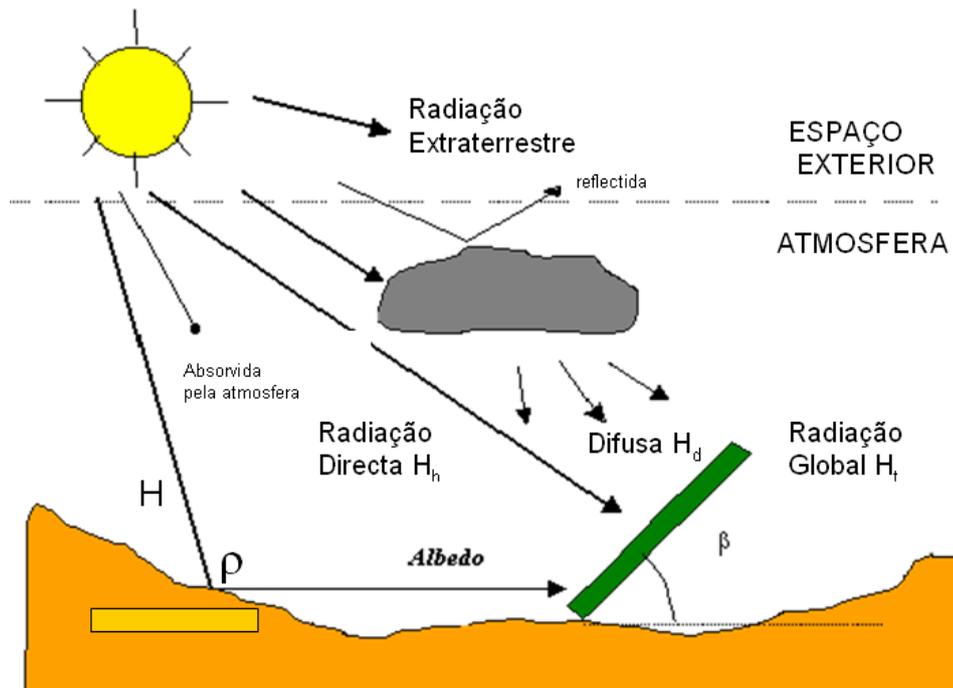


Figura 36: Representação dos tipos de radiações solares, disponível em: <
<http://docplayer.com.br/8395823-Requisitos-para-a-certificacao-pv.html>>, acesso em 06/05/2016.

5.4 Ângulos Relativos à Posição do Sol

Para o correto entendimento da terminologia utilizada em sistemas fotovoltaicos requisitamos de um entendimento concreto acerca dos ângulos relativos ao posicionamento do sol, tomando como referencial um observador localizado na superfície terrestre.

Os principais ângulos são listados abaixo:

- Ângulo solar ou elevação [γ_s];
- Ângulo zenital [θ_z];
- Ângulo azimutal do sol [α_s].

5.4.1 Altura Solar ou Elevação [γ_s]

Trata-se do ângulo formado entre o raio solar e a projeção do mesmo sobre o plano vertical.

5.4.2 Ângulo Zenital [θ_z]

Deve ser entendido como sendo o resultado da operação:

$$\theta_z = 90^\circ - \gamma_s$$

Como consequência da expressão anterior, na altura solar de 90° teremos $\theta_z = 0$ e afirmaremos que o sol esta no zênite.

5.4.3 Ângulo Azimutal do Sol [α_s]

Trata-se do ângulo (medido no sentido horário) entre o norte geográfico do planeta terra e a projeção do raio solar sobre o plano horizontal.

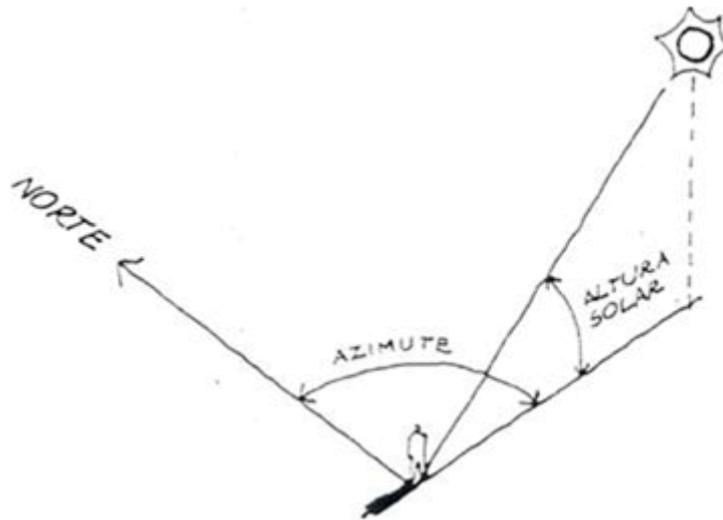


Figura 37: Representação gráfica da altura solar e do angulo de azimute, disponível em: < <https://radiobarrio.wordpress.com/rain-space/> >, acesso em 06/05/2016.

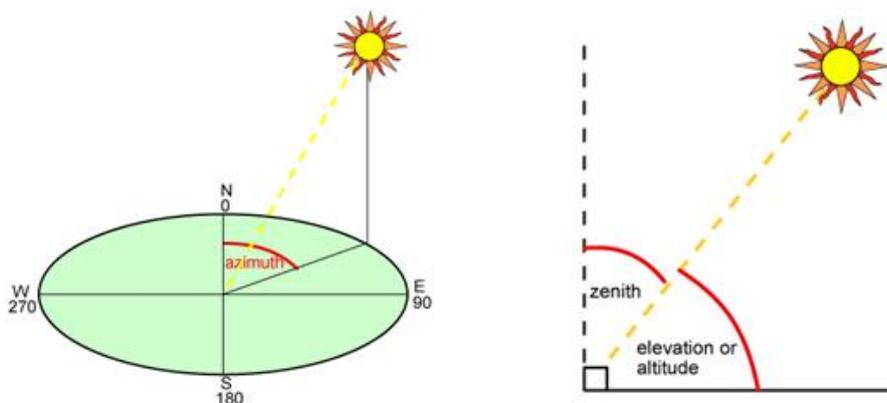


Figura 38: Ângulos relativos à posição do sol, disponível em: < <http://docplayer.com.br/12817568-Sistema-de-seguimento-solar-em-producao-de-energia-fotovoltaica.html> >, acesso em 06/05/2016.

5.5 AM

Termo derivado da sigla em inglês: *Air Mass* (massa de ar). Possibilita um referencial para comparação do comportamento do espectro de radiação solar quando o mesmo percorre caminhos distintos ao atravessar a atmosfera. Influencia diretamente na caracterização da intensidade e na composição espectral da radiação solar, sendo definida como:

$$AM = \frac{1}{\sin \gamma_S}$$

Sendo:

AM: Massa de Ar;

γ_S : Altura solar ou Elevação.

Convenções:

- AM 0 (AM=0): Massa de ar zero. Correspondente ao espectro de radiação solar no topo da atmosfera;
- AM 1 (AM=1): Correspondente ao sol posicionado de modo perpendicular à superfície da terra.

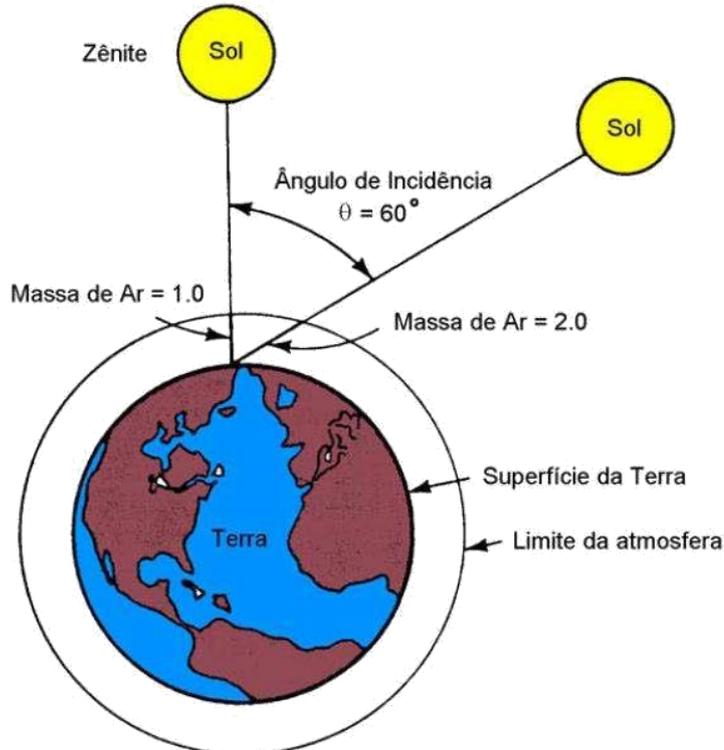


Figura 39: Caminhos distintos que a radiação solar percorre para atravessar a atmosfera, disponível em: < <http://docplayer.com.br/8204368-Eee934-impactode-gd-asredes-eletricas-http-www-cpdee-ufmg-br-selenios.html> >, acesso em 06/05/2016.

A intensidade e a composição espectral da radiação solar dependem ainda, dentre outros aspectos, da:

- a) Turbidez atmosférica;
- b) Água precipitável;
- c) Ozônio.

5.6 Irradiância e Irradiação

Desejando-se mensurar e estabelecer um paralelo entre a radiação solar e os conceitos de potência e energia, deveremos utilizar os conceitos de irradiância e irradiação. Ambas são obtidas através de estações solarimétricas, sendo a irradiação obtida a partir da integralização dos dados irradiâncias coletados através dos sensores da estação.

5.6.1 Irradiância (G)

Trata-se da radiação solar instantânea (potência instantânea), usualmente representada em W/m^2 ou KW/m^2 logo deve ser associada ao conceito de potência por metro quadrado (potência/ m^2).

5.6.2 Irradiação (H)

Quando consideramos a totalização (integração) da irradiância ao longo de uma unidade de tempo, deixamos de nos referir a irradiância e passamos a utilizar o conceito de irradiação, ou seja, a irradiação corresponde a radiação solar integrada, indicada em Wh/m^2 , devendo ser associada ao conceito de energia por metro quadrado (energia/ m^2). Outras unidades de irradiação são: $Wh/m^2.dia$, $KWh/m^2.dia$, $KWh/m^2.ano$.

Informações adicionais acerca da irradiação de determinadas regiões brasileiras podem ser obtidas a partir de consultas a publicações especializadas como, por exemplo, o atlas brasileiro de energia solar de onde podemos extrair informações, a partir da consulta a mapas, de valores aproximados de irradiação global horizontal e inclinada (considerando que a inclinação coincide com a latitude da localidade), além de outras especificidades, de modo sazonal ou anual.

5.7 Instrumentação Solar

5.7.1 Sensores de Radiação

Para fins de medição do potencial solar são utilizados principalmente dois tipos de sensores de radiação:

- a) Termopilhas;
- b) Células de silício monocristalino.

A. Termopilhas

Funcionam a partir da tensão elétrica gerada em função da diferença de temperatura existente entre duas superfícies igualmente iluminadas, sendo uma pintada na cor preta e uma outra pintada na cor branca.

B. Células de Silício Monocristalino

Como o próprio nome sugere utilizam como elemento sensível uma célula de Si do tipo monocristalino. São caracterizadas por seu baixo custo quando comparadas aos sensores baseados em termopilhas (10 a 20% mais baratos), entretanto possuem uma menor sensibilidade que os anteriores.

5.7.2 Principais Instrumentos

A. Heliógrafo

Destina-se a medir a duração da insolação. O funcionamento é bastante simples, trata-se de uma faixa de papel (fita heliográfica ou fita de heliógrafo) que recebe a incidência da radiação solar focalizada ao longo do dia.

A incidência da radiação solar sobre o papel faz com que o mesmo passe a ter um aspecto enegrecido. O número de horas de insolação é definido em função do comprimento total dos trechos queimados.

O enegrecimento do papel ocorre para valores de radiação solar próximos a 120 W/m^2 , segundo a organização meteorológica mundial.



Figura 40: Aspecto visual do heliógrafo, disponível em: < <http://meteoropole.com.br/2012/03/bola-de-cristal/> >, acesso em 06/05/2016.



Figura 41: Heliógrafo, disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABPIEK/meteorologia-basica?part=3> >, acesso em 06/05/2016.



Figura 42: Diferentes modelos de fitas de heliógrafo. 1, 2 e 3 - modelo curva comprida, 4 e 5 modelo reto, 6,7 e 8 - modelo curva curta, disponível em: < <http://meteoropole.com.br/2012/03/bola-de-cristal/> >, acesso em 06/05/2016.

B. Actinógrafo ou Piranógrafo

Tem como finalidade precípua a medição da radiação solar global ou ainda a medição da componente difusa. Em sua estrutura estão integrados o sensor e o registrador em uma mesma unidade. A totalização dos registros é efetuada através de um dispositivo designado de planímetro, que deve ser adquirido separadamente.

Seu princípio operativo está fundamentado no uso de um sensor composto por três lâminas bimetálicas (duas na cor brancas e uma na cor preta), sendo duas fixas (brancas) e uma com apenas uma das extremidades fixa (preta). Quando submetidas à radiação as lâminas se dilatam de modos distintos (metais com coeficientes de dilatação distintos), esta deformação irregular é transmitida mecanicamente a uma pena destinada a realizar o registro dos dados em uma carta de papel posicionada sobre um tambor.

Tem como principal vantagem o seu custo reduzido e como principal desvantagem a necessidade de aquisição do planímetro.

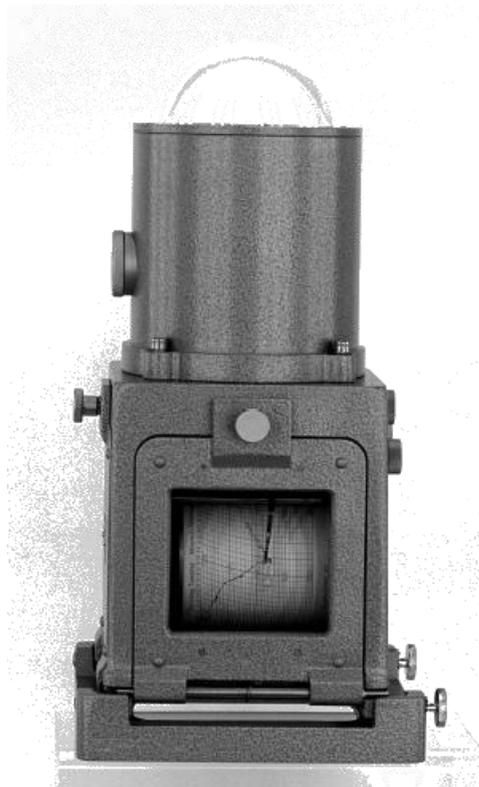


Figura 43: Aspecto visual do actinógrafo, disponível em: <
<https://www.flickr.com/photos/87668408@N04/8024342930> >, acesso em 06/05/2016.



Figura 44: Actinógrafo, disponível em: < http://sonda.ccst.inpe.br/fotos/CAI/2002/caico_06.html >, acesso em 06/05/2016.



Figura 45: Actinógrafo e heliógrafo, disponível em: < <http://meteoropole.com.br/2014/02/detalhe-do-termometro-de-maxima-temperatura-e-informacoes-diversas-sobre-instrumentos-convencionais/> >, acesso em 06/05/2016.

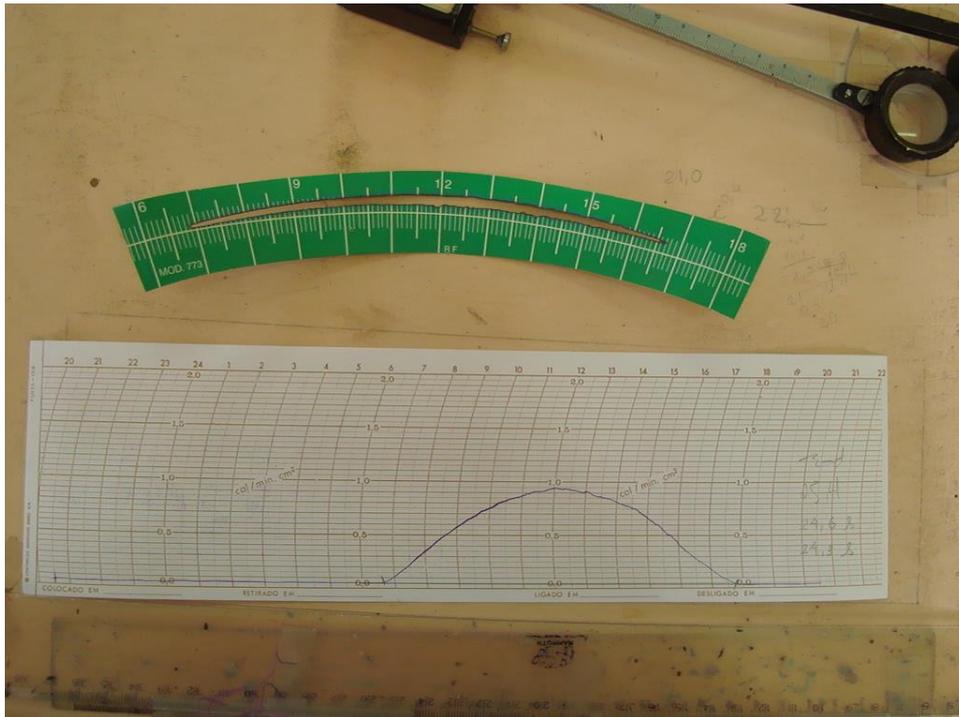


Figura 46: Fita do heliógrafo e registro do actinógrafo, disponível em: < <https://www.flickr.com/photos/87668408@N04/8026520822> >, acesso em 06/05/2016.

C. Piranômetro

Pode ser dividido em 2 tipos básicos:

- a) Piranômetro fotovoltaico;
- b) Piranômetro termoelétrico.

Este instrumento destina-se a efetuar as medições de radiação solar global ou radiação solar difusa, na forma de irradiância. Para medir radiação difusa deve-se garantir que os sensores do instrumento estejam sombreados, minimizando o efeito da radiação solar direta. Em geral os sensores são sombreados através de uma banda ou disco.



Figura 47: Piranômetro, disponível em: < <http://sensovant.com/productos/meteorologia/radiacion-solar/articulo/piranometro-estandar-secundario-secondary-standard-SR20-D1-MODBUS.html> >, acesso em 06/05/2016.



Figura 48: Piranômetro portátil, disponível em: < <http://sensovant.com/productos/meteorologia/radiacion-solar/articulo/piranometro-portatil-precio-venta-economico-LP02.html> >, acesso em 06/05/2016.

D. Piroeliômetro

Destina-se a medição da radiação solar direta. Construtivamente é constituído por uma pequena abertura cuja finalidade é captar unicamente o disco solar e a região circunsolar.



Figura 49: Pireliômetro conectado ao robô rastreador, disponível em: < http://sonda.ccst.inpe.br/fotos/CAI/2002/caico_20.html >, acesso em 06/05/2016.



Figura 50: Pireliômetro, disponível em: < http://recursosolar.geodesign.com.br/Pages/Pyrheliometer_RS.html >, acesso em 06/05/2016.

Para consecução deste objetivo este instrumento requisita de um dispositivo destinado a acompanhar o movimento do sol.

