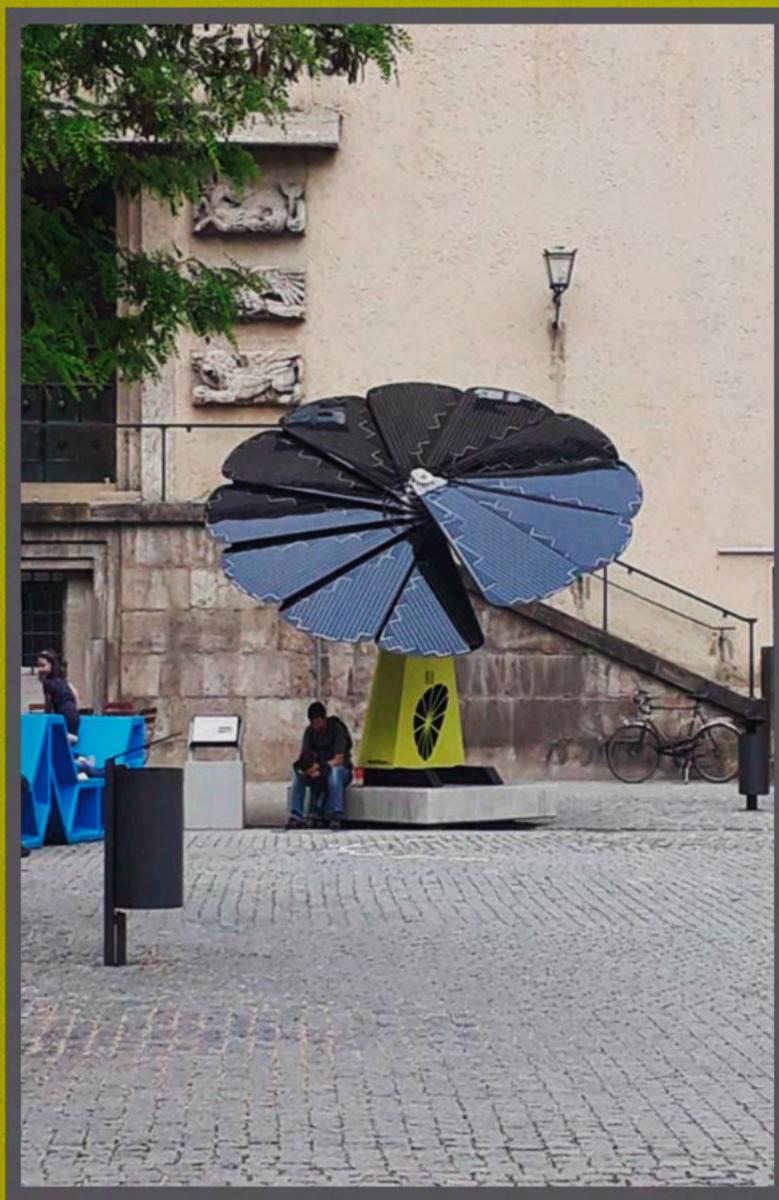


Energia Solar Fotovoltaica: Princípios fundamentais



Juliana D'Angela Mariano
Jair Urbanetz Junior

Atena
Editora
Ano 2022

Energia Solar Fotovoltaica: Princípios fundamentais



Juliana D'Angela Mariano
Jair Urbanetz Junior

Atena
Editora
Ano 2022

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Gabriel Motomu Teshima

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Ilustrações do miolo

Danka Farias de Oliveira

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo do texto e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie



Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



Energia solar fotovoltaica: princípios fundamentais

Diagramação: Daphynny Pamplona
Correção: Yaidy Paola Martinez
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Autores: Juliana D'Angela Mariano
Jair Urbanetz Junior

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M333 Mariano, Juliana D'Angela
Energia solar fotovoltaica: princípios fundamentais / Juliana
D'Angela Mariano, Jair Urbanetz Junior. – Ponta Grossa
- PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0075-2

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.752221803>

1. Energia solar. 2. Geração fotovoltaica. I. Mariano,
Juliana D'Angela. II. Urbanetz Junior, Jair. III. Título.

CDD 621.47

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br



Atena
Editora
Ano 2022

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que o texto publicado está completamente isento de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



PREFÁCIO

Este livro não é só um sonho realizado, ele surgiu em um momento da minha vida que tive oportunidade de exercer minha vocação, dentro de uma instituição de ensino, quando havia terminado um mestrado na área de energia solar fotovoltaica. O tema sustentabilidade e energias renováveis faz parte da minha vida desde 2009, onde comecei a estudar o assunto e resultado: paixão à primeira vista! De um projeto de uma bancada didática fotovoltaica, apresentado como trabalho final de curso para uma dissertação de mestrado, orientado para questão de engenharia foi que este livro foi concebido.

O conteúdo já havia sido explorado na minha revisão da literatura para redação da dissertação de mestrado, porém colocar em uma linguagem mais didática e popular e trazer essa abordagem de forma multidisciplinar foi o grande desafio desta publicação. Neste livro você irá encontrar assuntos bastante técnicos, mas com uma abordagem mais didática e divertida tratando sobre um assunto de extrema relevância nos dias de hoje. Então querido leitor, gostaria de compartilhar contigo minha bagagem acadêmica e experiência profissional de uma maneira descontraída e agradável e espero poder te ajudar a entender os princípios fundamentais desse universo fotovoltaico que é muito abrangente.

Juliana D'Angela Mariano.

Nesses últimos dois anos trabalhei com a Juliana ilustrando seus materiais. Seu convite e interesse representaram um carinho e sensibilidade imensos pelo conteúdo a ser entregue, e por isso me dediquei em aplicar a minha bagagem não apenas de ilustradora, mas também de aluna, leitora e pesquisadora. Sou muito grata por todo o aprendizado e suporte que pude encontrar durante a produção dos desenhos.