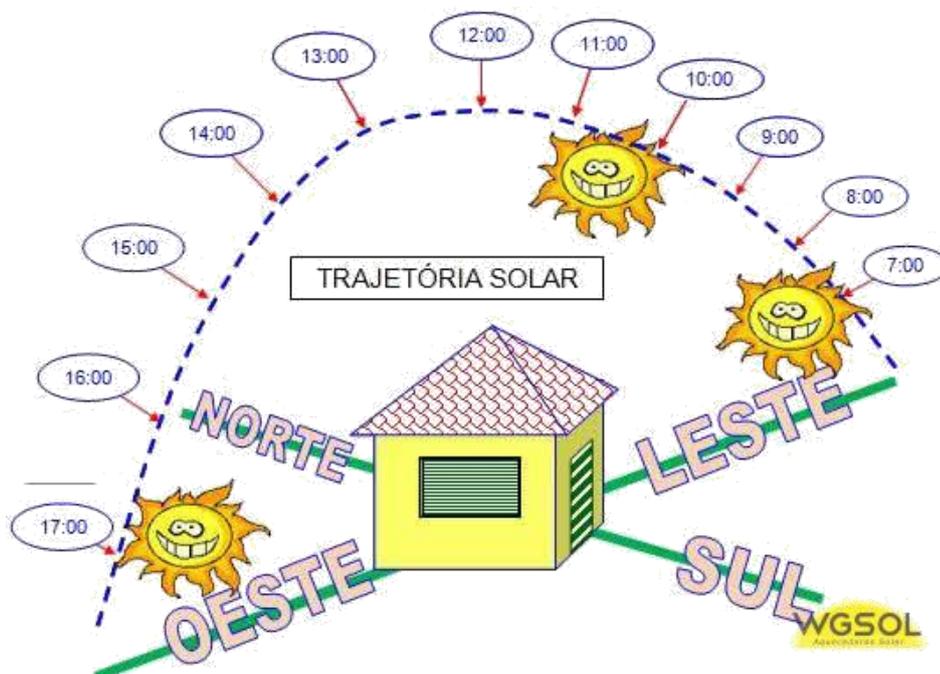


Figura 51: Trajetória solar, disponível em: < <http://wgsol.com.br/energia-solar-parte-1/> >, acesso em 06/05/2016.

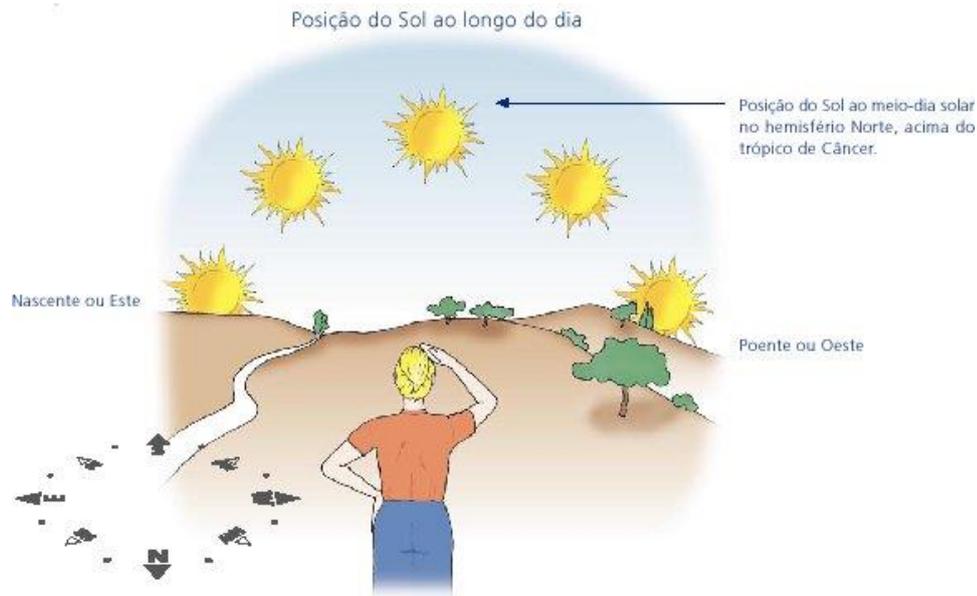


Figura 52: Movimento do sol ao longo do dia, disponível em: < [http://www.cienciaviva.pt/equinocio/lat long/cap4.asp](http://www.cienciaviva.pt/equinocio/lat_long/cap4.asp) >, acesso 06/05/2016.

6. Célula Fotovoltaica

A célula fotovoltaica pode ser definida como a menor unidade de um sistema fotovoltaico ou simplesmente como dispositivo fotovoltaico básico ou ainda a unidade básica destinada a efetuar a conversão direta de energia solar em energia elétrica. A fim de aumentar a quantidade de energia disponível, normalmente se agrupam vários conjuntos de células, uma vez que uma célula individualmente produz pouca energia elétrica.

Um agrupamento de células fotovoltaicas pode receber as designações de módulo, placa ou painel fotovoltaico, ou seja, um painel, placa ou módulo corresponderá a um conjunto empacotado de células FV's interligadas de modo a atingir valores desejados de corrente e/ou tensão. Ou ainda um conjunto de células fotovoltaicas encapsuladas e interligadas eletricamente com a finalidade de produzir eletricidade. A vida útil de um módulo fotovoltaico é estimado em 24 anos.

A eficiência dos módulos depende, dentre outras características, do tipo e da qualidade do material semicondutor utilizado, bem como da qualidade de suas conexões elétricas. No Brasil a eficiência energética dos módulos é controlada a partir de um sistema de etiquetagem popularmente conhecido como selo Procel⁴ de economia de energia. Comercialmente a eficiência dos módulos é de aproximadamente 15%⁵, considerando que a energia do sol chega a superfície terrestre com potência média de 1000 W/m².

Quanto a fabricação dos módulos existe basicamente duas configurações básicas:

⁴ Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica.

⁵ Em uma área de células equivalentes a 1m² pode-se produzir 150 W de potência elétrica.

- a) Agrupamento de células FV's constituídas por finíssimas fatias de silício cristalino, posicionadas entre vidros e emolduradas com alumínio;
- b) Aplicação de camada de material semicondutor na forma de plasma sobre uma superfície rígida (vidro) ou flexível destinada a funcionar como base ou apoio ao material semicondutor. Posteriormente o conjunto é recoberto com um vidro ou outro material transparente. Este arranjo recebe a designação de módulo de filme fino.

Na primeira técnica existe uma predominância de utilização de silício cristalino enquanto que na segunda utiliza-se silício na forma não cristalina (silício amorfo) ou compostos químicos tais quais:

- a) Telureto de cádmio (CdTe);
- b) Disseleneto de cobre (gálio) e índio (CIS e CIGS).

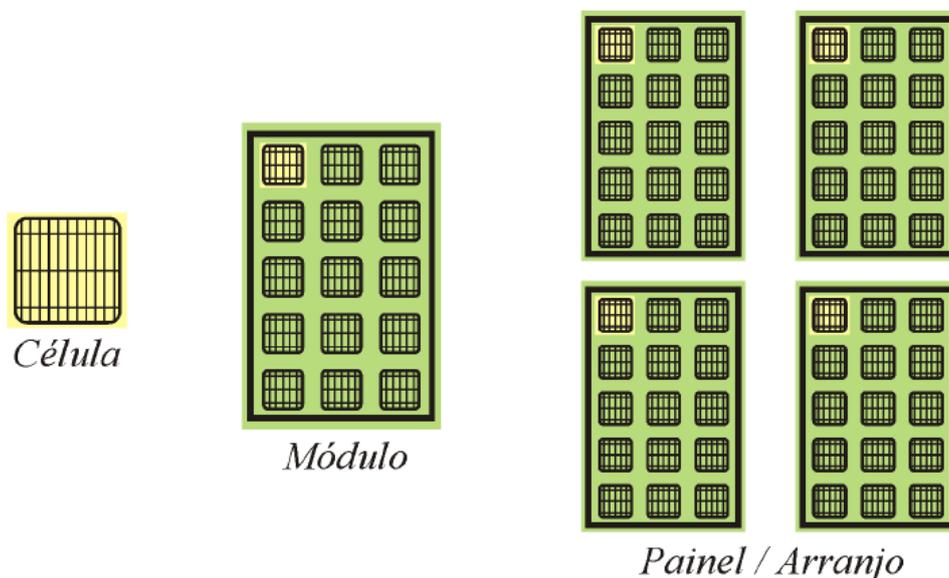


Figura 53: Representação da célula, módulo e painel/arranjo fotovoltaico, disponível em: < <http://inergiae.com.br/site/paineis-fotovoltaicos/> >. Acesso em 03/06/2016.

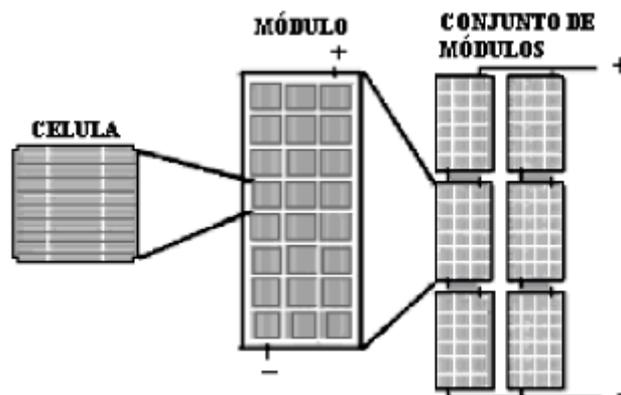


Figura 54: Hierarquia fotovoltaica, disponível em: < http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000022004000200020&script=sci_arttext >, acesso em 03/06/2016.

Num módulo as células são interconectadas eletricamente e dispostas fisicamente sobre uma superfície rígida. Teoricamente quando são necessárias maiores correntes de saída as células são conectadas em paralelo e quando a demanda for por maiores valores de tensão as células são conectadas em série. Comercialmente os módulos FV's são fabricados a partir de células FV interligadas em série, a fim de obter maiores tensões nas saídas dos módulos.

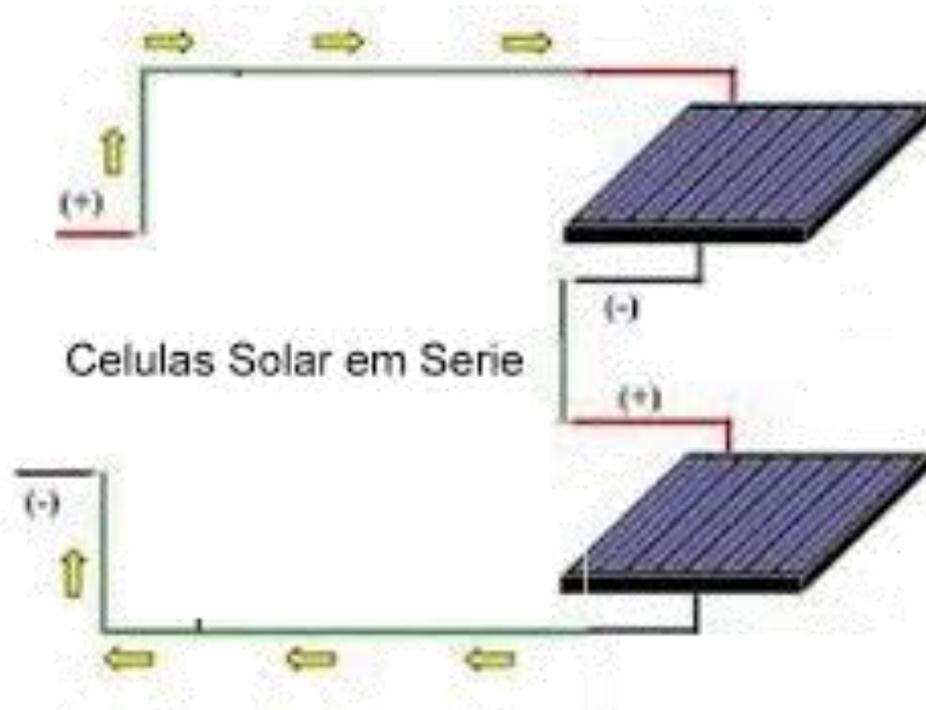


Figura 55: Exemplo de associação de células FV em série, disponível em: < <https://plus.google.com/+IbytesBr> >. Acesso em 03/06/2016.

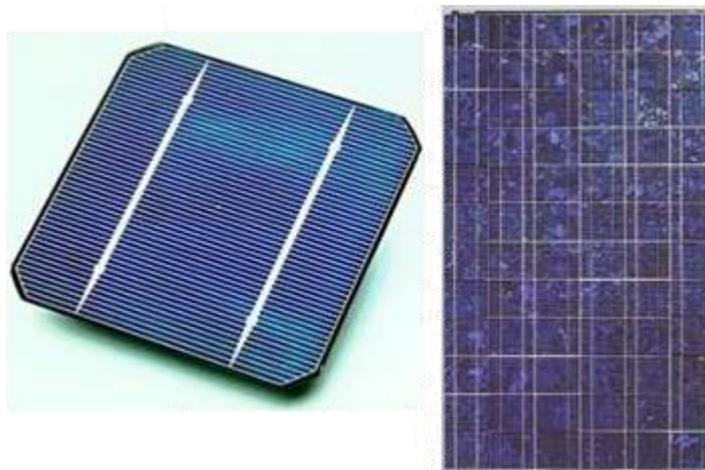


Figura 56: Exemplo de célula e de painel fotovoltaico, disponível em: < <https://solectricenergiasolar.wordpress.com/2013/11/25/de-que-estao-hechos-los-paneles-solares/> >, acesso em 24/06/2016.

A associação de módulos FV enfatiza a característica modular da energia solar FV, permitindo aos projetistas e/ou usuários adequar as instalações às suas necessidades orçamentárias ou de espaço físico, além de permitir a montagem e desmontagem dos arranjos de painéis em outras localidades.

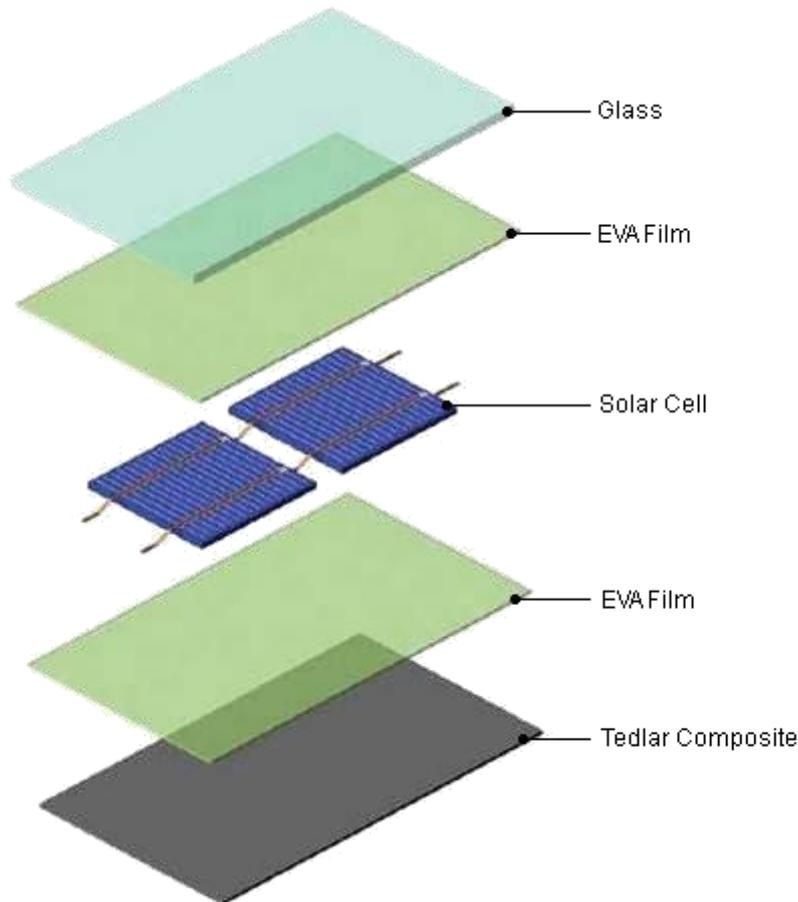


Figura 57: Vista explodida do painel solar, disponível em: < <http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-706861504-painel-solar-75w- JM> >, acesso em 24/06/2016.

Podemos citar como exemplos de empresas fabricantes de módulos fotovoltaicos:

- a) *Yingli Green Energy Holding Company Limited;*
- b) *Bosch;*
- c) *Hanwha Solar One;*
- d) *Canadian Solar.*

Na parte traseira do módulo existe uma caixa de interligações denominada de caixa de junção. Esta caixa é fonte de aquecimento em caso de conexões elétricas mal executadas (exemplo: conexão sem conector MC4). Nas rotinas de manutenção é conveniente realizar a inspeção termográfica da caixa de junção.

6.1 Módulos de Silício Cristalino X Módulos de Filme Fino

Quanto ao aspecto visual os módulos de silício cristalino podem ser diferenciados dos módulos de filme fino, em razão destes últimos serem formados por uma única célula de grande área, ou seja, o módulo de filme fino será constituído por uma única célula cujas dimensões coincidem com dimensões do módulo. Em razão desta característica as células de filme fino são menos sensíveis as perdas de eficiência associadas ao sombreamento parcial dos módulos melhorando o aproveitamento do recurso solar, em situações de baixa radiação direta e para incidência de radiação difusa.

Ainda no que se refere a aparência, os módulos de silício cristalino possuem uma tonalidade azulada. Esta cor é utilizada por proporcionar uma melhor eficiência de conversão. Durante o processo de fabricação das células comerciais, as fatias de silício (chamadas de *wafers*) tem tonalidade cinza fosco (cor natural do silício) e nas últimas etapas do processo produtivo recebem uma camada antireflexiva ultrafina (nitrato de silício), sendo esta última responsável pela tonalidade azulada da célula comercial.

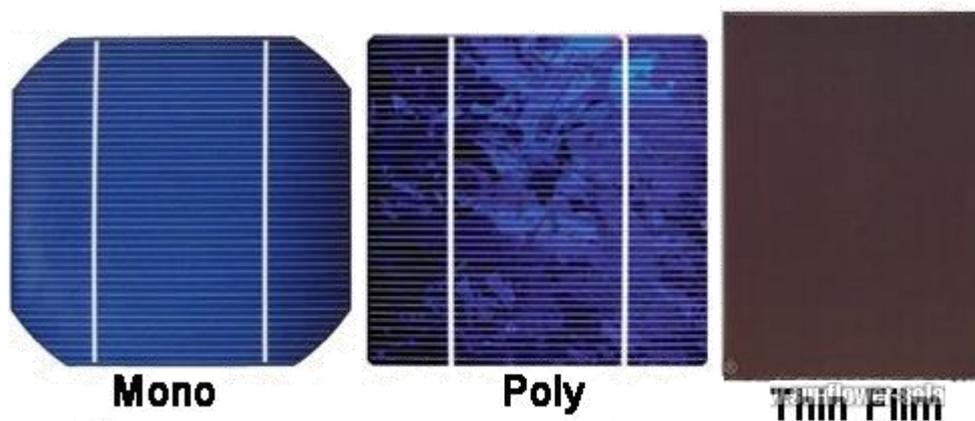


Figura 58: Células de silício monocristalino, policristalino e filme fino, disponível em: <www.sunflower-solar.com>, acesso em 24/06/2016.

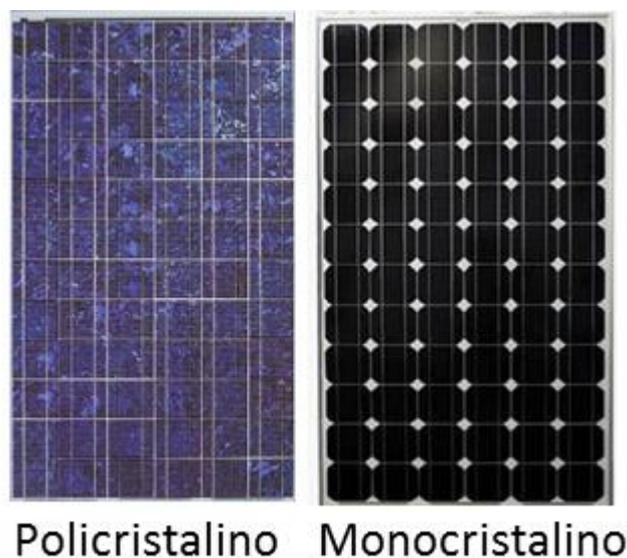


Figura 59: Aspecto visual dos painéis policristalino e monocristalino, disponível em: < <https://solectricenergiasolar.wordpress.com/2013/11/25/de-que-estao-hechos-los-paneles-solares/> >, acesso em 24/06/2016.

Outra especificidade inerente aos módulos de filme fino é fato dos mesmos apresentarem um aspecto visual mais uniforme, ao passo que nos módulos de silício cristalino teremos um conjunto de células individuais. A tecnologia de filme fino é mais fácil de ser integrada as edificações urbanas, em razão da possibilidade de poder ser montada sobre uma base flexível.

Diante do exposto pode-se considerar os módulos de filme fino como sendo flexíveis, praticamente inquebráveis, leves, semitransparentes e com superfícies curvas, aspectos que agregam bastante versatilidade e maior gama de aplicações quando comparadas as tecnologias de silício cristalino convencionais.

Abaixo listamos algumas das características elétricas das placas de silício cristalino:

- a) Podem gerar, a depender do modelo, potências entre 50 e 250 W;
- b) Disponibilizam tensões máximas de saída próximas de 37 volts;
- c) Suas correntes podem chegar a 8 A.

Algumas especificações dos módulos fotovoltaicos de filme fino são:

- a) Potências de geração situadas entre 50 e 100 W;
- b) As tensões de saída podem chegar a 70 V;
- c) Quanto as correntes, os módulos de filme fino possuem como peculiaridade o fato de disponibilizar baixos valores de corrente em suas saídas.

A característica expressa pela alínea 'c' corresponde a uma grande desvantagem da tecnologia de filme fino, uma vez que para obter valores expressivos de corrente seriam necessários vários conjuntos de placas de filme fino interligadas em paralelo.

As células policristalinas são caracterizadas por se aquecerem mais que as células de filme fino. As células de filme fino possuem taxa de depreciação aproximada de 0,5% a 1,0% ao ano.

O processo produtivo inerente as etapas de fabricação dos módulos de filme fino, quando comparada a produção de módulos de silício cristalino, consome menos energia, requer pequena quantidade de matéria prima e menores temperaturas, minimizando as perdas associadas ao corte dos wafers de silício.

Quando comparadas sob o prisma da eficiência por área de módulo, a tecnologia de filme fino necessita de uma maior área de módulo para produzir a mesma energia de um módulo cristalino, tendo, portanto, uma menor eficiência por área de módulo.

6.2 *Array* de Módulos

A depender das especificidades do projeto e/ou das características das cargas a serem alimentadas, a instalação fotovoltaica vai ser montada a partir da interligação de conjuntos de módulos fotovoltaicos. A fim de obter uma especificação de corrente e/ou tensão elétrica mais adequada, poderemos optar por realizar:

- a) Conexão de módulos em série;
- b) Conexão de módulos em paralelo;
- c) Conexão mista de módulos.

A interligação de módulos fotovoltaicos de modo a obter um agrupamento recebe a designação de arranjo ou conjunto fotovoltaico. Muitas publicações, principalmente internacionais, utilizam também a nomenclatura de *Array* como sendo associada a um arranjo ou conjunto.

6.2.1 Conexão Série de Módulos

Em aplicações nas quais pretende-se integração com a rede elétrica de distribuição, caracterizadas por operar com tensões mais elevadas, de um modo geral, utilizam-se conjuntos com mais de dez módulos interligados em série. A ligação em série proporciona maiores valores de tensão associados com baixas correntes de operação.

Quando a associação envolver a interligação de módulos em série utiliza-se a designação de *strings*. Tal terminologia tem uso bastante difundido nos estudos correlacionados a aplicações fotovoltaicas conectadas a rede.

As principais características da ligação série são:

- a) A tensão de saída da associação vai corresponder ao somatório da tensão individual de cada módulo que integra a associação, ou seja, em série as tensões se somam;
- b) A corrente de saída da associação corresponderá a mesma corrente que circula por todo conjunto, ou seja, em série a corrente permanece sempre a mesma;
- c) O gráfico I - V (tensão – corrente) tem formato semelhante ao gráfico de um módulo individual;
- d) Caso se interliguem dois módulos em série, as respectivas tensões de circuito aberto individuais se somam: $V_{OC_{TOTAL}} = V_{OC1} + V_{OC2}$;
- e) Novamente para uma associação de dois módulos, a corrente de curto circuito do conjunto será equivalente a corrente de curto de cada módulo individualmente: $I_{SC_{TOTAL}} = I_{SC1} = I_{SC2}$.

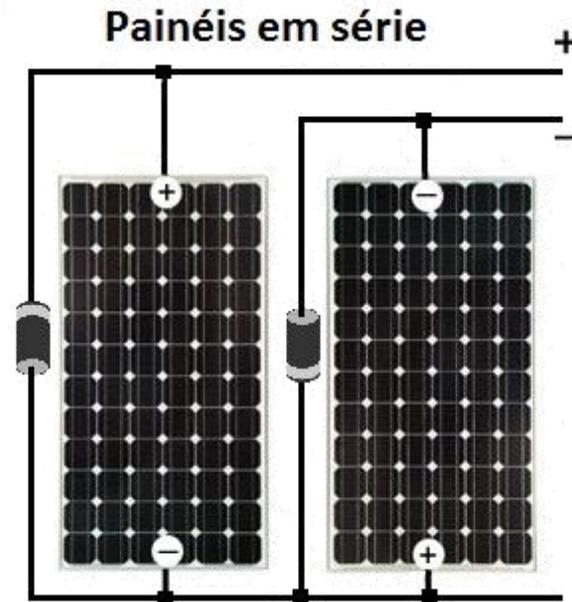


Figura 60: Exemplo de conexão de painéis FV em série, disponível em: < <http://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-serie.html> >. Acesso em 03/06/2016.

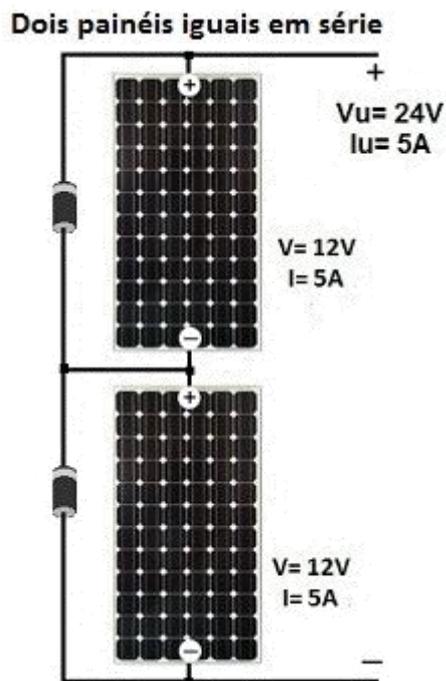


Figura 61: Exemplo de conexão série entre dois painéis com as mesmas especificações elétricas, disponível em: < <http://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-serie.html> >. Acesso em 03/06/2016.

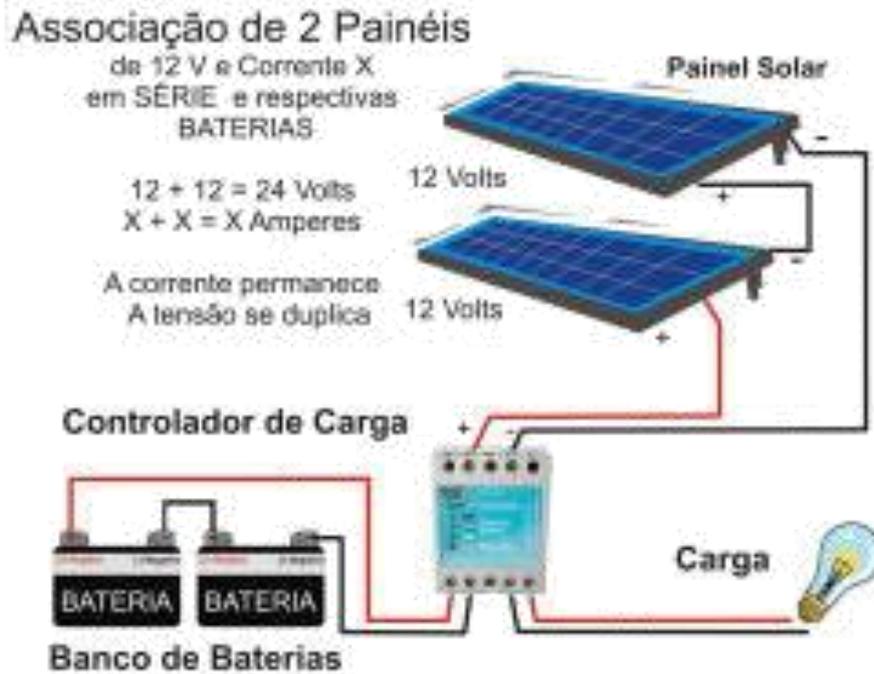


Figura 62: Exemplo de instalação FV utilizando painéis conectados em série, disponível em: < http://www.sunlab.com.br/Dimensionamento_solar_fotovoltaico.htm >. Acesso em 03/06/2016.

6.2.2 Conexão Paralela de Módulos

No que se refere aos agrupamentos de módulos em paralelo, os mesmos comumente estão associados a sistemas fotovoltaicos autônomos, uma vez que estas aplicações operam com baixos valores de tensão. A conexão paralela de módulos proporciona maiores valores de corrente associado como tensões reduzidas, por conseguinte, teremos maiores valores de perdas por efeito Joule.

As principais características da ligação paralela são:

- A corrente de saída da associação vai corresponder ao somatório das correntes individuais de cada módulo que integra a associação, ou seja, em paralelo as correntes se somam;
- A tensão de saída da associação corresponderá a mesma tensão fornecida individualmente por cada módulo, ou seja, em paralelo a tensão permanece sempre a mesma;
- O gráfico $I-V$ (tensão - corrente) tem formato semelhante ao gráfico de um módulo individual;
- Caso se interliguem dois módulos em paralelo, as respectivas correntes de curto circuito individuais se somam: $I_{SC_{TOTAL}} = I_{SC1} + I_{SC2}$.
- Novamente para uma associação de dois módulos, a tensão de circuito aberto do conjunto será equivalente a tensão de circuito aberto de cada modulo individualmente: $V_{OC_{TOTAL}} = V_{OC1} = V_{OC2}$.

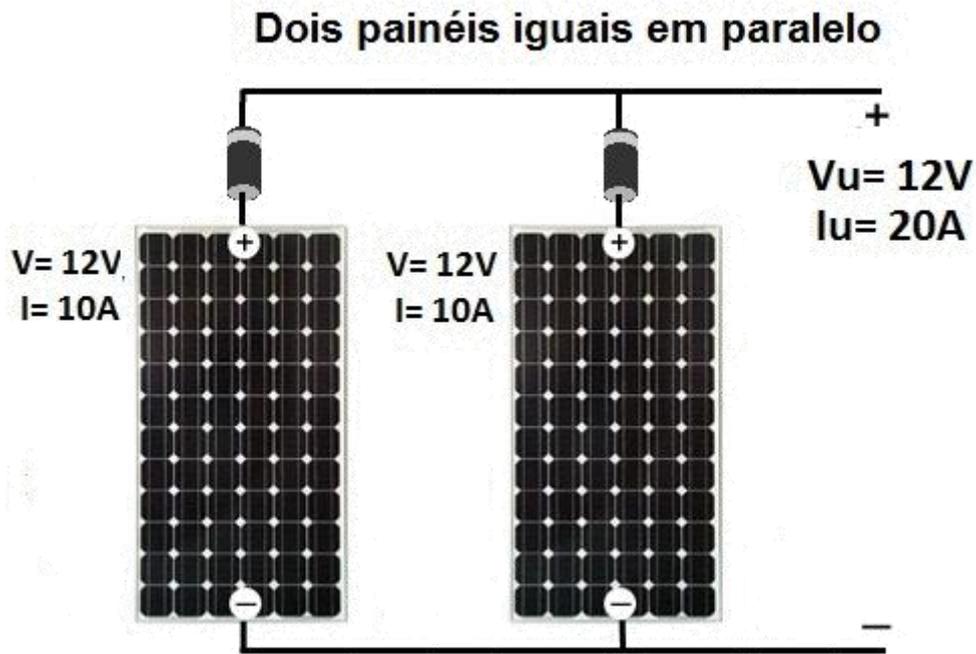


Figura 63: Exemplo de conexão paralela de painéis com as mesmas especificações elétricas, disponível em: < <https://br.pinterest.com/pin/527976756291607681/> >. Acesso em 03/06/2016.

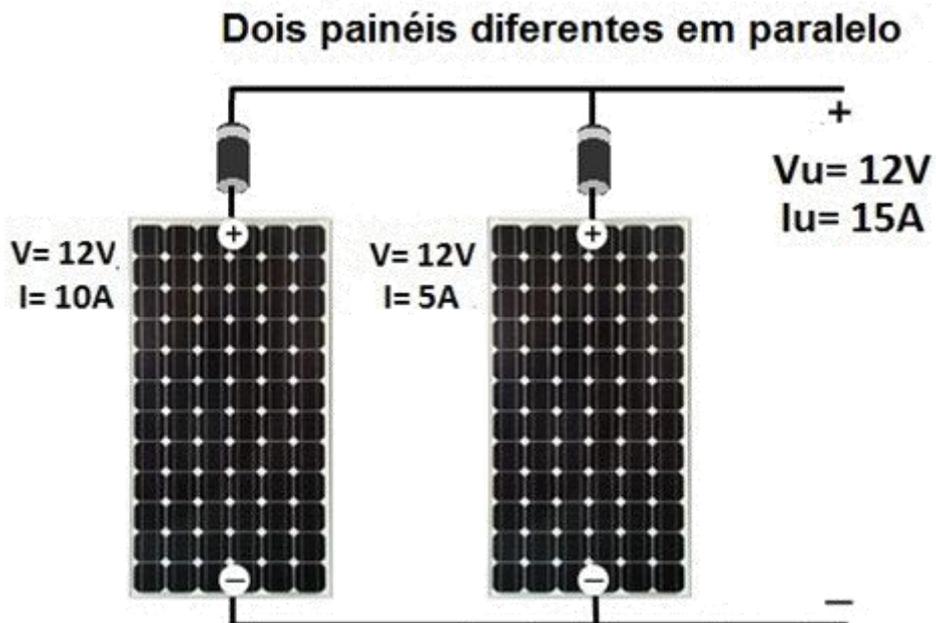


Figura 64: Exemplo de conexão paralela entre painéis com especificações elétricas distintas, disponível em: < <http://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-paralelo.html> >. Acesso em 03/06/2016.

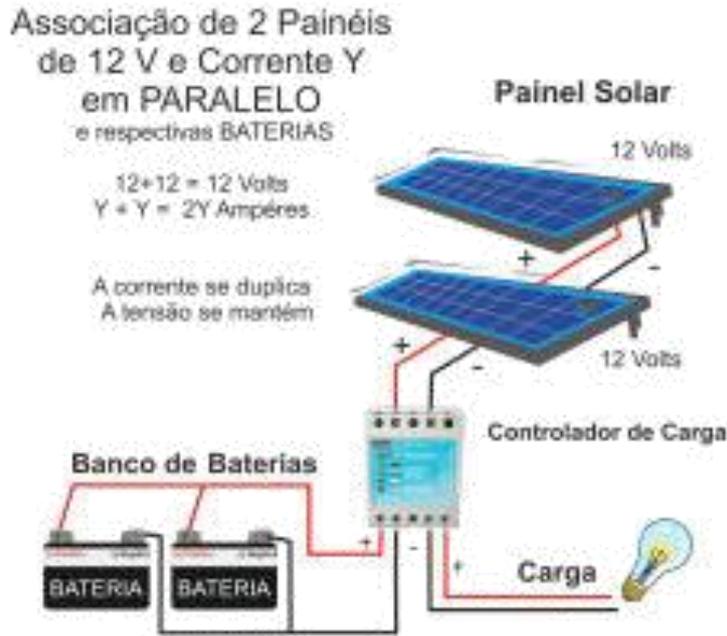


Figura 65: Exemplo de instalação FV utilizando painéis conectados em paralelo, disponível em: < http://www.sunlab.com.br/Dimensionamento_solar_fotovoltaico.htm >. Acesso em 03/06/2016.

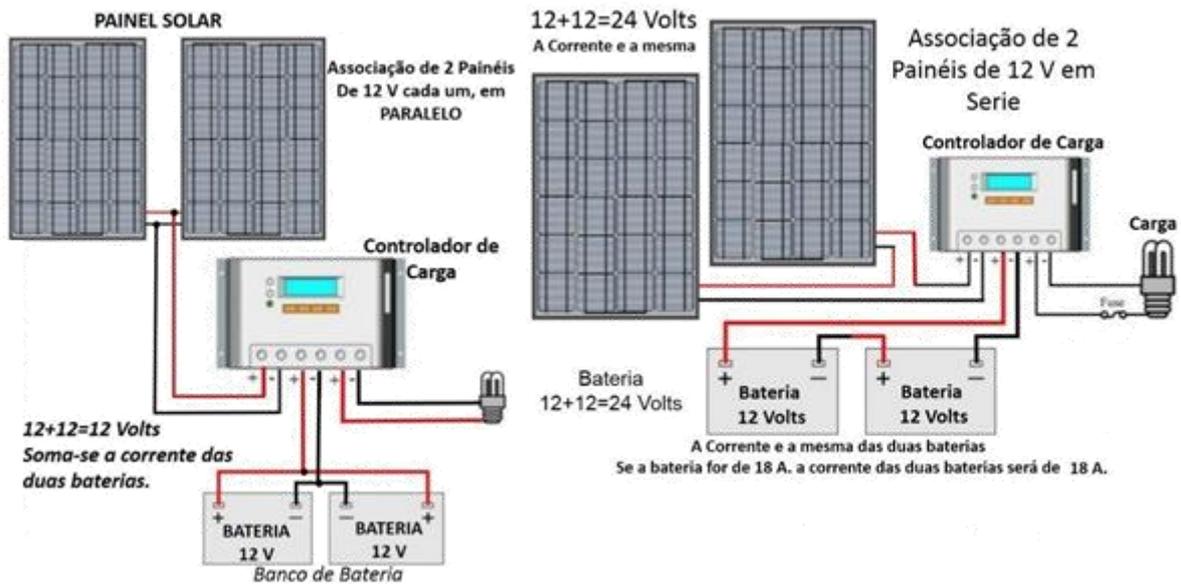


Figura 66: Comparativo entre a conexão de painéis em série ou em paralelo, disponível em: < <http://www.osol.com.br/dimensionamento-de-sistema-solar-autonomo-off-grid/> >. Acesso em 03/06/2016.

6.2.3 Conexão Mista de Módulos

Desejando atingir maiores valores de potência elétrica poderemos optar por uma ligação mista entre os módulos, por exemplo, interligando em paralelo, conjuntos de módulos previamente interligados em série.

Tipicamente numa associação de módulos em série, seguida de uma associação paralela dos conjuntos série, teremos um exemplo de conexão mista. Neste caso tensão de saída e corrente oriundas de cada agrupamento serão somadas.