O que você verá aqui são imagens com muitas cores que faíscam interesse, mas também formas arredondadas, que propõem mais simplicidade e descontração na leitura. Dei muita atenção para que a experiência de leitura provocasse o mínimo de distrações, enquanto o conteúdo fosse ainda sim substancial, concordando sempre com o texto.

Assim como para muitos leitores, este livro foi também minha porta de entrada para me aproximar do universo da energia fotovoltaica, então espero que para você, os desenhos sejam amigáveis ferramentas em uma jornada de conhecimento enriquecedor.

Danka Farias de Oliveira.

SUMÁRIO

O SOL COMO FONTE DE ENERGIA.....	1
ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	3
Hidroeletricidade.....	3
Biomassa.....	4
Energia Eólica.....	4
Energia Geotérmica.....	5
Energia dos oceanos.....	6
Energia Solar.....	7
HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR E PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS.....	8
APLICAÇÕES CONFORME O ESPECTRO DA ONDA.....	13
TECNOLOGIAS PARA APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR.....	16
Coletores solares térmicos para aquecimento de água.....	16
Concentradores solares térmicos para geração de energia elétrica:.....	17
Módulos solares fotovoltaicos (sem concentrador) para geração de energia elétrica:.....	18
Módulos FV convencionais com seguidor.....	19
Sistemas solares fotovoltaicos com concentrador.....	21
CPV de baixa concentração.....	21
CPV de Concentração média.....	21
Fotovoltaicos de alta concentração (HCPV).....	22
CONHECENDO A RADIAÇÃO SOLAR.....	23
RADIAÇÃO SOLAR E SUAS COMPONENTES.....	24
IRRADIAÇÃO E IRRADIÂNCIA.....	27
INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DA IRRADIAÇÃO SOLAR.....	31
BANCO DE DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR.....	35
POTENCIAL FOTOVOLTAICO MUNDIAL E DO BRASIL.....	38
FUNDAMENTOS DA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA.....	42
CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....	42
ELEMENTOS FOTOVOLTAICOS E SEU FUNCIONAMENTO.....	47
PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....	51

O MÓDULO FOTOVOLTAICO	55
CARACTERÍSTICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	58
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO CRISTALINO	58
Módulo de silício monocristalino (m-Si)	59
Módulo de silício policristalino (m-Si).....	61
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE FILMES FINOS.....	62
Módulo de silício amorfo (a-Si).....	63
Módulo de Telureto de Cádmio (CdTe)	64
Módulo de disseleneto de cobre, índio e gálio (CIS, CIGS)	65
Módulo de células orgânicas (OPV).....	65
CURVAS E PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS.....	66
EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO DA CÉLULA FV E DO MÓDULO FV	71
EFEITOS DA TEMPERATURA E RESPOSTA ESPECTRAL DAS CÉLULAS.....	73
CONHECENDO O SFVI.....	76
CARACTERÍSTICAS DOS SFVI.....	77
Sistemas Isolados Individuais	77
Sistemas Isolados em Miniredes	78
Tipos de cargas	79
Bombeamento de água.....	80
Sistemas de telecomunicações e monitoramento remoto.....	80
Outras aplicações.....	81
EQUIPAMENTOS DOS SFVI	82
APLICAÇÕES DO SFVI	88
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS HÍBRIDOS.....	92
LEGISLAÇÃO DOS SFVI	96
CONHECENDO O SFVCR.....	98
CARACTERÍSTICAS DOS SFVCR.....	99
EQUIPAMENTOS DOS SFVCR.....	102
Inversor.....	102
Proteções elétricas	104

Fiação Elétrica	105
Conectores (Figura 97 e 98)	106
APLICAÇÕES DO SFVCR	107
MODELOS ADOTADOS EM RELAÇÃO A TARIFA DE ENERGIA.....	110
LEGISLAÇÃO DOS SFVCR.....	113
REFERÊNCIAS	117
SOBRE OS AUTORES	123

O SOL COMO FONTE DE ENERGIA

Um dos maiores desafios das sociedades atuais é alcançar o desenvolvimento de forma sustentável. Para atender a uma demanda de energia em constante crescimento é possível atingir esse objetivo através da aplicação das energias renováveis. Para entender a importância da geração de energia por fontes renováveis, é fundamental saber de onde surgiram alguns conceitos e compromissos assumidos muito antes de sua implementação.

Então, este livro irá apresentar o conceito de desenvolvimento sustentável, destacar seus pontos de abordagem, mostrar os desafios do setor energético nessa transição e, ainda uma apresentação das energias renováveis e seus principais impactos ambientais.

O tema se inicia com a definição do Desenvolvimento Sustentável, em que a Organização da Nações Unidas (a ONU) traz uma das definições mais conhecidas sendo: “o desenvolvimento que atende as necessidades atuais sem comprometer a habilidade das futuras gerações de atender às próprias necessidades” [1].

Parece simples não é mesmo? Mas todo esse comprometimento envolve integração de três áreas e sua interdisciplinaridade, conforme mostrado na Figura 1.



Figura 1: Os pilares de sustentação do desenvolvimento sustentável.

Conforme visto na Figura 1, o desenvolvimento sustentável está fundamentado em três pilares de sustentação que requer integração de ações nas áreas: crescimento e equidade econômica, conservação dos recursos naturais e do meio ambiente e desenvolvimento social [2].

Isso quer dizer que os governos e as sociedades devem se comprometer com a promoção do crescimento econômico responsável em longo prazo, reduzindo o consumo de recursos, de emissões e conservação do meio ambiente, e finalmente, erradicar a pobreza estimulando a promoção humana [3].

Neste sentido, você já deve ter o seguinte questionamento: quando o fator energia aparece?