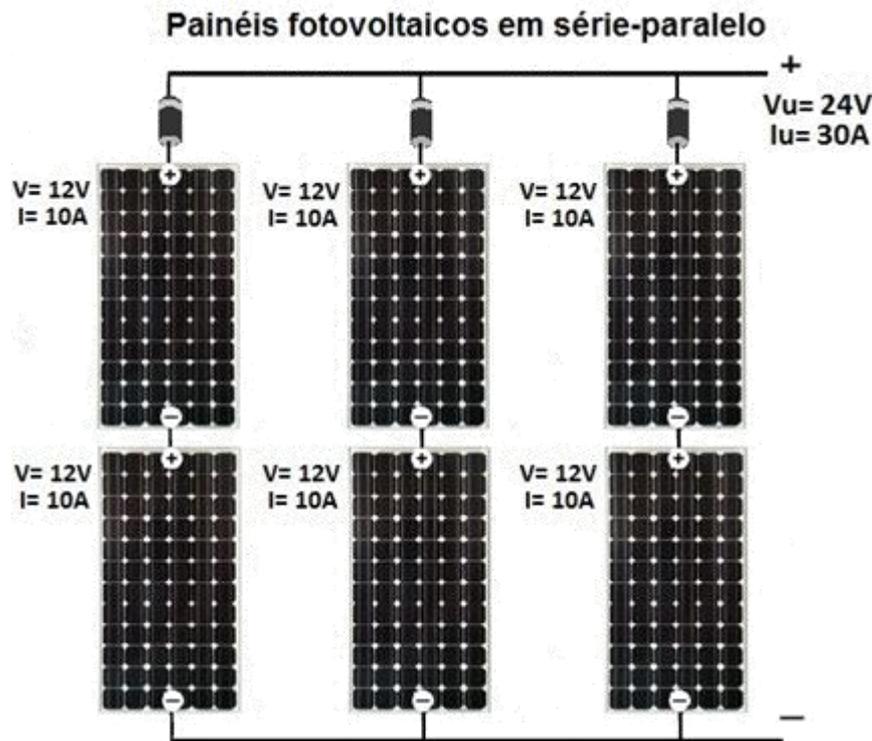


Figura 67: Exemplo de conexão de painéis FV em série-paralelo, disponível em: < <https://br.pinterest.com/pin/527976756291607681/> >. Acesso em 03/06/2016.

7. Aplicações da Geração Fotovoltaica

A energia solar pode ser utilizada para inúmeras aplicações, em função dos níveis de potência requeridos pela carga (no caso da energia solar fotovoltaica) e principalmente das especificidades do local onde serão instalados os coletores solares (energia solar térmica) ou os módulos fotovoltaicos (energia solar fotovoltaica). Algumas destas aplicações são:

- a) Geração de calor;
- b) Geração de eletricidade nas formas direta e indireta;
- c) Sistemas fotovoltaicos conectados (interligados) a rede elétrica;
- d) Sistemas fotovoltaicos autônomos (isolados);
- e) Sistemas de geração híbrida.

No caso da geração de calor teremos basicamente o aquecimento de fluidos diversos, a partir das ondas de radiação infravermelha (principalmente) concentradas através de coletores solares térmicos (coletores termosolares). Esta aplicação está relacionada tipicamente com a energia solar térmica. No contexto das aplicações mais utilizadas no Brasil pode-se afirmar que em geral não são exigidas elevadas temperaturas, raramente ultrapassando $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

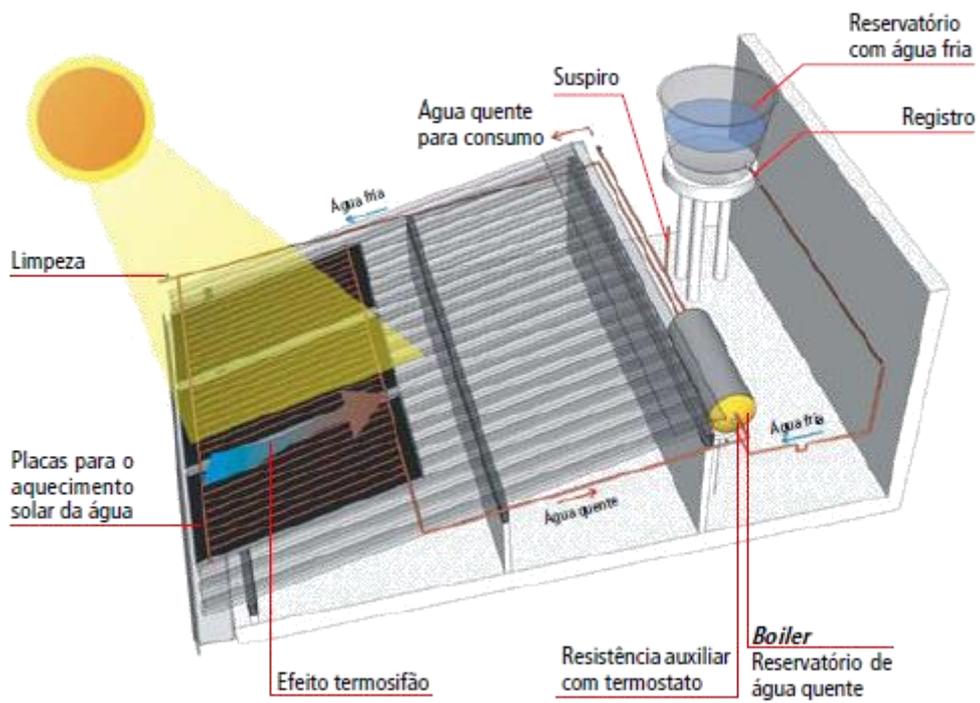


Figura 68: Exemplo de sistema de aquecimento via energia solar térmica por circulação "natural", disponível em: < <http://www.metalica.com.br/energia-a-abundancia-solar> >, acesso em 14/07/2016.

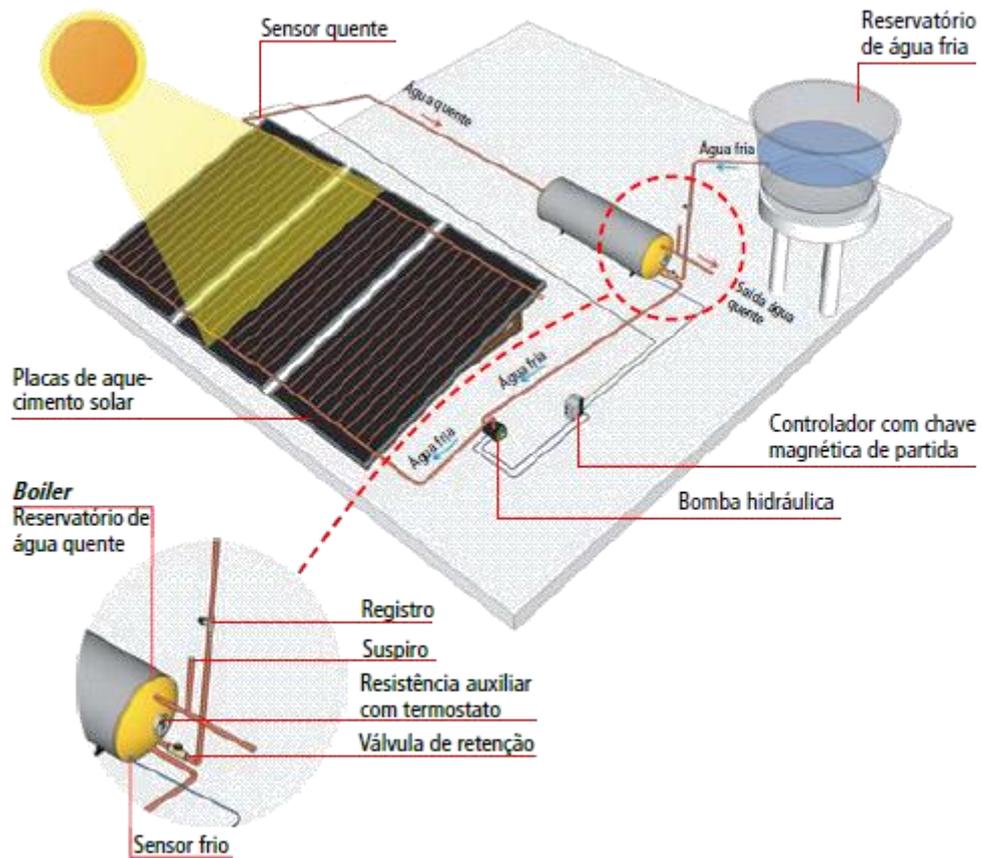


Figura 69: Exemplo de sistema de aquecimento via energia solar térmica utilizando circulação através de bomba hidráulica, disponível em: < <http://www.metalica.com.br/energia-a-abundancia-solar> >, acesso em 14/06/2016.

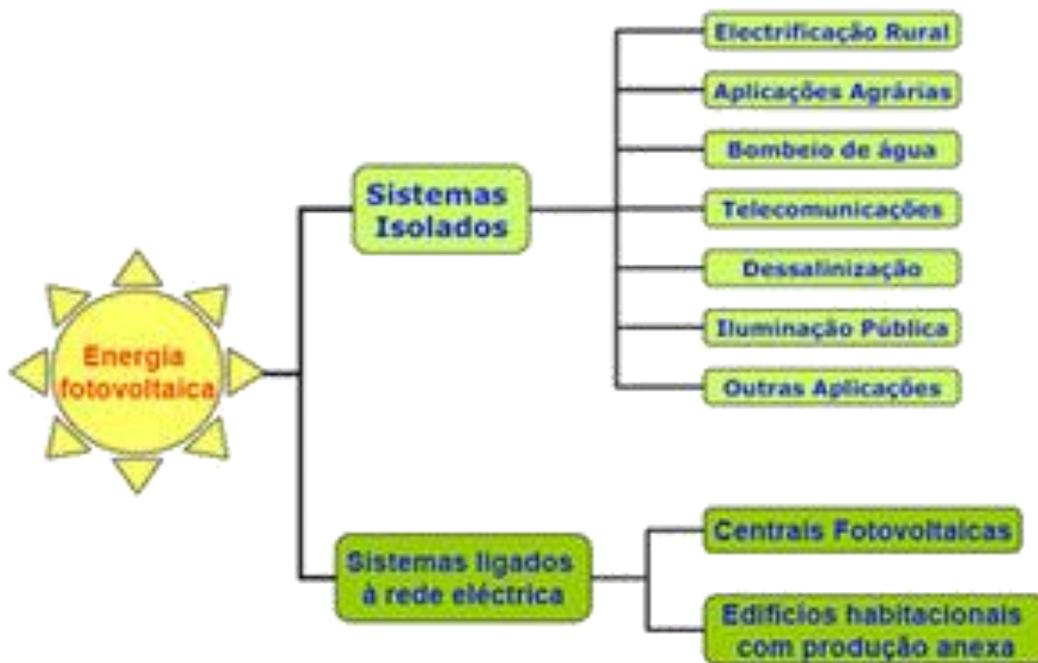


Figura 70: Exemplos de aplicações para energia solar fotovoltaica, disponível em: < <http://filipefs.weebly.com/tecnologia-fv.html> >, acesso em 24/06/2016.

Algumas das principais áreas de aplicação da tecnologia solar em termos de Brasil são:

- a) Edificações (residências e condomínios horizontais e verticais) conectadas a rede;
- b) Cogeração em sistemas comerciais e/ou industriais;
- c) Aplicações industriais diversas;
- d) Processos de secagem de frutas, grãos e análogos;
- e) Dessalização de água;
- f) Aquecimento de água para atividades domésticas (chuveiro elétrico, torneira elétrica, aquecimento de ambientes, dentre outras);
- g) Aquecimento de água para piscinas, banheiras, ofuro e análogos;
- h) Aplicações agropecuárias;
- i) Eletrificação de áreas isoladas (energia solar é a única fonte de eletricidade).

7.1 Geração Direta x Geração Indireta de Eletricidade

A geração indireta é caracterizada principalmente pelo fato de que na mesma ocorrerá uma concentração de calor objetivando a geração de vapor, como consequência do aquecimento de um fluido.

Uma vez gerado o vapor, o mesmo será pressurizado e canalizado a fim de ser utilizado para acionar (provocar o movimento) de uma turbina, sendo esta última acoplada mecanicamente a um gerador elétrico.

No caso da geração direta a conversão será basicamente associada a extração de energia proveniente da luz solar, mais especificamente dos fótons que a constituem. O processo pode ser resumido como: a luz incide sobre o módulo fotovoltaico e através do efeito fotovoltaico a mesma é convertida em eletricidade. O dispositivo central da geração de eletricidade é o painel fotovoltaico.

No caso da geração direta de eletricidade estaremos dentro do escopo dos sistemas fotovoltaicos, ou seja, sistemas cuja finalidade precípua é produzir eletricidade diretamente a partir da energia proveniente do sol.



Figura 71: Exemplos de painéis fotovoltaicos, disponível em: < <https://universosolar.wordpress.com/energia-fotovoltaica/paineis-fotovoltaicos/> >, acesso em 23/06/2016.

7.2 Sistemas Fotovoltaicos Isolados (Autônomos)

Destinados a aplicações nas quais a localidade não é suprida por sistema de distribuição via concessionária de serviços elétricos ou ainda em instalações e/ou aplicações para finalidades específicas. Tipicamente está presente em situações nas quais:

- a) Geração em localidades nas quais a rede de distribuição não está disponível (locais sem energia convencional);
- b) Geração onde o custo é elevado para a extensão da rede de distribuição;
- c) Locais com funcionamento isolado e independente.

Normalmente está associada ao uso de elementos destinados a armazenar a energia elétrica produzida, ou seja, em geral utilizam baterias. Sistemas fotovoltaicos isolados vem sendo utilizados em aplicações diversas tais quais serviços de comunicação, eletrificação, sinalização e bombeamento de água, dentre inúmeros outros.

Sistemas isolados típicos são aqueles nos quais o sistema FV é a única fonte de eletricidade disponível, sendo necessário o uso de banco de baterias para armazená-la. Podem ser utilizados para suprir uma única residência ou em topologias que formam mini redes destinadas a atender pequenas comunidades.

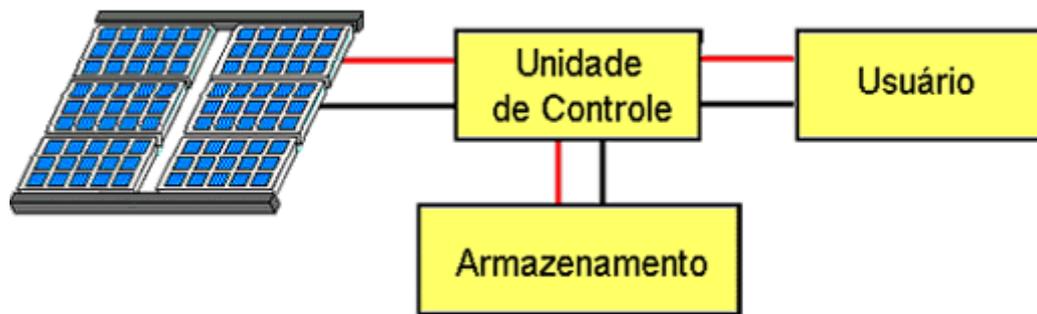


Figura 72: Diagrama básico de um sistema fotovoltaico isolado, disponível em: < http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=341 >, acesso em 14/07/2016.

São considerados elementos básicos do sistema fotovoltaico isolado:

- a) Módulos fotovoltaicos;
- b) Controlador de carga e descarga;
- c) Banco de baterias;
- d) Inversor *off grid*;
- e) Suportes, cabeamento e proteções;
- f) Cargas.

A energia proveniente dos módulos é do tipo CC e é direcionada para o controlador de carga. A finalidade deste último é garantir a estabilidade do fluxo de potência necessário ao carregamento do banco de baterias. Do banco de baterias o fluxo de potência, ainda na forma CC, segue para o inversor, cuja finalidade precípua é converter a tensão e a corrente elétrica da forma CC para forma CA, compatível com as especificidades de tensão, corrente e frequência das cargas a serem ligadas (aparelhos elétricos, eletrônicos e eletrodomésticos).

O ciclo de carga e descarga da bateria depende da radiação sendo que a corrente de carga das baterias será menor em dia nublado ou dias chuvosos, sem necessariamente cessar totalmente a geração fotovoltaica. Nos momentos nos quais a radiação solar inexistente, como por exemplo a noite, o conjunto de baterias passa a suprir as cargas por um período que depende do tempo de autonomia das baterias e da potência das cargas que estão sendo alimentadas.

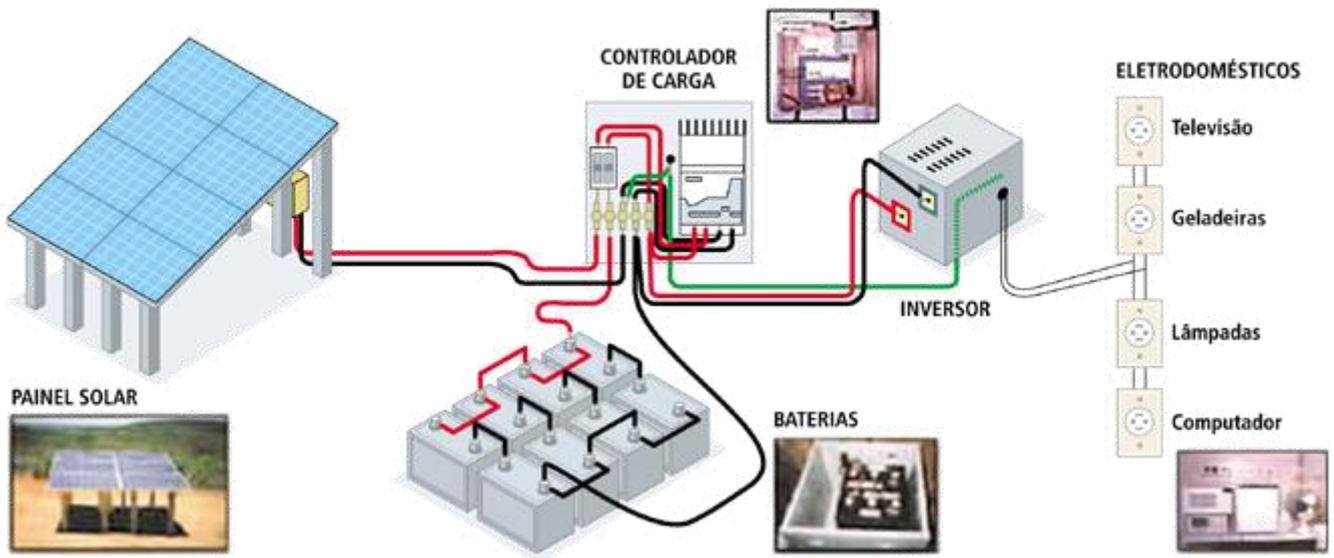


Figura 73: Exemplo de sistema fotovoltaico autônomo, disponível em: < http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_solar/3_3_2.htm >, acesso em 25/06/2016.



Figura 74: Exemplo de topologia de sistema fotovoltaico autônomo, disponível em: < <http://www.viridian.com.br/tecnologia/energia+solar+fotovoltaica/4> >, acesso em 14/07/2016.

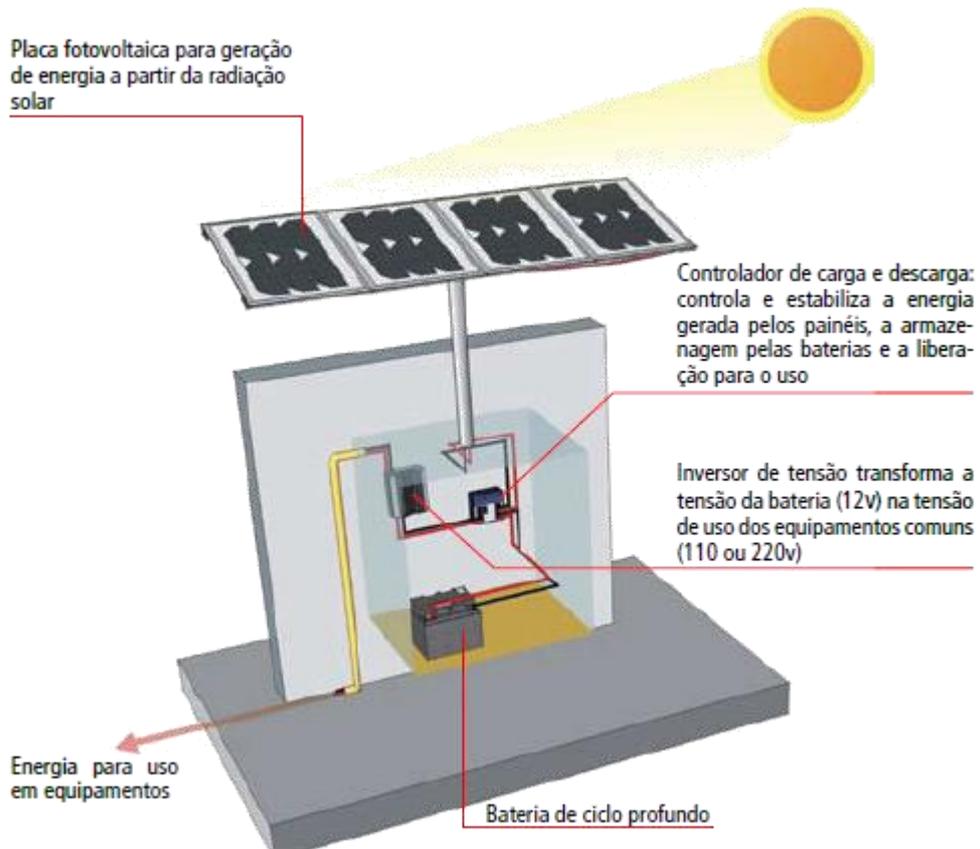


Figura 75: representação esquemática do fluxo de energia em um sistema fotovoltaico autônomo, disponível em: < <http://wwwo.metalica.com.br/energia-a-abundancia-solar> >, acesso em 14/07/2016.

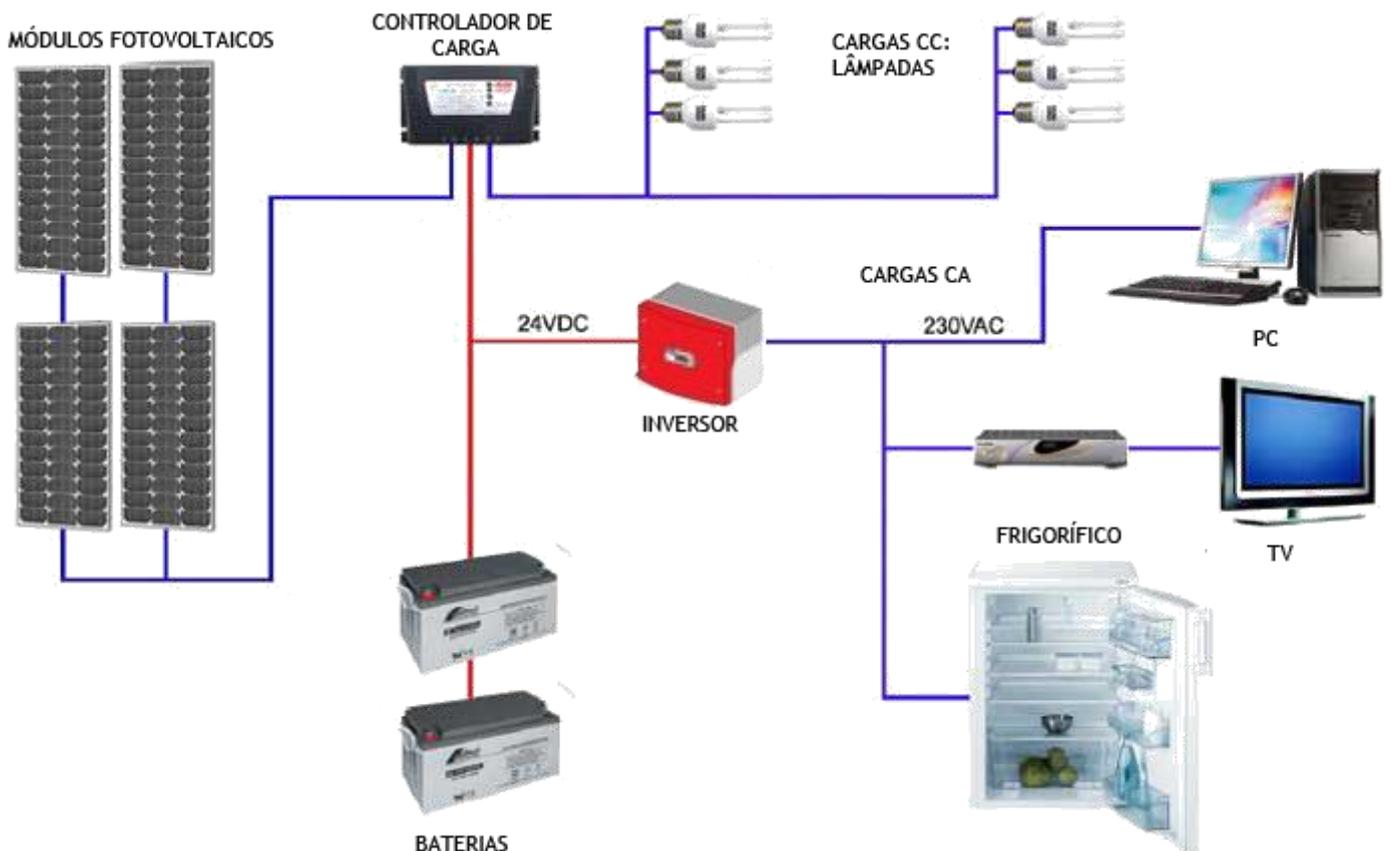


Figura 76: Sistema FV isolado alimentando cargas CC e CA, disponível em: < <http://www.altogagreen.com/sf/if/pt/solar/sistema.htm> >, acesso em 14/07/2016.

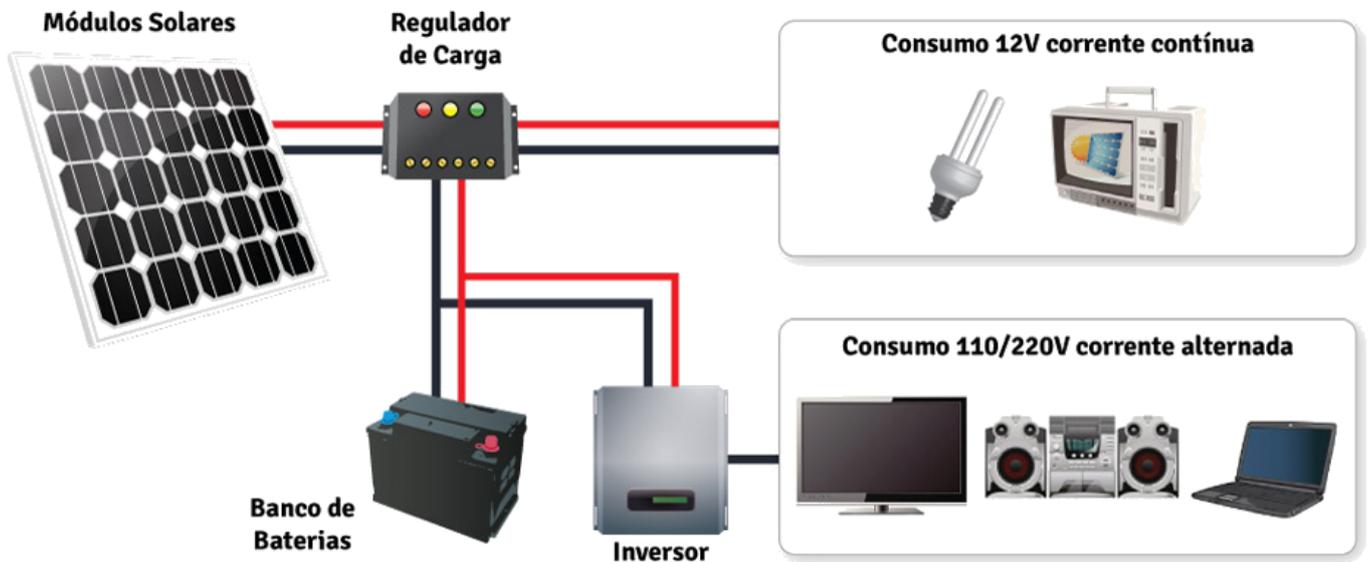


Figura 77: Aplicação FV isolada com consumidores alimentados em corrente contínua e em corrente alternada, disponível em: < <http://real-solar.com/como-funciona.php> >, acesso em 14/07/2016.

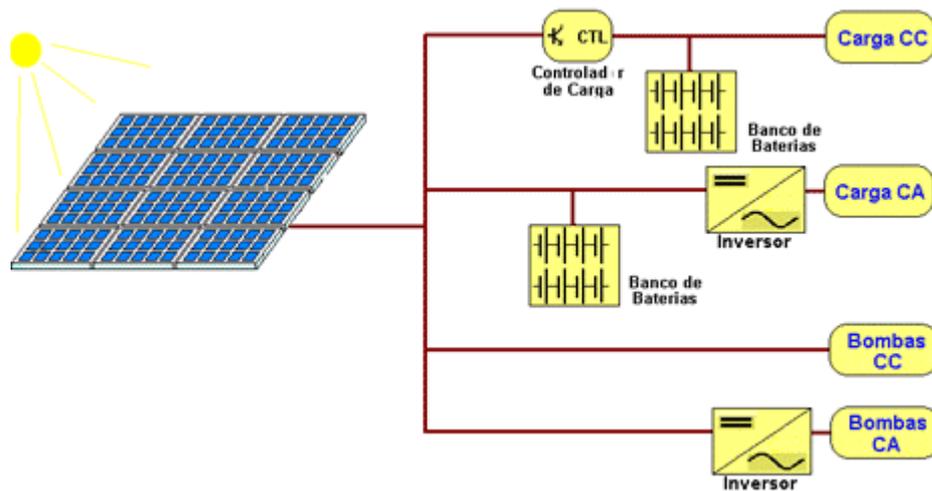


Figura 78: Possíveis configurações para um sistema fotovoltaico *offgrid*, disponível em: < http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=341 >, acesso em 14/07/2016.

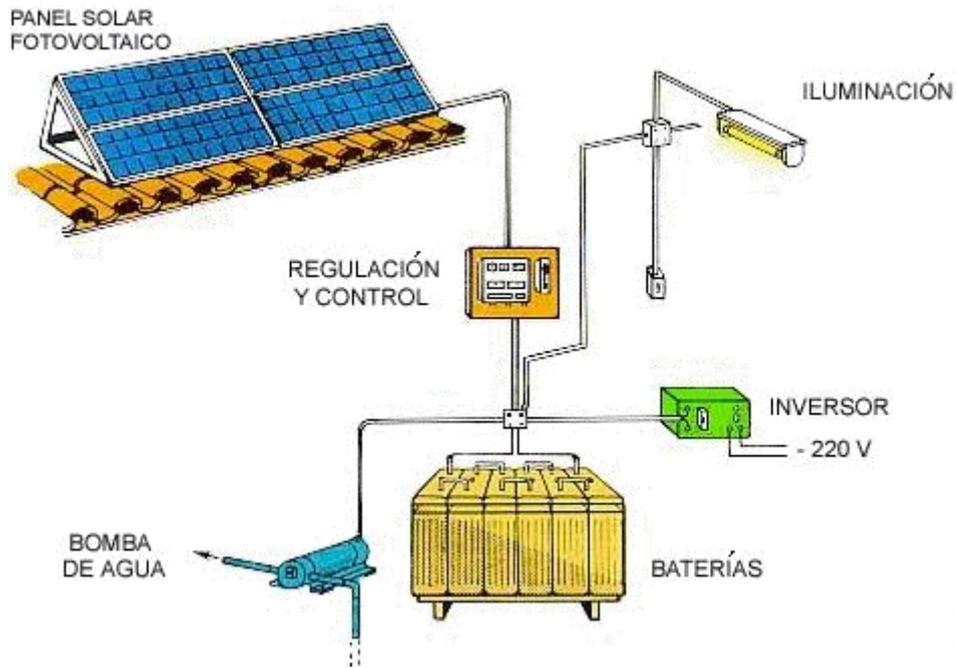


Figura 79: Sistema FV autônomo alimentando circuito de iluminação e bomba de água em CC, disponível em: < <http://www.diariodeciencias.com.ar/energia-solar-fotovoltaica-y-termica-diferencias-y-aplicaciones/> >, acesso em 14/07/2016.

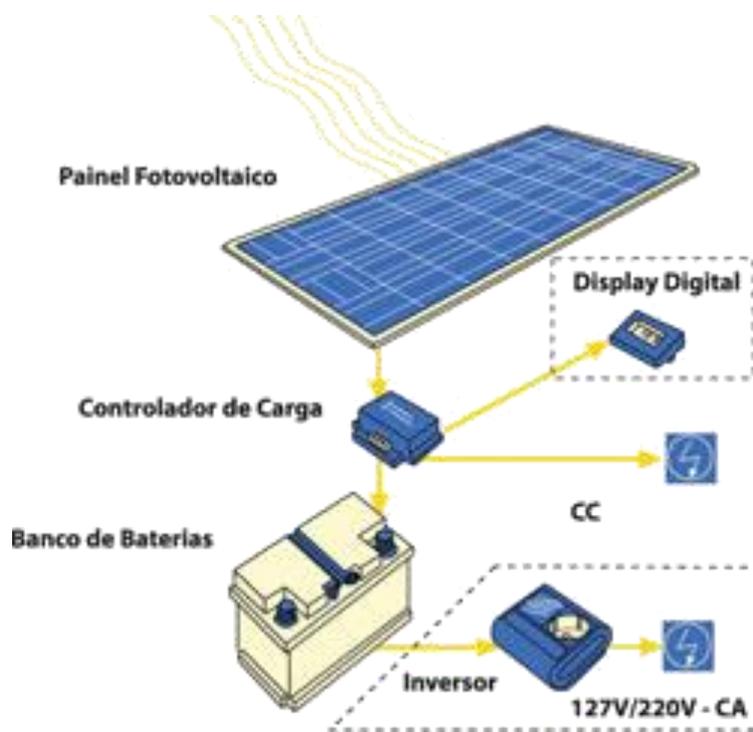


Figura 80: Controlador de carga com display digital, disponível em: < http://www.preservasolar.com.br/s_isolados_minirede.php?act=produtos >, acesso em 14/07/2016.

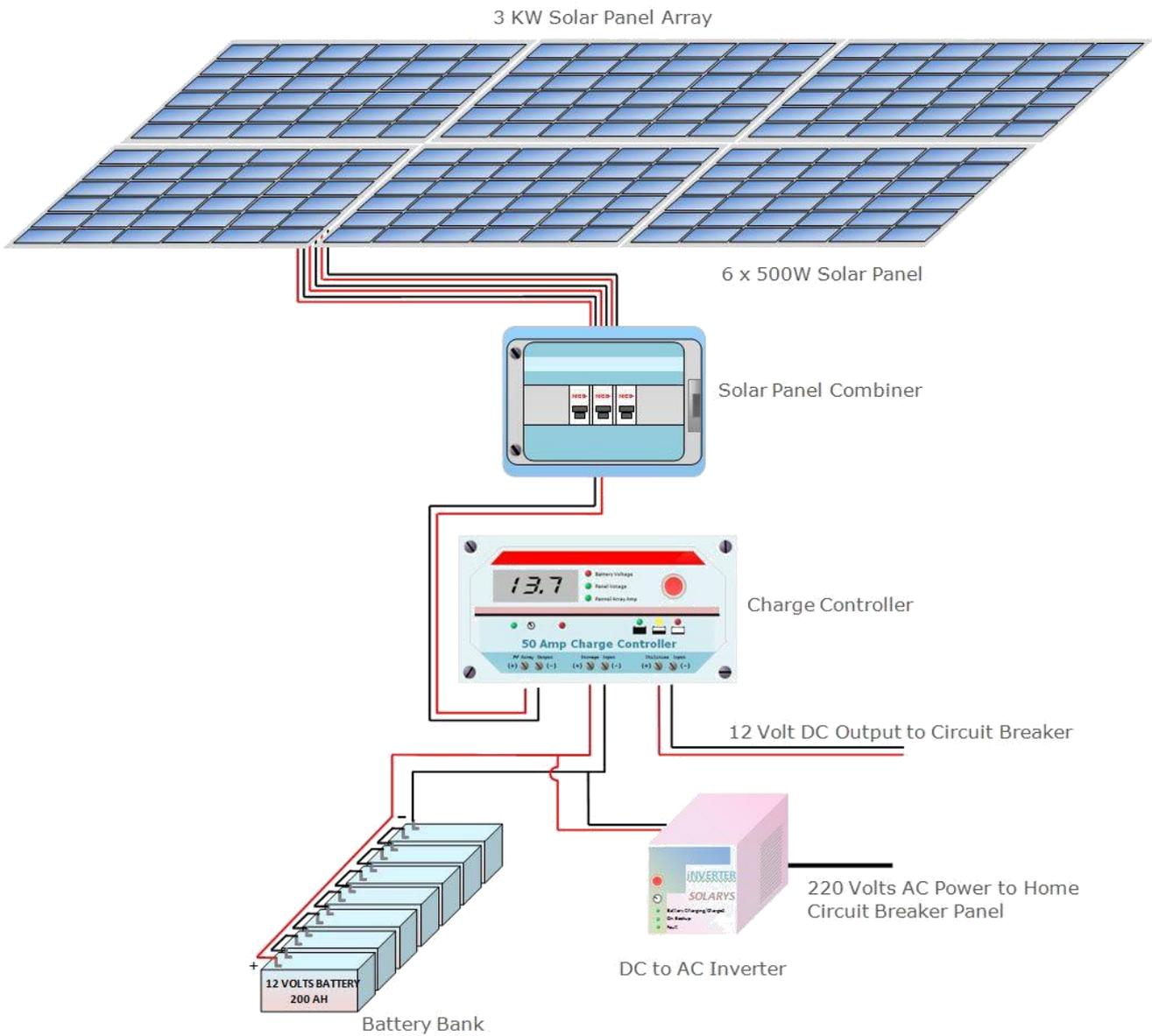


Figura 81: Representação de arranjo FV autônomo de 3KW, disponível em: < <https://plus.google.com/106472163037129415313> >, acesso em 14/07/2016.