A resposta é que só com acesso à energia é possível garantir a manutenção e desenvolvimento da promoção humana. Sendo assim ela é um fator fundamental dentre todos os esforços feitos para atingir o desenvolvimento sustentável. Inclusive, dentre os objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU, a energia se encontra descrita no sétimo Objetivo do Desenvolvimento Sustentável (ODS), conforme Figura 2.



Figura 2: Objetivo global 7 [4].

Dessa forma, o setor de geração de energia enfrenta o desafio da sustentabilidade onde existe uma demanda em constante crescimento. Para atender este desafio, o desenvolvimento deve seguir um conjunto de medidas, dentre elas, as fontes devem ser renováveis, a produção deve respeitar o meio ambiente e os seres vivos assim como e viabilizar a redução dos Gases de Efeito Estufa (GEE's).

Diversas são as fontes de energias renováveis disponíveis no mundo, como por exemplo, a hidroeletricidade, eólica, solar, biomassa, geotérmica e energia proveniente dos oceanos, sendo que a maioria delas apresenta sua fonte primária gratuita e abundante na superfície ou no interior da terra [5].

Então, por que não aproveitar essas fontes e contribuir com o desenvolvimento

sustentável?

Em seguida serão abordadas as energias renováveis destacando seu funcionamento e o impactos ambientais de cada uma delas com destaque para a energia solar.

ENERGIAS RENOVÁVEIS

A seguir são abordados conceitos sobre as energias renováveis, começando pela hidroeletricidade, já que esta é a principal fonte geradora de energia elétrica no Brasil, seguido da biomassa, energia eólica, geotérmica, oceanos e solar.

Hidroeletricidade

A fonte primária da geração de energia por meio hidroeletricidade (Figura 3) é a água, que geralmente é armazenada em rios limitados por uma barragem. Na parte inferior da barragem existe uma tomada d'água, e o fluxo de água aciona uma turbina que, por sua vez, aciona um gerador elétrico [5].

No Brasil essa fonte representa mais que 60% da capacidade instalada, sendo que a maior usina é a hidrelétrica de Itaipu com 14 GW (giga watts) de capacidade de geração, conforme ilustrado na Figura 3 [6].

Quanto aos impactos ambientais referentes a esse tipo de geração estão diretamente ligados ao tipo e localização da planta, pois demandam grandes áreas para sua construção.



Figura 3: Hidrelétrica de Itaipu [7]

Ainda, hidrelétricas de reservatório geralmente causam grandes impactos devido à mudança no curso dos rios, biodiversidade e emissões de GEE's principalmente de metano, provenientes de decomposição do solo e resíduos vegetais orgânicos significativos em climas tropicais [6].

Biomassa

A biomassa também faz parte das energias renováveis e pode ser obtida por meio de diversos materiais biológicos, provenientes de organismos vivos, plantas e derivados de plantas. A geração de energia através da biomassa é geralmente utilizada em aplicações diretas para a produção de calor por combustão e processo indireto como biocombustível conforme mostrado na Figura 4 [5].

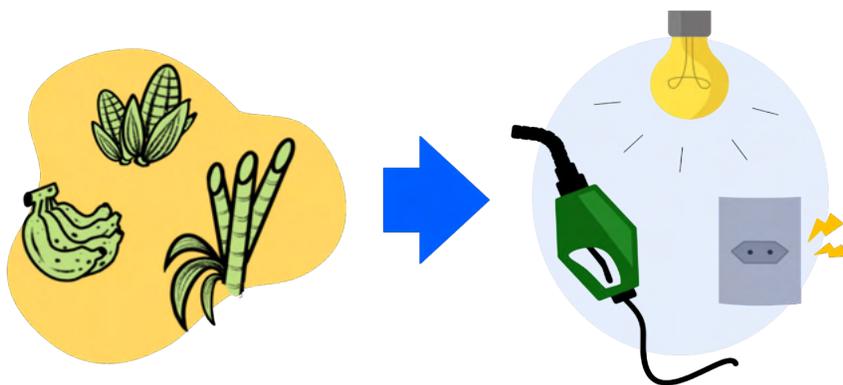


Figura 4: Matéria-prima utilizada na produção da biomassa.

Os impactos ambientais, por sua vez, estão ligados a fatores com alta variação de mudanças climáticas e índices de acidificação, eutrofização e consumo de energia em sua produção. As emissões de GEE's para esse tipo de geração variam de 21 a 154 g CO₂eq / MJ (mega joule) [6].

Energia Eólica

A energia eólica é gerada a partir do fluxo de ar, capaz de acionar as pás de uma turbina que, por sua vez, produzem energia mecânica, e esta é convertida em energia elétrica. Os exemplos mais comuns dessa geração estão na utilização de energia eólica em moinhos de vento, bombas de vento, vela para a propulsão de navios etc.

No Brasil, cerca de 60% da capacidade instalada total está localizada no Nordeste (Ceará e Rio Grande do Norte), e Sul (Santa Catarina e Rio Grande do Sul) [6]. Com a expansão da fonte eólica no Brasil, a matriz de geração de energia elétrica tem se tornado

ainda mais renovável. A previsão do Plano Decenal de Expansão de Energia é que, até 2024, a matriz de capacidade instalada da fonte eólica chegue a 24 GW ^[9]. Na Figura 5 é ilustrado uma usina eólica.



Figura 5: Usina eólica ^[9].

Os principais impactos ambientais estão relacionados à biodiversidade, barulho e alteração das paisagens onde são instaladas. Quanto às emissões de GEE's variam de 4 a 68 g CO₂eq / kWh (grama de dióxido de carbono equivalente por kWh), além disso, minerais raros como Disprósio e Neodímio são necessários durante a produção dos aerogeradores ^[8].

Energia Geotérmica

A energia geotérmica não faz parte da matriz energética brasileira, mas é importante conhecer suas características. Este tipo de energia renovável é derivada e armazenada na terra, onde a temperatura da matéria depende da energia térmica proveniente da crosta terrestre, incluindo a formação construtiva (20%) e a de minerais radiativos (80%).

Essa energia é produzida pela decomposição radioativa, em que a temperatura alcança 5.000 °C através do calor da terra. O calor é liberado (Figura 6) diretamente a partir do núcleo para a rocha mais fria e quando a temperatura é muito elevada, ocorre o derretimento da rocha produzindo magma que é mais leve que a rocha de concreto. Assim, a água do magma e o calor da rocha na superfície exterior atingem 370 °C ^[5].

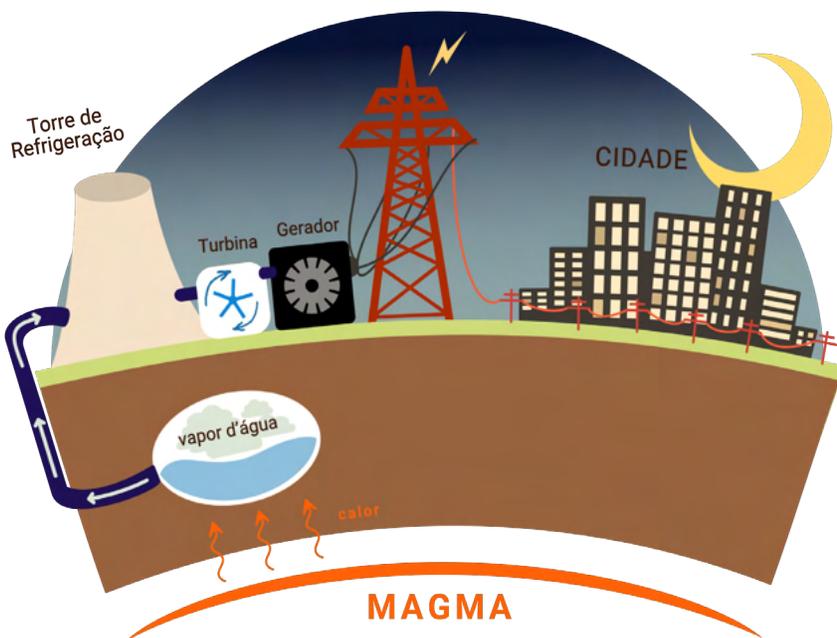


Figura 6: Esquema de uma usina geotérmica.

Os principais impactos ambientais são referentes às bombas de calor geotérmicas que dependem da eletricidade para sua operação. Com relação às emissões de GEE's e o ciclo de vida de bombas de calor geotérmicas e ar variam de 53 a 65 g CO₂eq / MJ e de 58 a 77 g CO₂eq / MJ, respectivamente [8].

Energia dos oceanos

A energia proveniente dos oceanos ainda apresenta aplicação incipiente no Brasil, porém, devido à grande potencial costeiro brasileiro, esta fonte pode contribuir com a diversificação da matriz energética.

Essa fonte pode ser obtida mediante diferentes tecnologias, dentre elas estão a energia das marés, energia das ondas, conversão de energia térmica do oceano e gradiente de salinidade. Segundo Kuang *et al.*, (2016) [10] a energia oceânica é caracterizada por uma menor volatilidade e melhor previsibilidade se comparada com energia eólica e solar, contudo a utilização de energia dos oceanos existente ainda está nos estágios iniciais de desenvolvimento e de demonstração. Na Figura 7 é mostrado uma usina maremotriz (energia oriunda das marés), em Sihwa Lake, situada na Coreia do Sul, com 254 MW [11].



Figura 7: Usina Sihwa Lake – Korea ^[11].

Uihlein e Magagna (2016) ^[12] afirmam que os impactos ambientais estão relacionados ao ciclo de vida dos componentes desse sistema, uma vez que processos de fabricação, operação, manutenção e desativação de dispositivos de energia dos oceanos terão vários efeitos sobre o meio ambiente.

Dessa forma, os principais impactos ambientais esperados estão sobre a comunidade bentônica, ou se seja, formas de vida presentes no ambiente aquático, devido às alterações nos padrões de fluxo, estruturas das ondas, dinâmica sedimentar, interferindo na resposta específica da espécie às alterações do *habitat*, e o emaranhado de mamíferos marinhos, tartarugas, peixes de grande porte e aves marinhas ^[12].

Energia Solar

Por fim falaremos sobre a energia solar, que dentre as fontes de energias renováveis, origina praticamente todas as outras fontes de energéticas na Terra. De acordo com Pinho e Galdino (2014, p. 47) ^[13], a energia proveniente do Sol é a fonte mais abundante e inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor como de luz.

Deste modo, é possível através da radiação solar obter energia indireta, mediante a aplicação de coletores ou concentradores solares, ou energia direta, por meio de energia solar fotovoltaica, que é o objetivo desse livro a partir do capítulo 2.

Na Figura 8 é mostrado uma usina fotovoltaica, sendo uma das gigantes do mundo, instalada na província de Yanchi, China com 1 GWp de potência instalada.



Figura 8: Usina fotovoltaica de Yanchi – China ^[14].

No que se refere aos impactos ambientais ocasionados por usinas fotovoltaicas, estes se mostram significativos em sua fase de construção dependendo da localidade e da dimensão desta planta.

Entretanto, a geração distribuída, ou seja, a aplicação de várias plantas de pequena potência em centros urbanos, merece destaque especial devido à possibilidade de instalação em áreas existentes, tais como telhados e fachadas.

Por esse motivo, a implantação desses sistemas e a modificação do cenário urbano, com a adesão de módulos fotovoltaicos, apresenta impacto social e ambiental muito menor do que a causada por usinas hidrelétricas e termelétricas. Quanto às emissões de GEE's são de aproximadamente 32-79 g CO₂eq / kWh ^[6] ^[8].