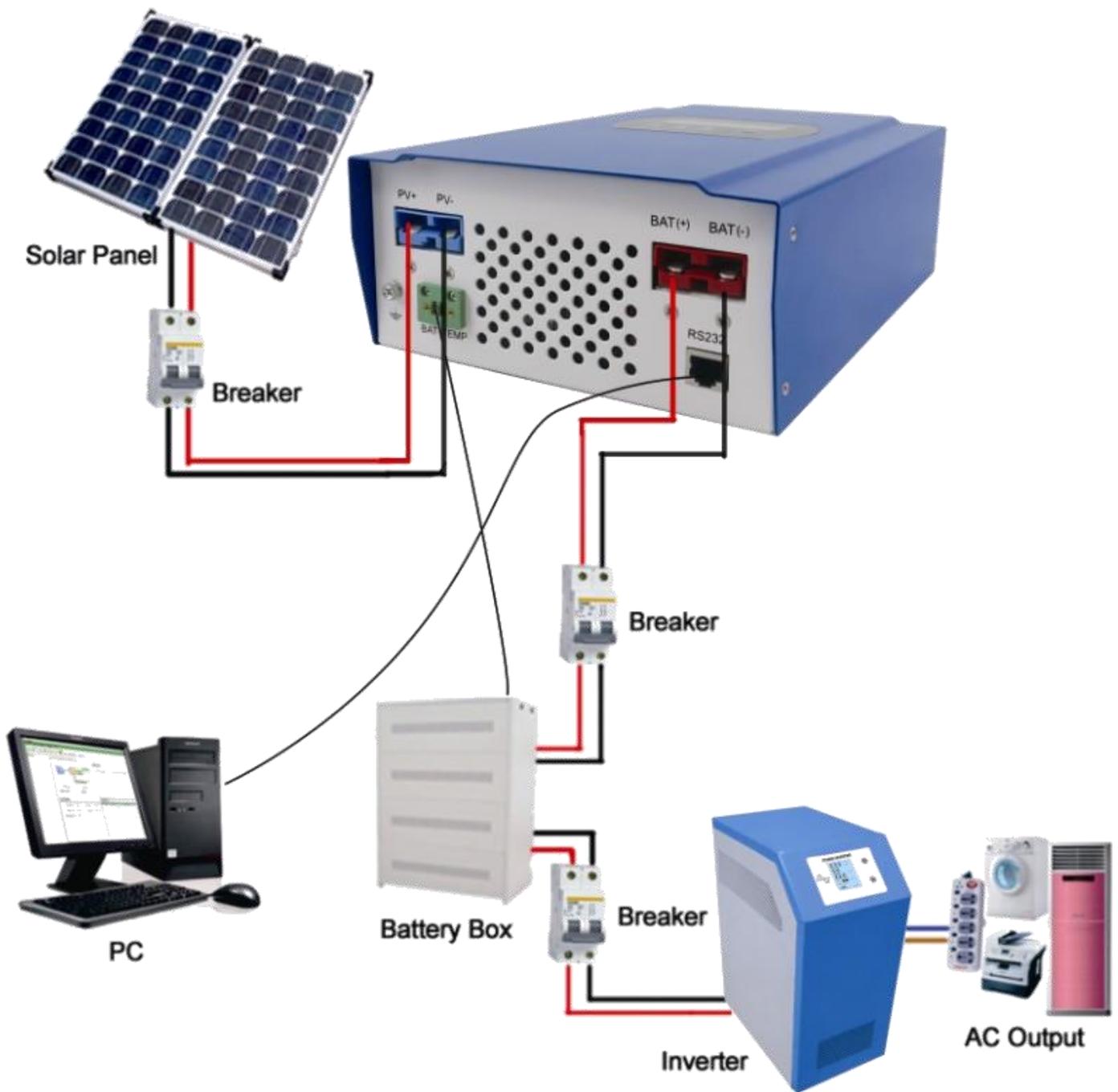


Figura 82: Exemplo das ligações em um controlador de carga destinado a sistemas fotovoltaicos autônomos, disponível em: < >, acesso em 14/07/2016.

7.3 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Tratam-se de sistemas de geração distribuída, também designados de sistemas de geração descentralizada. Conforme o seu nome sugere, tratam-se de sistemas nos quais a planta fotovoltaica esta interligada eletricamente ao sistema de distribuição da concessionária de serviços elétricos local, de modo que a energia elétrica produzida pelo arranjo FV é injetada na rede elétrica da distribuidora. Comumente estão associados a:

- a) Projetos de geração distribuída, a fim de minimizar ou eliminar custos com infraestrutura, transmissão e distribuição;
- b) Projetos focados em sustentabilidade.

Como o sistema está interligado a rede de distribuição o excedente de energia gerada é injetada diretamente na rede de distribuição da concessionaria de serviços elétricos local. Também recebem a designação de sistemas *Grid-Tie*.

Como exemplo de empreendimentos fotovoltaicos conectados à rede podemos citar a planta de 400 Wp instalada no estádio Pituaçu (Salvador – BA) e a central fotovoltaica de 1 MWp localizada em Tauá – CE.

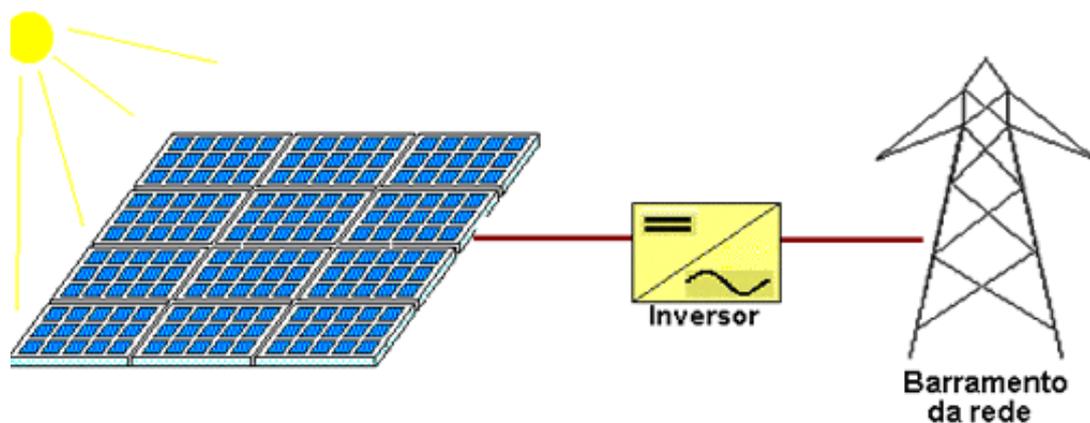


Figura 83: Configuração básica de um sistema FV conectado a rede elétrica de distribuição da concessionária, disponível em: < http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=341 >, acesso em 14/07/2016.

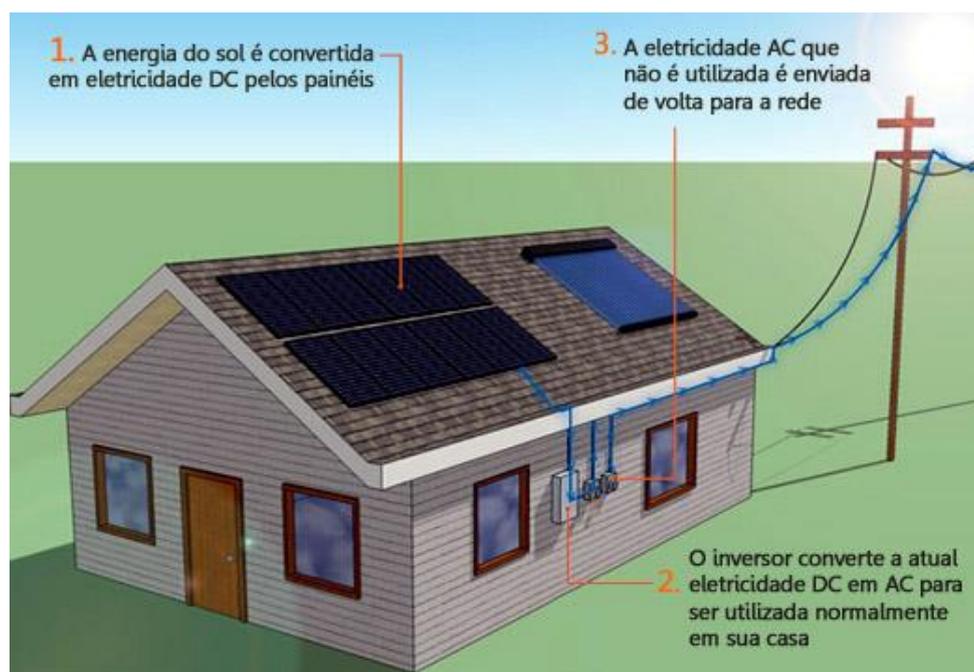


Figura 84: Exemplo de sistema FV interligado a rede, disponível em: < <https://www.energiapura.com/content/sistema-solar-fotovoltaico-grid-tie-7-kw> >, acesso em 14/07/2016.



Figura 85: Exemplo de uma aplicação residencial para um sistema FV interligado a rede, disponível em: < <http://energiaesol.com.br/energia-solar/> >, acesso em 14/07/2016.

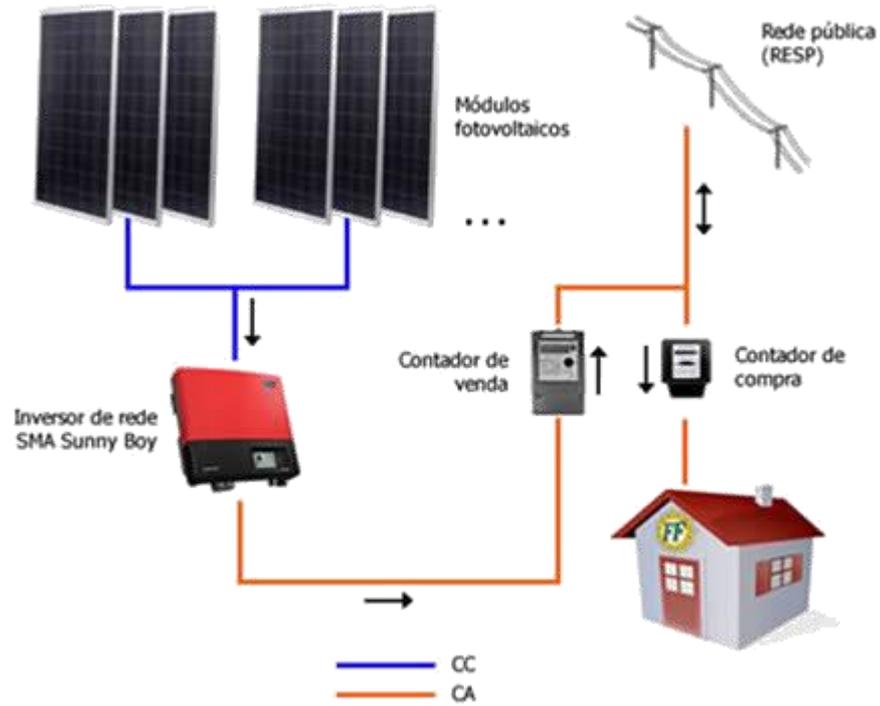


Figura 86: Fluxo de corrente CC e CA em um sistema FV integrado a rede, disponível em: < <http://behinniro.com/?category> >, acesso em 14/07/2016.

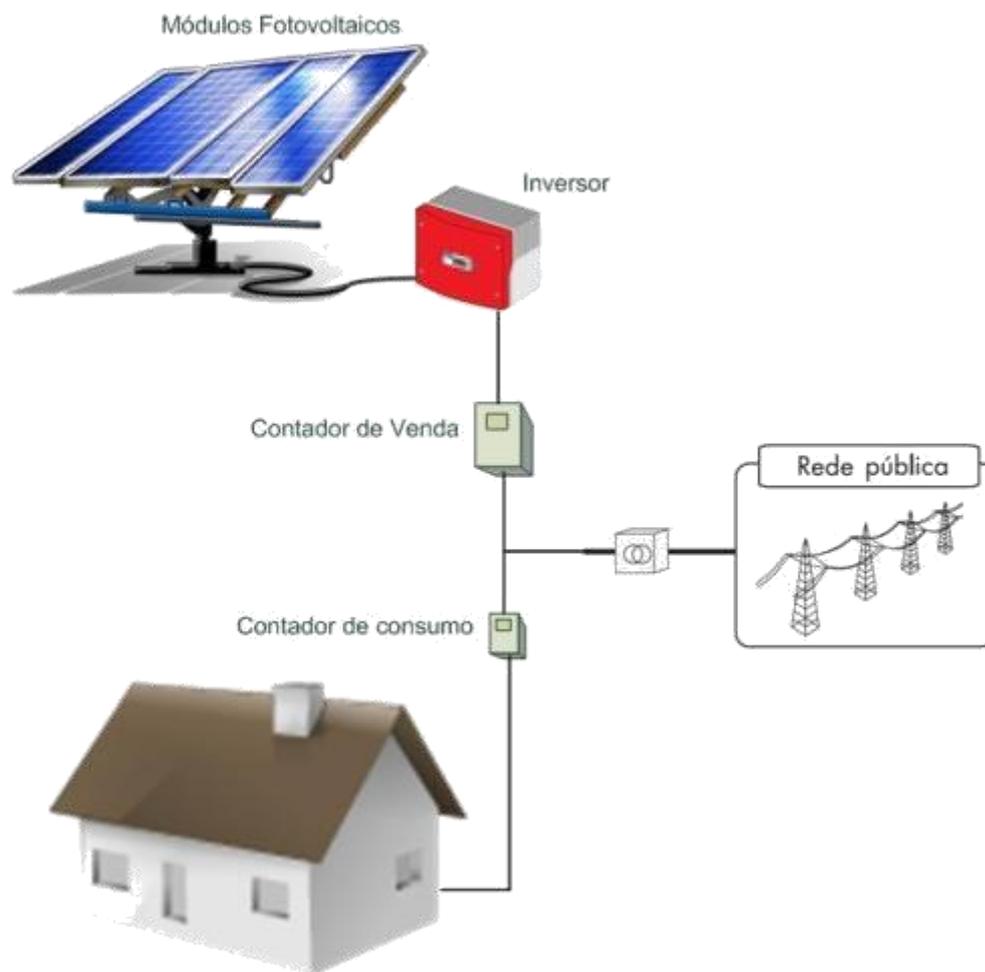


Figura 87: Sistema FV interligado a rede utilizando 2 medidores (venda e consumo), disponível em: < <http://www.altogagreen.com/sf/if/pt/solar/sistema.htm> >, acesso em 14/07/2016.

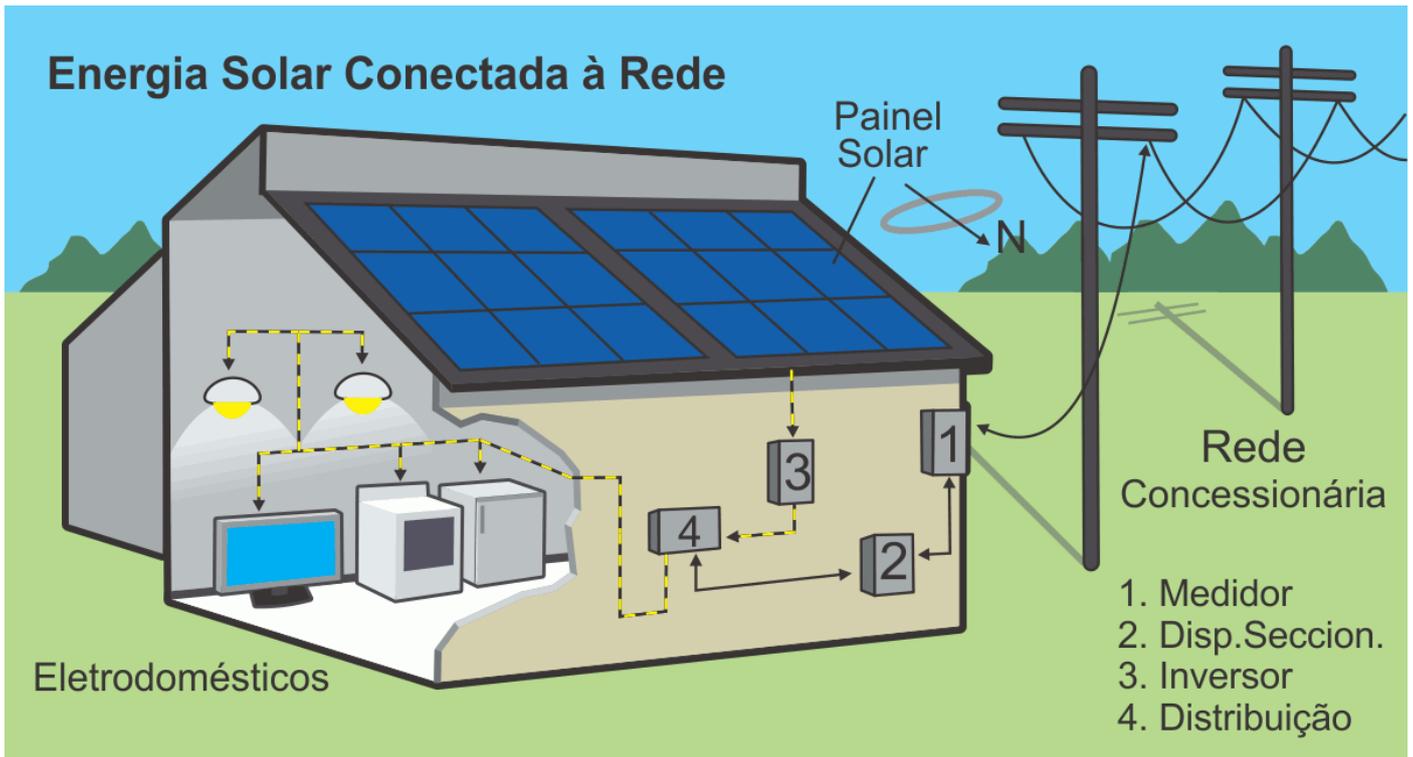


Figura 88: Representação esquemática da energia solar conectada à rede, disponível em: < http://www.sitiosolar.com.br/?_escaped_fragment_=contact/c24vq >, acesso em 14/07/2016.

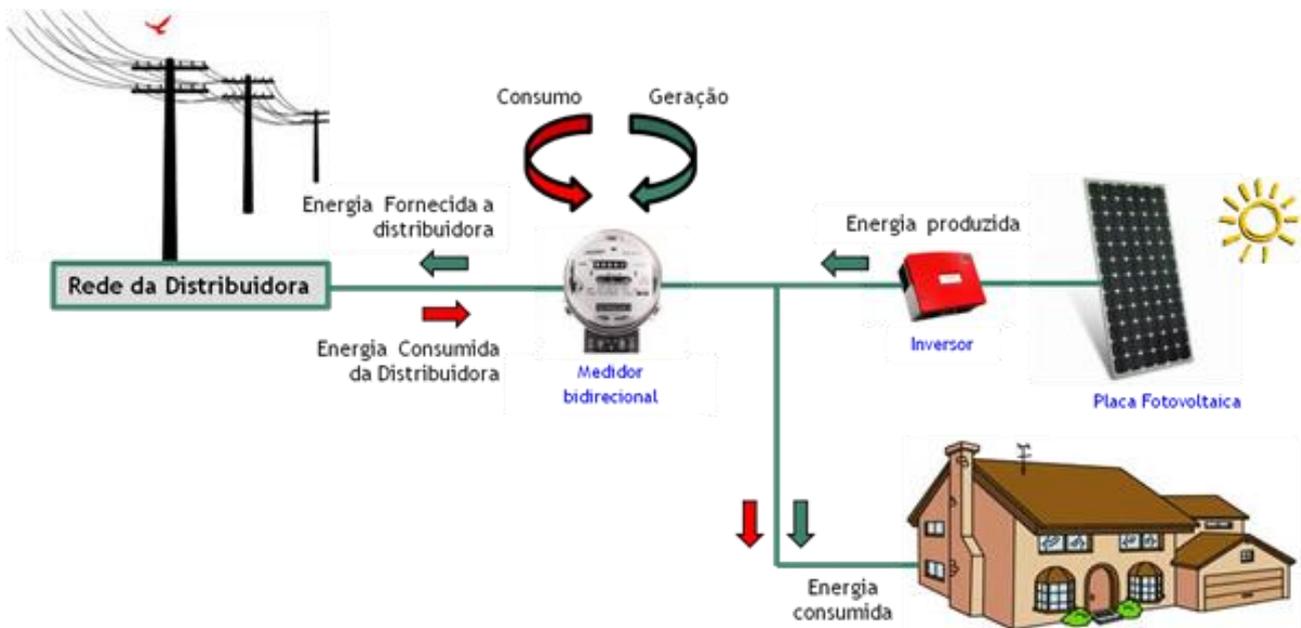


Figura 89: Exemplo de sistema FV interligado a rede utilizando medidor bidirecional, disponível em: < <http://www.viridian.com.br/tecnologia/energia+solar+fotovoltaica/4> >, acesso em 14/07/2016.

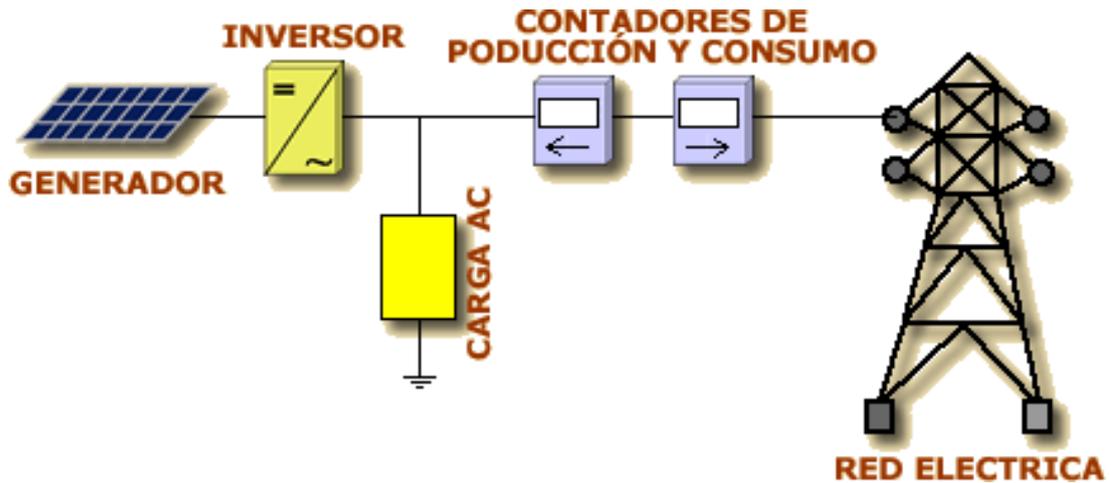


Figura 90: Diagrama esquemático de sistema FV interligado a rede utilizando dois medidores (produção e consumo), disponível em: < <http://www.energiasolar.com.es/seccion/placa-solar-luz/instalaciones-conectadas-a-red> >, acesso em 14/07/2016.



Figura 91: Medidor bidirecional aplicado em sistema FV *on grid* disponível em: < <http://wwwo.metalica.com.br/energia-a-abundancia-solar> >, acesso em 14/07/2016.

| Sistema conectado à rede elétrica:



Figura 92: Sistema FV conectado à rede incluindo dispositivos de seccionamento, disponível em: < <http://www.solarcontroller-inverter.com/products/I-Panda-12V-24v-48v-Series-mppt-solar-controller-50A.html#.V20bCbgrLIU> >, acesso em 14/07/2016.

Existem ainda, porém em escala muito reduzida quando comparada com os sistemas *grid tie* convencionais, os sistemas *grid tie* com baterias. Diferenciando-se dos convencionais por funcionar como sistema elétrico de *backup* nos momentos nos quais faltar energia elétrica da concessionária, comportando-se como uma espécie de *nobreak* que alimenta os principais equipamentos da instalação por um tempo determinado definido pela autonomia do banco de baterias. Permite também vender o excedente de autoprodução para concessionária ao qual estiver conectado. Esta topologia de geração (conectada à rede com baterias) ainda não está totalmente regulamentada no Brasil.

7.4 Sistemas Fotovoltaicos Híbridos

Caracterizados pela integração de pelo menos duas fontes distintas de geração de energia. Comumente são encontrados sistemas híbridos nos quais a geração fotovoltaica funciona em conjunto com associações de microaerogeradores e geradores eletromecânicos movidos a diesel.

Dependendo da quantidade e do tipo de geradores em funcionamento simultâneo (integrado) na planta de geração serão necessários maiores requisitos técnicos de automação aumentando a complexidade do sistema.

Os sistemas híbridos podem ser isolados, conectados à rede ou simplesmente funcionarem como apoio a rede.

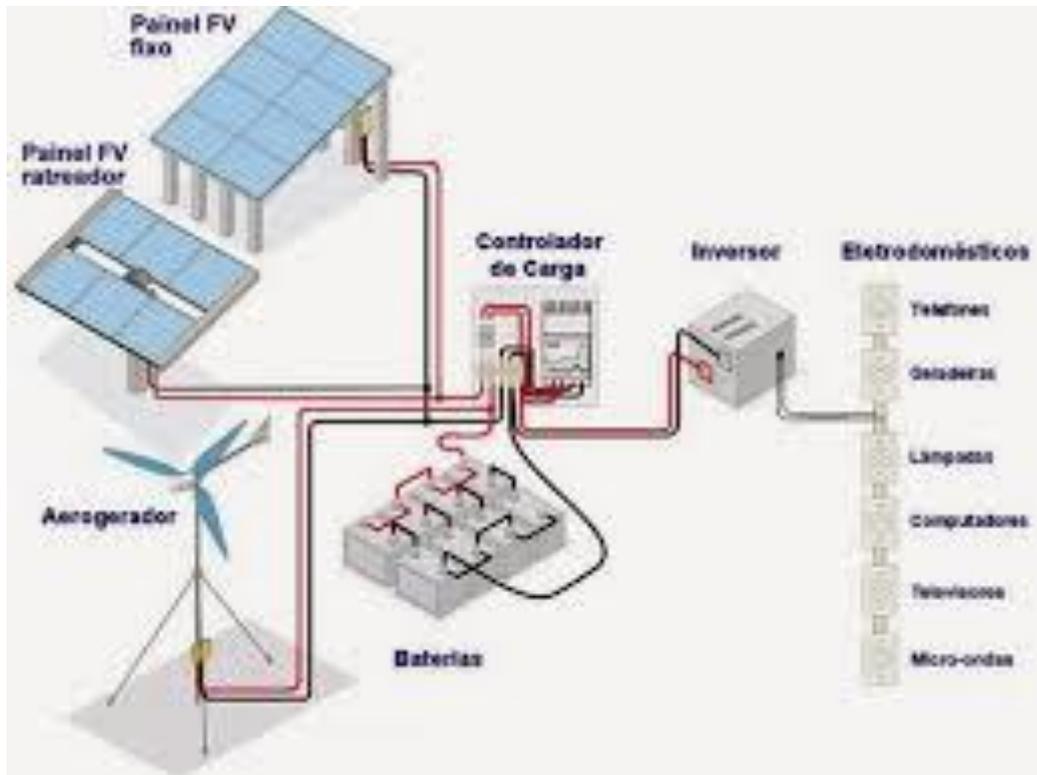


Figura 93: Exemplo de sistema FV híbrido constituído por painéis FV fixos, painéis FV com rastreador solar e aero geradores, disponível em: < https://processo-industrial.blogspot.com.br/2014_01_01_archive.html >, acesso em 15/07/2016.



Figura 94: Topologia de sistema híbrido solar + eólico + diesel, disponível em: < http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=341 >, acesso em 15/07/2016.

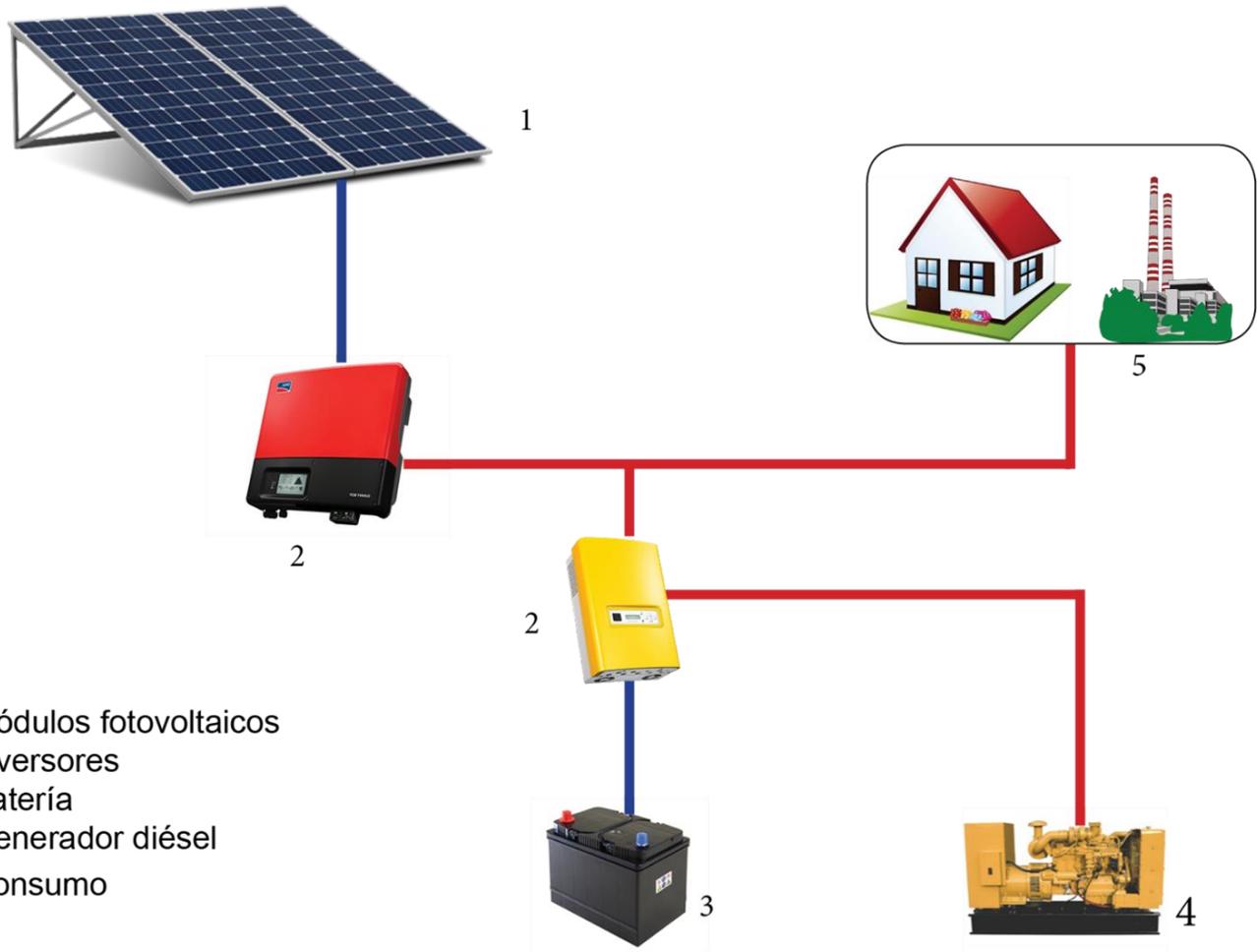


Figura 95: Sistema de geração híbrida com 2 inversores, disponível em: < <http://www.sitecnosolar.com/pt/sistema-hibrido-compatible-con-generador-diesel-sin-red/> >, acesso em 15/07/2016.

Ligação do sistema OFF GRID TIE:

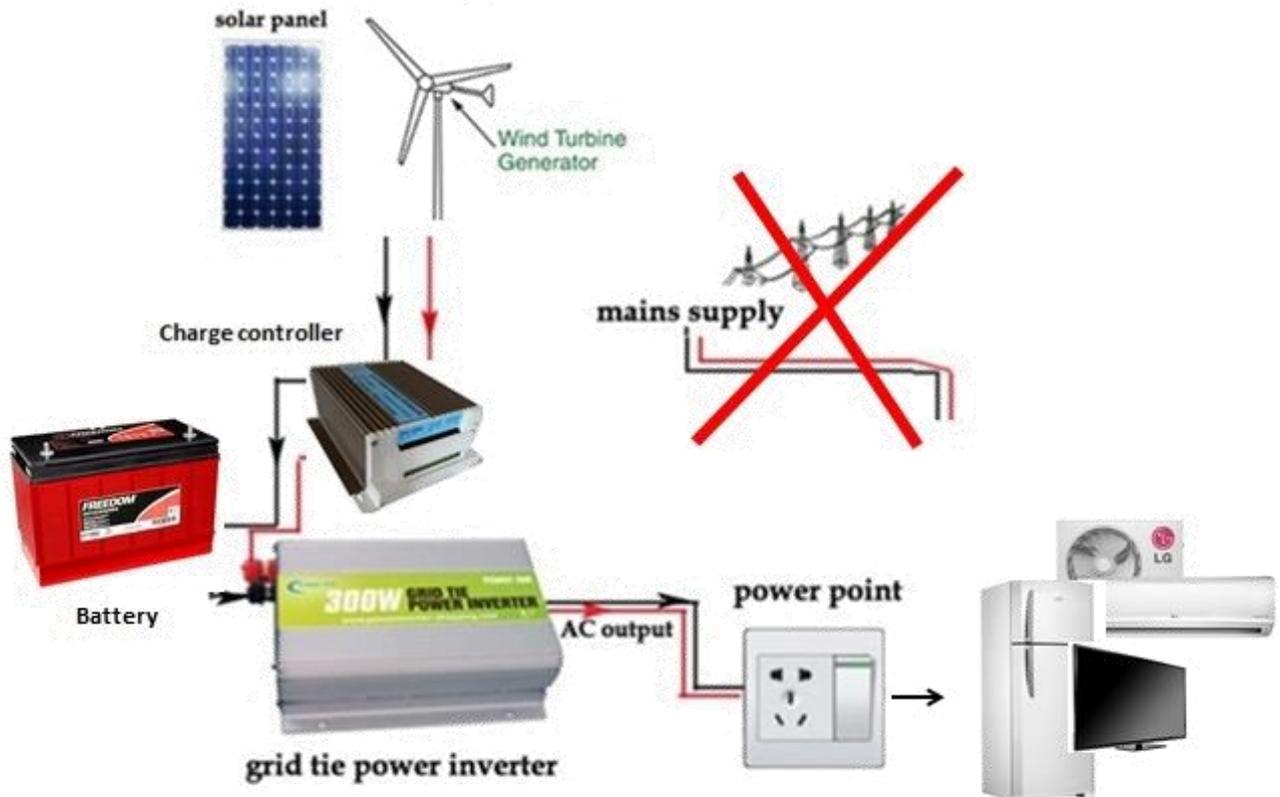


Figura 96: Exemplo de sistema híbrido off grid, disponível em: < <http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-713979351-kit-off-eolico-aerogerador-ista-500w-inversor-controlador- JM> >, acesso em 15/07/2016.

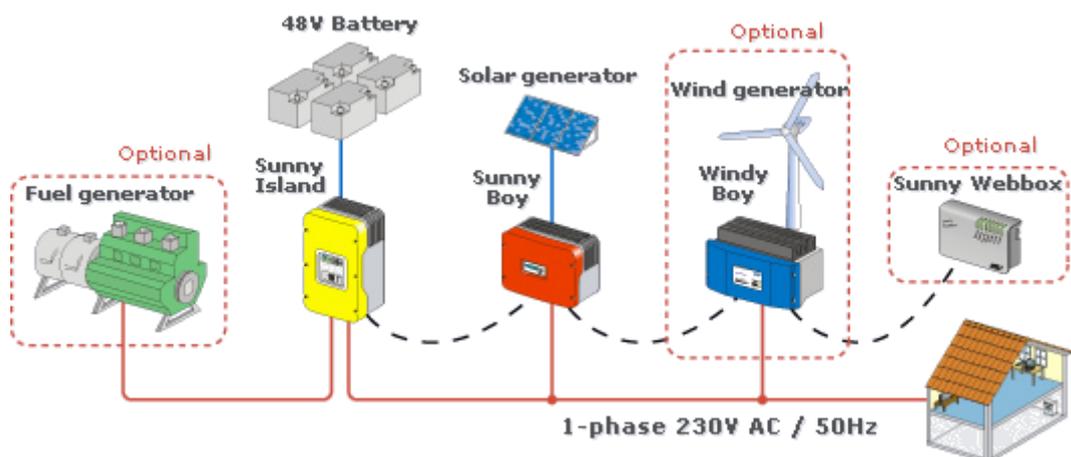


Figura 97: Sistema de geração híbrida com múltiplos inversores, disponível em: < http://personal.unizar.es/rdufo/index.php?option=com_content&view=article&id=13:sistemas-hibridos&catid=10&Itemid=120&lang=es >, acesso em 15/07/2016.

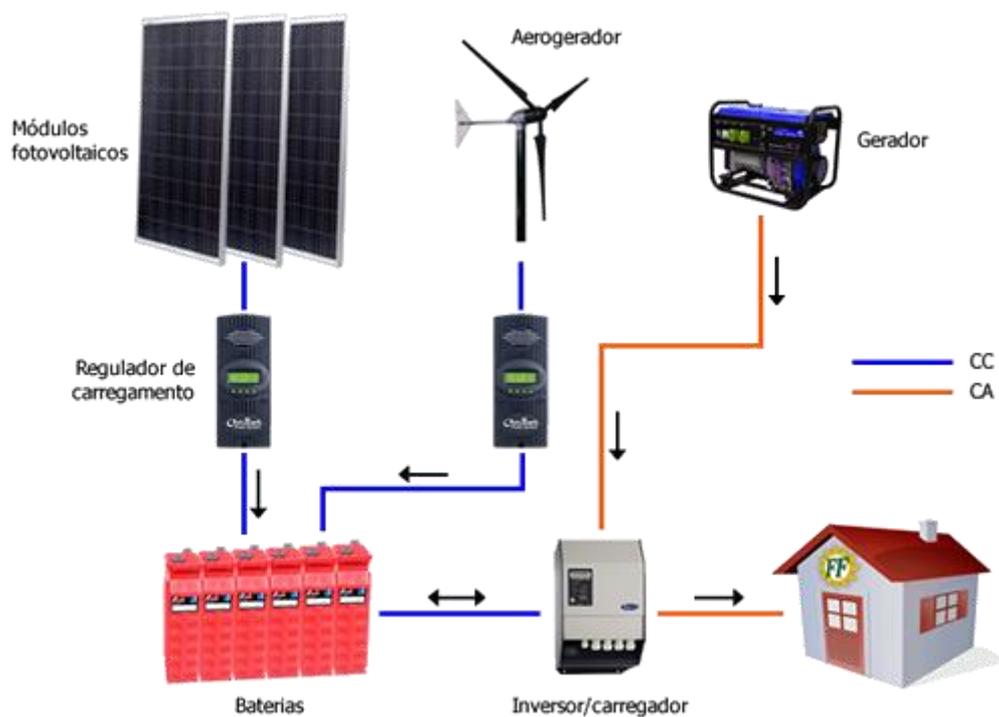
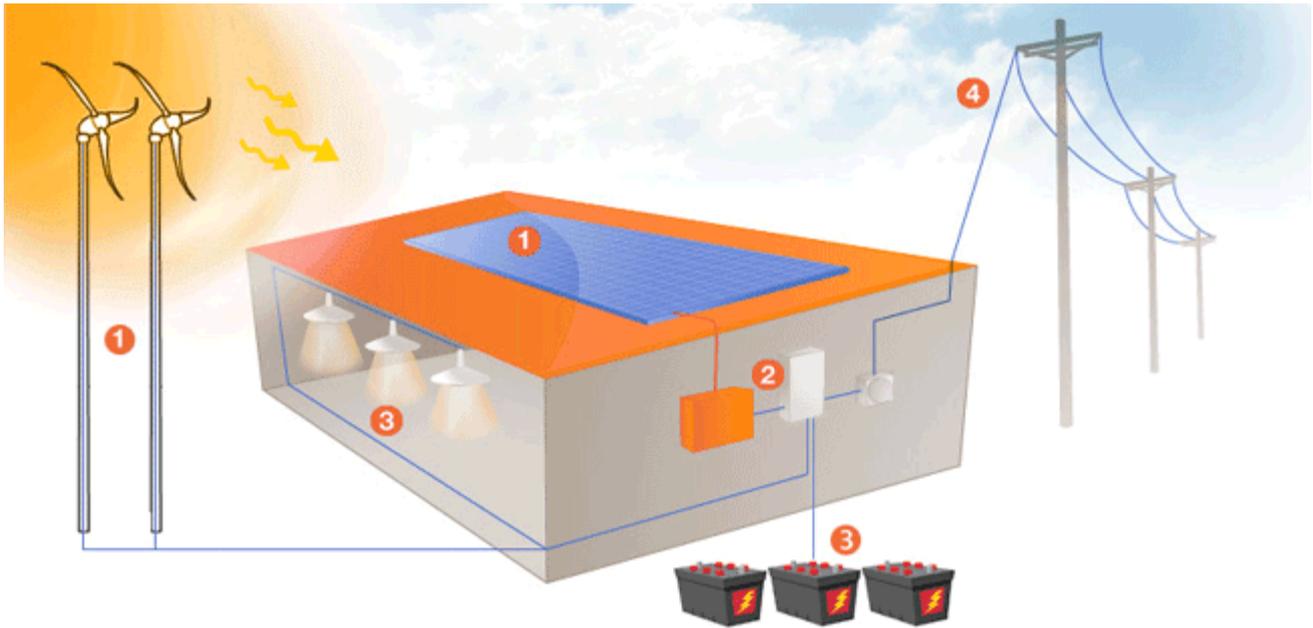


Figura 98: Exemplo de sistema híbrido autônomo, disponível em: <
<http://www.ffiolar.com/index.php?lang=PT&page=sistemas-autonomos> >, acesso em 15/07/2016.