Devido a todas essas características de abundância da fonte solar e menores impactos com relação à sua instalação, a energia solar apresenta um enorme potencial a ser explorado no território brasileiro e conhecer o histórico de sua aplicação, seu princípio de funcionamento, assim como a diferentes formas de captação do recurso solar são os objetivos deste livro e será apresentado a seguir.

HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR E PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS

Em seguida será abordado o histórico da energia solar e alguns conceitos básicos de funcionamento, o primeiro dele é o efeito fotovoltaico.

O efeito fotovoltaico é definido como a transformação da energia contida na irradiação solar em energia elétrica. Esse fenômeno foi observado pela primeira vez por um físico francês Edmond Becquerel em 1839, quando este descobriu uma tensão resultante da ação da irradiação solar sobre um eletrodo metálico imerso em uma solução química ^[15],

ilustrado na Figura 9.

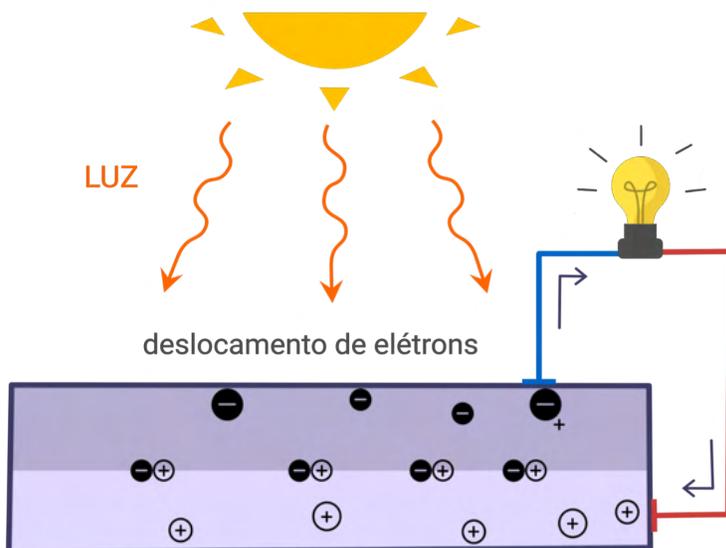


Figura 9: Efeito fotovoltaico.

Dessa forma, o efeito fotovoltaico ocorre em certos materiais semicondutores, presentes na composição uma célula fotovoltaica, capazes de absorver a energia transformando-as em eletricidade, através da quebra das ligações químicas entre as moléculas presentes em suas estruturas, as quais liberam cargas elétricas podendo ser utilizadas para realização de trabalho ^[16] ^[17].

Uma característica importante que semicondutores apresentam, devido à existência dessas bandas, é o aumento da condutividade com a temperatura, ocasionado pela excitação térmica de elétrons da banda de valência para a banda de condução, deixando “lacunas” ou “buracos” na banda de valência, sendo constituídos de carga positiva, cuja mobilidade é cerca de 1/3 da dos elétrons na banda de condução ^[13].

O material semicondutor utilizado para construir uma célula fotovoltaica é o silício cristalino, o qual é cortado em lâminas muito finas. Algumas destas lâminas são, em seguida, “dopadas” com átomos trivalentes (formando o material tipo P – Figura 10), criando assim um desequilíbrio de elétrons conhecida como “lacunas” ou “buracos”, na banda de valência.

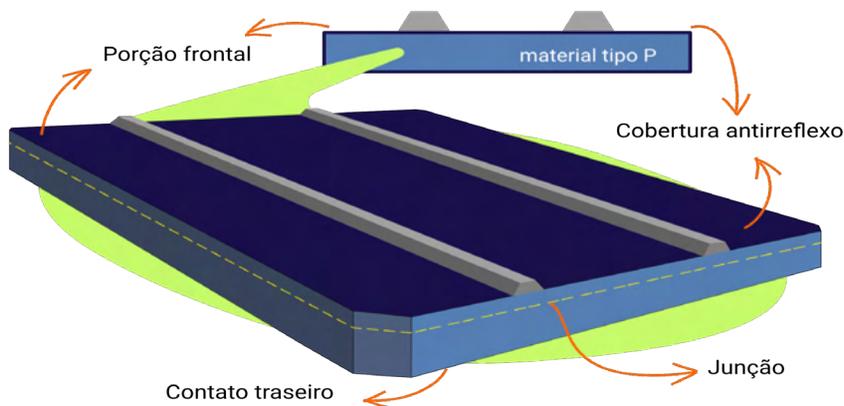


Figura 10: Célula fotovoltaica.

Em seguida, são adicionados átomos pentavalentes (formando o material do tipo N), o que ocasiona o aparecimento de elétrons livres. Entre as regiões tipo P e tipo N formam-se a junção tipo P-N, onde é ocasionado um campo elétrico interno que é responsável pela consolidação da conversão fotovoltaica ^[16].

Em seguida as células fotovoltaicas são interligadas e encapsuladas formando o módulo fotovoltaico, os quais atuam como gerador fotovoltaico e que serão descritos a seguir. Um módulo fotovoltaico é composto de um conjunto de células dispostas sobre uma estrutura rígida e interligadas eletricamente, conforme mostrado na Figura 11. Geralmente as células são ligadas em série para produzir tensões maiores.

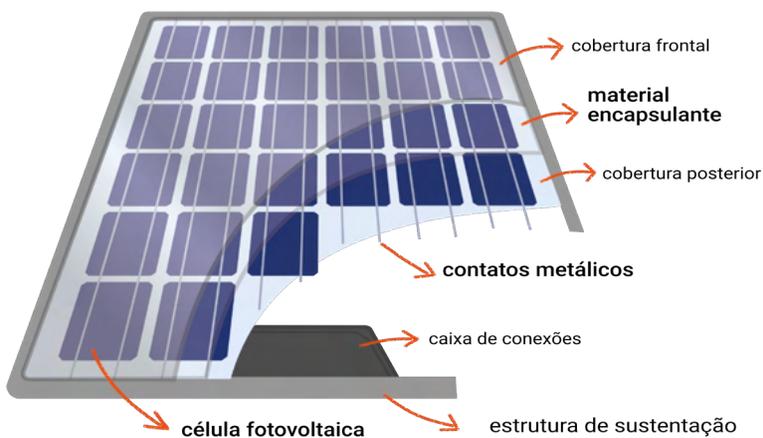


Figura 11: Composição do módulo fotovoltaico.

Na sua parte posterior, há uma caixa de conexões elétricas, para a ligação dos cabos elétricos fornecidos junto com o módulo. Os cabos possuem conectores padronizados, permitindo a rápida conexão de módulos em série ^[17].

Com relação a aplicações, primeiramente esta tecnologia foi utilizada pela agência americana NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) quando durante a Guerra Fria lançou o satélite Vanguard 1 (Figura 12), (ele ainda se encontra orbitando a terra, mas sem enviar sinal) ao espaço munido de pequenos painéis solares.



Figura 12: Réplica do satélite Vanguard 1 ^[18].

A segunda aplicação ocorreu em locais sem acesso a rede elétrica, em comunidades isoladas onde são protegidos por legislação ambiental ou ainda para atender cargas especiais, através dos Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFVI).

Atualmente utiliza-se em maior escala os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica geralmente aplicados às edificações (BAPV – termo em inglês *Building Applied Photovoltaics*), conforme imagem mostrado na Figura 13.



Figura 13: Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica aplicados às edificações ^[19].

Ou ainda mais recentemente integrados na edificação (BIPV - termo em inglês *Building Integrated Photovoltaics*), podendo substituir elementos construtivos, conforme mostrado na Figura 14.

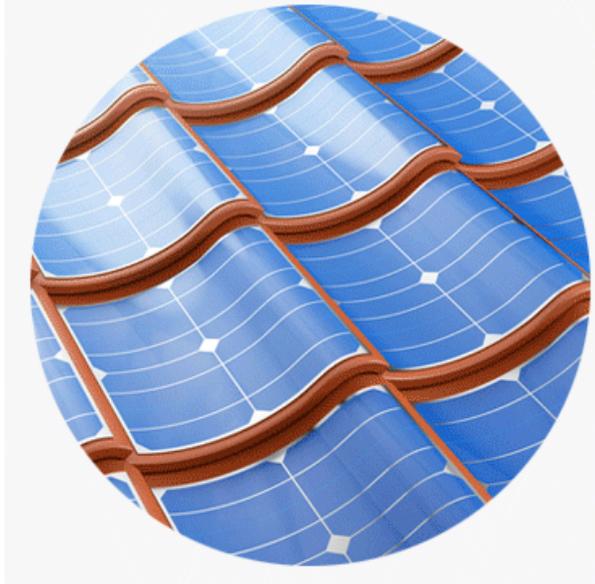


Figura 14: Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica integrado às edificações ^[20].

Como você viu, é possível utilizar a energia para diversas aplicações conforme a disponibilidade solar do local e necessidade da instalação. Neste sentido, será apresentado alguns exemplos da utilização da energia solar, seja na geração de energia elétrica ou de calor.

APLICAÇÕES CONFORME O ESPECTRO DA ONDA

O espectro de irradiação solar é dividido em três partes conforme o comprimento da onda e de sua potência radioativa relativa. Assim o espectro de maior intensidade, mas menor comprimento é o UV (ultravioleta), enquanto o espectro visível se encontra na região de potência e comprimento intermediária e o espectro infra-vermelho apresenta potência reduzida, mas comprimento elevado (Figura 20).

De acordo com cada espectro citado anteriormente, pode-se utilizar para diferentes aplicações, sendo que a tecnologia solar fotovoltaica é diferente da tecnologia solar térmica, que utiliza o calor (radiação infravermelha) para aquecimento. Assim, a conversão direta da energia da luz ocorre através do espectro visível em energia elétrica, apresentado na Figura 15.

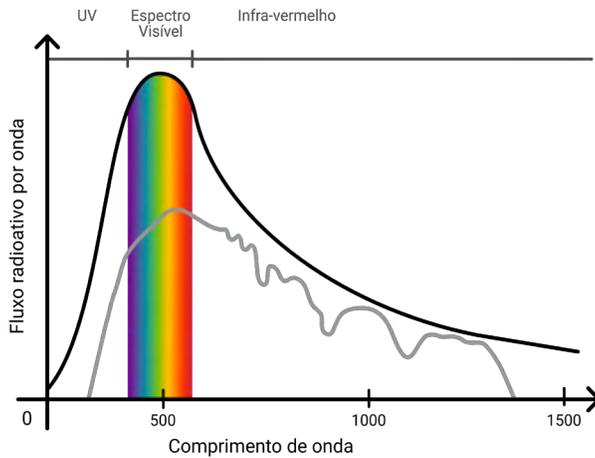


Figura 15: Espectro da irradiação solar.

Como é mostrado na Figura 15, a energia solar fotovoltaica se dá a partir da do espectro visível da irradiação, enquanto a energia solar térmica utiliza o espectro infravermelho. Por isso, as aplicações variam conforme o espectro da onda podendo ser usada para:

- Aquecimento (Figura 16) → gerando calor através do espectro infravermelho, comumente aplicados nos coletores solares, também conhecidos como sistemas passivos de captação solar.



Figura 16: Coletor solar térmico ^[19].