1.  A energia do sol e do vento é convertida em eletricidade pelos Aerogeradores e Painéis fotovoltaicos
2.  Os inversores controlam toda a operação do sistema
3.  As baterias armazenam a energia para os momentos de queda no fornecimento da rede
4.  A energia da concessionária é utilizada automaticamente durante a noite ou em dias sem vento

Figura 99: Princípio operativo básico de um sistema híbrido solar- eólico, disponível em: < <http://energiahibrida.blogspot.com.br/> >, acesso em 15/07/2016.

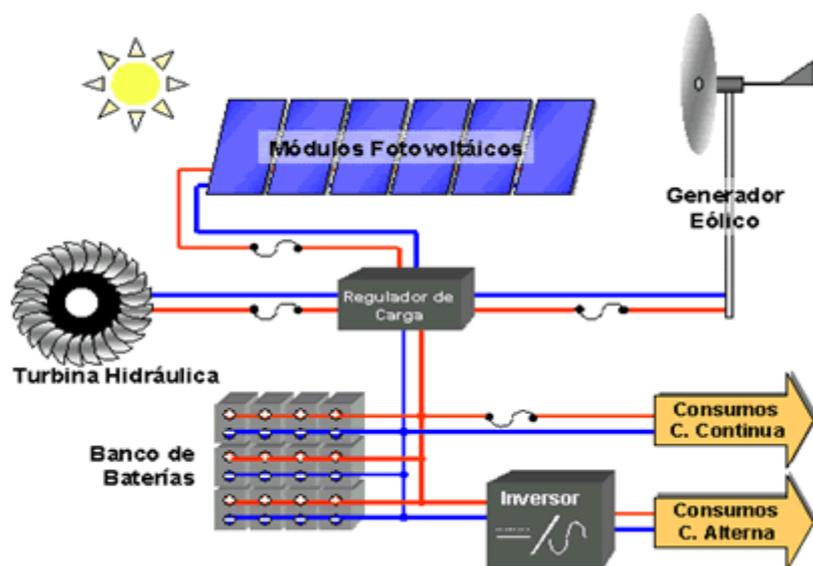


Figura 100: Sistema híbrido incluindo turbina hidráulica, disponível em: < <http://blogdfely.blogspot.com.br/2010/11/sistemas-hibridos.html> >, acesso em 15/07/2016.



Figura 101: Sistema de geração híbrida solar + eólica em aplicações residenciais, disponível em: < <https://autosolar.es/kits-solares/kit-solar-eolico-hibrido> >, acesso em 15/07/2016.

7.5 Classificação dos Sistemas Fotovoltaicos Quanto a Potência

- Microgeração: sistemas de pequena potência (W_p ou KW_p): potência menor ou igual a $75 KW_p$;
- Minigeração: sistemas de média potência (KW_p ou MW_p): potência entre $75 KW_p$ e $5 MW_p$;
- Usinas: sistemas de elevada potência (dezenas MW_p): potência superior a $5 MW_p$. Podem também ser chamadas de centrais fotovoltaicas.

As usinas fotovoltaicas estão conectadas a rede e em razão de sua elevada capacidade de geração normalmente estão próximas a locais nos quais a infraestrutura de transmissão e distribuição das concessionárias as comporte. Podem ainda ser instaladas nas proximidades de grandes consumidores de energia como, por exemplo, alimentando grandes complexos industriais.

8. Normatização

A conexão de geradores fotovoltaicos a rede elétrica é regida por um conjunto de normas, dentre as quais podemos destacar:

- a) Resolução 482/2012 da ANEEL⁶ (antiga);
- b) Resolução 687/2015 da ANEEL (atualização da resolução 482);
- c) Normas impostas pelas companhias distribuidoras locais (exemplo: Cosern, Coelce, Coelba, etc.).

9. Energia Solar em Bens de Consumo

Tratam-se de aplicações da energia solar para prover a energia a pequenos equipamentos elétricos ou eletrônicos como brinquedos, relógios, calculadoras, carregadores de baterias e inúmeros outros.

Todas estas aplicações possuem como elemento comum o uso de luz solar ou artificial como fonte destinada a suprir a demanda energética necessária ao correto funcionamento dos equipamentos.

10. Dispositivos/Equipamentos Fotovoltaicos

10.1 Inversores Fotovoltaicos

Equipamentos/dispositivos cuja finalidade precípua é converter uma tensão\corrente CC injetada em suas entradas em uma tensão\corrente CA a ser disponibilizada nos seus terminais de saída. Podem ser classificados, quanto à forma na qual a inversão é controlada, em dois tipos básicos:

- a) Inversores comutados a linha: a inversão é controlada a partir da tensão da rede no qual o inversor vai estar conectado;
- b) Conversores autocomutados: o processo de comutação passa a depender de um sinal de controle gerado por um circuito interno ao inversor.

A potência do inversor, no caso do sistema conectado à rede, vai definir a quantidade de potência injetada na rede. O arranjo fotovoltaico que alimentará a entrada do inversor é dimensionado a partir da potência de pico fornecida pelas placas. A potência de pico das placas é superior a potência do inversor para prever as possíveis perdas.

Comercialmente os inversores mais atuais são os chamados inversores de potência ativa caracterizados por possuir fator de potência unitário.

10.2 Controladores de Carga

Os controladores de carga estão ligados eletricamente entre os painéis solares e o banco de baterias. Sua principal finalidade é trabalharem como reguladores de tensão,

⁶ Agência Nacional de Energia Elétrica.
Prof. Eng. Dennys Lopes Alves.

proporcionando uma carga otimizada das baterias e mantendo-as em regime de flutuação (manutenção da carga) uma vez atingida a carga total.

Alguns modelos incorporam ainda a função de controle de descarga de baterias. Os controladores de descarga objetivam proteger as baterias contra descarga excessiva, proporcionando maior longevidade para as mesmas (vida útil mais longa).

10.3 Bancos de Baterias

11. Softwares de Apoio

Como exemplo de *softwares* de apoio ao estudo, projeto e simulação de sistemas fotovoltaicos podemos citar:

- a) *Photovoltaic Software - PVSYST*;
- b) *PSIM*;
- c) *Google Sketch Up*;
- d) *Google Earth*.

O *PVSYST* trata-se de um completo ambiente de projeto e simulação 2D e 3D de sistemas fotovoltaicos, com vastíssima gama de bibliotecas e banco de dados com informações solarimétricas. Figura entre as principais ferramentas de simulação fotovoltaica na indústria especializada e principalmente em instituições de ensino e pesquisa.

O *PSIM* é um ambiente de programação para eletrônica de potência e sistemas de controle que possui ferramentas adicionais para simulações de sistemas de energia renovável com destaque para energia eólica e energia solar. Ao contrário do PVSyst seu principal objetivo não são os sistemas fotovoltaicos.



Figura 102: Logotipo do *software PVSyst*, disponível em: < <http://www.pvsyst.com/en/> >, acesso em 22/08/2016.



Figura 103: Logotipo do *software PSIM* em sua versão 10.0, disponível em: < <https://powersimtech.com/products/> >, acesso em 22/08/2016.

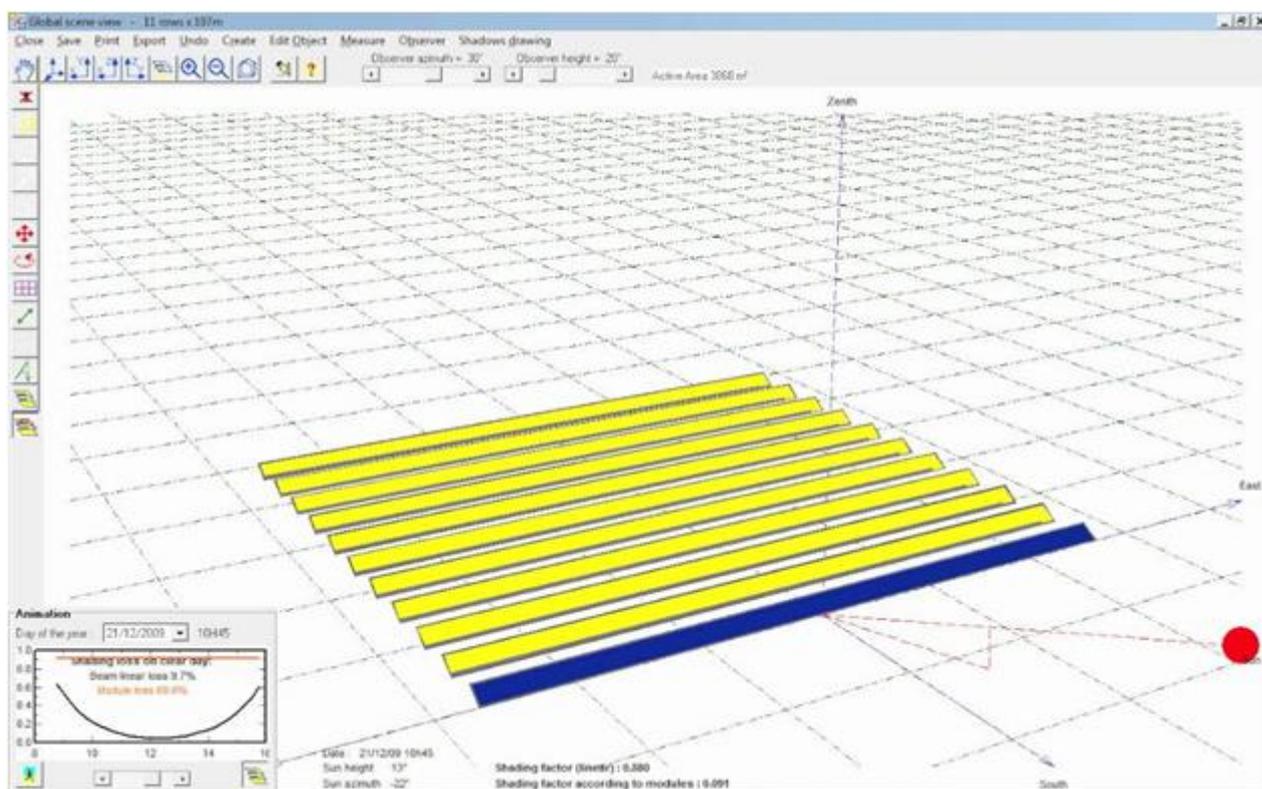


Figura 104: Tela do *software PVSYST*, disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=zuOExeuJkko> >, acesso em 22/08/2016.

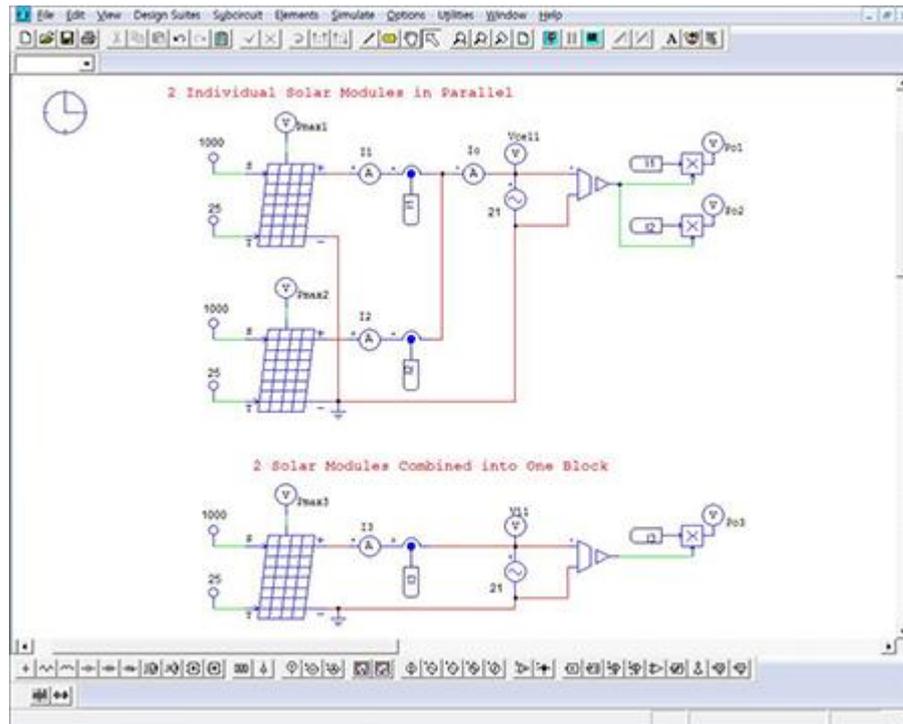


Figura 105: Exemplo de simulação fotovoltaica utilizando o *software PSIM*, disponível em: < http://www.powersimtech.co.kr/category/ren_energy_package >, acesso em 22/08/2016.

No que se refere ao *Google Sketch Up* o mesmo é citado unicamente por sua facilidade em elaborar desenhos, *lay out* e arranjos destinados a permitir uma melhor visualização de um arranjo fotovoltaico. Quanto ao *Google Earth* a aplicabilidade principal seria obter as coordenadas geográficas da localidade⁷ (ex.: latitude e longitude).

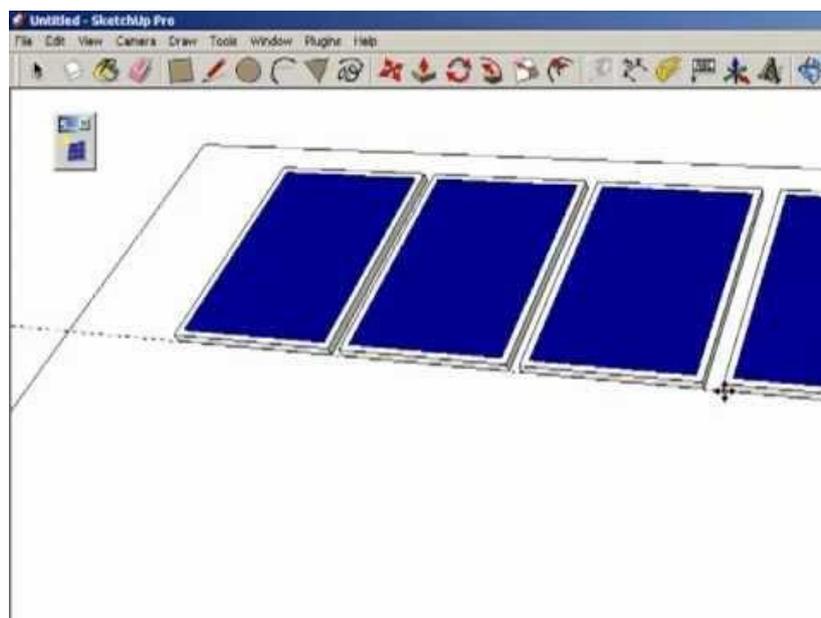


Figura 106: Tela do *software sketch up*, disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=Ee9zysWd9yo> >, acesso em 22/08/2016.

⁷ Influenciam diretamente na eficiência do sistema.
Prof. Eng. Dennys Lopes Alves.



Figura 107: Exemplo de instalação FV representada no *software Google sketch up*, disponível em: < <https://netcad3d.wordpress.com/cursos/tutoriais/descobrir-o-google-sketchup-2/> >, acesso em 22/08/2016.

12. Aspectos Econômicos

Apesar do consenso geral quanto a necessidade de incluir fontes renováveis na matriz energética brasileira, além das vantagens inerentes a geração distribuída via energia solar fotovoltaica explicitadas ao longo deste texto, o elevado custo dos módulos FV e dos equipamentos periféricos imprescindíveis a geração tal como controladores de carga e inversores de frequência tem engessado a expansão em larga escala das tecnologias fotovoltaicas.

Opcionalmente os investidores tem buscado parcerias e financiamentos como forma de subsidiar a aquisição dos componentes fotovoltaicos, a partir da redução dos custos iniciais de aquisição e instalação do conjunto fotovoltaico. Em geral bancos públicos e privados possuem linhas de crédito exclusivas para empreendimentos de geração distribuída (micro e minigeração), trazendo mais economia e sustentabilidade para os projetos de energia renovável, aliando sustentabilidade ambiental e redução de custos.

As linhas de financiamento destinam-se a empresas de pequeno e médio porte, produtores rurais, cooperativas, associações e em alguns casos (poucos e sob condições bem específicas) pessoas físicas.

Referências Bibliográficas

[1] BORGES NETO, Manuel Rangel; CARVALHO, Paulo Cesar Marques de. **Geração de Energia Elétrica: Fundamentos**. São Paulo: Érica, 2012. 158 p.

[2] VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações - Sistemas Isolados e Conectados à Rede**. São Paulo: Érica, 2012. 224 p.

Anexo A – Sugestões de Web Sites

- ABENS – Associação Brasileira de Energia Solar: www.abens.org.br
- INCT – EREEA - Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia: <http://www.ufpa.br/inct-ereea/>
- Animação Sistema Fotovoltaico Autônomo: <http://www.gedae.ufpa.br/SistemaFV.swf>
- Instituto de Energia e Ambiente – IEE USP – Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos: <http://lsf.iee.usp.br/?q=pt-br>
- Fotovoltaica UFSC: <http://fotovoltaica.ufsc.br/sistemas/fotov/>
- Laboratório de Energia Solar – LABSOL – UFRGS: <http://www.solar.ufrgs.br/>
- América do Sol: <http://americadosol.org/>
- Guia de Microgeradores Fotovoltaicos: <http://www.americadosol.org/guiaFV/>
- RBS Magazine – Revista Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica: <http://www.revistabrasilsolar.com/index.html#>
- Solar Brasil: <http://www.solarbrasil.com.br/>