- Geração indireta de eletricidade (concentrar o calor, Figura 17), ou seja, o calor concentrado gera vapores capazes de acionar turbinas operando geradores, que estes por sua vez geram eletricidade.



Figura 17: Concentrador solar térmico ^[19].

- Geração direta de eletricidade, através da luz (fótons), mediante a aplicação de módulos fotovoltaicos ou por luz concentrada (Figura 18), por meio de módulos fotovoltaicos concentradores, ambos gerando eletricidade.



Figura 18: Módulo fotovoltaico convencional (esq.) e módulo fotovoltaico concentrador (dir.^[19]).

Para concluir, cada aplicação se restringe ao local de instalação, sendo que em locais próximos aos trópicos são ideais para aplicação da tecnologia fotovoltaica, onde a temperatura mais amena favorece seu desempenho.

A seguir são apresentados os sistemas com suas respectivas tecnologias para o aproveitamento da energia solar.

TECNOLOGIAS PARA APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR

Coletores solares térmicos para aquecimento de água

Os coletores solares térmicos geralmente são utilizados para aquecer água utilizando baixas temperaturas aplicados em residências, hotéis, clubes, hospitais etc. seu sistema contempla basicamente o coletor solar, boiler e a caixa d'água para a troca de calor, conforme mostrado na Figura 19.

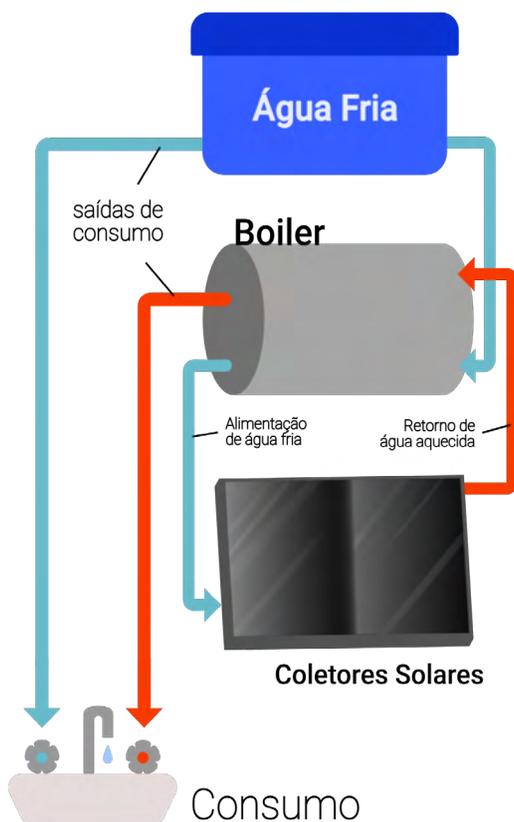


Figura 19: Partes constituintes de um sistema de aquecimento de água.

A energia solar térmica é uma tecnologia que permite a conversão da energia solar em energia térmica, e a partir disso, proporciona o aquecimento da água em sistemas residenciais, prediais e comerciais.

A conversão da radiação proveniente do sol em energia térmica é realizada pelos coletores solares. Este sistema se divide em 3 subsistemas, conforme apresentado na Figura 20.

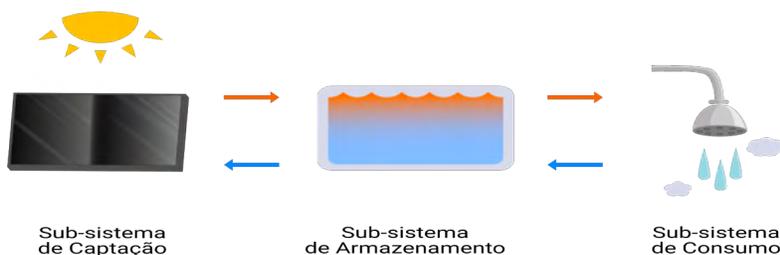


Figura 20: Esquema de funcionamento de um sistema de aquecimento de água.

Captação: coletores solares por onde circula o fluido a ser aquecido e as tubulações de ligação entre os coletores e entre a bateria de coletores e o reservatório térmico;

Armazenamento: reservatório térmico e o sistema complementar de energia;

Consumo: composto por toda a distribuição hidráulica entre o reservatório térmico e os pontos de consumo.

Alguns cuidados devem ser tomados para esta instalação como:

- O local de instalação deve ser seguro: telhados;
- Evitar instalar os painéis em locais com sombreamento;
- Painéis devem ser instalados o mais próximo possível do local de consumo.

Concentradores solares térmicos para geração de energia elétrica:

Os concentradores solares térmicos para geração de energia elétrica produzem energia em altas temperaturas, atuando na produção de vapor para movimentar as pás de uma turbina acoplada a um gerador elétrico, logo gerando energia elétrica indiretamente.

Estes sistemas são compostos geralmente de calhas parabólicas ou prato parabólicos, podendo em alguns casos seguir o Sol aplicados em grandes usinas centralizadas, conforme mostrado na Figura 21.



Figura 21: Sistemas com concentradores solares térmicos [19].

Os sistemas de concentrador solar são projetados especialmente para altas temperaturas. Seu princípio de funcionamento é baseado na projeção de todo o incidente uma superfície reflexiva em radiação ponto particular.

Os sensores consistem em um gasoduto com um revestimento seletivo que atravessam longitudinalmente o sensor e absorvedor. Estes tubos são radiação solar refletida pelas paredes curvas que os rodeiam, conseguindo-se assim uma maior quantidade de energia por unidade de área do absorvedor (W / m^2).

O resultado de tudo isto é um sensor capaz de gerar altas temperaturas de até 200 ° C com níveis de radiação normalizados. Portanto, esses sensores são utilizados tanto para a produção e apoiar o aquecimento de água quente sanitária ou equipamentos de refrigeração para alimentar por adsorção ou absorção [21].

Módulos solares fotovoltaicos (sem concentrador) para geração de energia elétrica

Módulos solares fotovoltaicos (Figura 22) são utilizados para geração direta de energia elétrica pelo efeito fotovoltaico, como já falado anteriormente. Podem ser empregados nas mais variadas potências, ou seja, instalações residências, industriais e usinas ou com sua base acompanhando o movimento do Sol, ou ainda, concentrando a energia do Sol.

Estes sistemas podem ser de pequena potência (W, kW) ou de grande potência (MW). Atualmente é a tecnologia mais usual para geração de energia elétrica a partir da energia solar.



Figura 22: Módulos fotovoltaicos [22].

Os módulos fotovoltaicos são aplicados em sistemas isolados, que são normalmente instalados em locais sem acesso à rede elétrica, e necessitam de um elemento armazenador de energia, que neste caso são baterias; e sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR), são vistos como uma forma de geração distribuída (GD) ao longo dos alimentadores da rede elétrica de distribuição, em baixa ou média tensão, e contribuem para disponibilizar energia próximo ao ponto de consumo.

Conforme visto anteriormente, os SFVCR estão cada vez mais presentes na matriz energética mundial, seja pela aplicação de usinas fotovoltaicas de grande porte ou por meio de usinas geradoras de mini e microgeração incorporada às edificações, atuando como geração distribuída inserida no meio urbano.

Diversas são as vantagens com a implantação desses sistemas, dentre elas estão: elevada produtividade (pois toda a energia disponibilizada pelos módulos é utilizada), ausência do banco de baterias e ao desligamento automático do inversor quando na ausência de energia da rede elétrica, conferindo segurança ao sistema, evitando assim o fenômeno de ilhamento.

Este fenômeno ocorre quando parte da rede elétrica é desconectada proposadamente ou acidentalmente do restante do sistema da concessionária, mas essa continua a ser energizada por um ou mais geradores distribuídos conectados a ela, formando um subsistema isolado [23].

Módulos FV convencionais com seguidor

Geralmente são aplicados módulos FV com seguidor em plantas fotovoltaicas em sistemas de grande potência (kW, MW), conforme mostrado na Figura 23.



Seguidor de dois eixos



Seguidor de um eixo

Figura 23: Módulos fotovoltaicos com seguidores ^[19].

Um seguidor ou rastreador solar é um dispositivo que orienta um sistema solar fotovoltaico, particularmente uma grande instalação como uma central solar na direção do sol de forma a captar mais energia solar, o que não seria possível sem esse dispositivo.

Resumindo, o processo de rastreamento não é mais do que diminuir o ângulo de incidência entre a luz solar e a matriz do painel solar. Os painéis solares podem capturar a parte difusa da luz do sol quer em céu azul ou nublado, mas com o sistema de seguidor solar aumenta a percentagem de captação de luz solar direta o que leva como consequência a um aumento de produção de energia.

Em geral, os sistemas de rastreamento do sol conseguem fazer com que seja captada aproximadamente mais 50% de luz solar no verão e 20% adicional no inverno, mas estes dados podem divergir tendo em conta a latitude.

Existem dois tipos base de seguidores solares:

- Seguidores solares de eixo único;
- Seguidores solares de eixo duplo.

Os seguidores solares de eixo duplo podem variar na sua forma pelo que atualmente existe uma grande variedade, todos eles projetados para situações particulares e com o propósito de se obter o máximo nível de performance possível.

Os seguidores solares de eixo único seguem o sol de leste a oeste, enquanto os de eixo duplo também é possível inclinar em ângulos do sol diferente no verão e no inverno ^[24].

Sistemas solares fotovoltaicos com concentrador

Sistemas solares fotovoltaicos com concentrador geralmente aplicados em plantas fotovoltaicas em sistemas de grande potência (kW, MW), conforme mostrado na Figura 24.



Concentrador parabólico



Concentrador com lente de Fresnel



Planta fotovoltaica com concentrador

Figura 24: Módulos fotovoltaicos concentradores ^[19].

Os sistemas fotovoltaicos concentrados (CPV) empregam a luz do sol concentrada em superfícies fotovoltaicas com o propósito de produzir energia elétrica. Podem ser usados concentradores solares de todos os tipos, sendo estes frequentemente montados num rastreado solar de forma a manter o ponto fulcral na célula à medida que o sol se desloca no céu.

Dentro destes sistemas, eles podem ser subdivido em:

CPV de baixa concentração

Os CPV de baixa concentração são sistemas com concentração solar de 2-100 sóis. Devido a razões de ordem econômica são usadas células solares de silício convencional ou modificadas e a estes níveis de concentração onde fluxo é suficientemente baixo de forma a que as células não necessitem de arrefecimento ativo.

CPV de Concentração média

Para concentrações de 100 a 300 sóis, os sistemas de CPV requerem um seguimento

solar dois eixos e arrefecimento (seja passivo ou ativo), tornando-os mais complexos.

Fotovoltaicos de alta concentração (HCPV)

Os sistemas de alta concentração fotovoltaica empregam óticas de concentração composto por pratos refletores de lentes Fresnel que concentram a luz solar até intensidades de 300 sóis ou mais. As células solares requerem grande capacidade de pias de calor para prevenir a destruição térmica e para gerir perdas de desempenho. As células solares de multi-junção são atualmente favorecidas em relação ao silício, visto que são mais eficientes.

Apesar do custo de funcionamento das células solares de multi-junção ser aproximadamente 100 vezes maior em relação às células solares de silício, o custo das células continua a ser uma pequena fração do custo total do sistema FV concentrado, por isso o fator econômico pode favorecer as células de multi-junção ^[21].

CONHECENDO A RADIAÇÃO SOLAR

Você sabia que antes de qualquer projeto de dimensionamento para sistemas fotovoltaicos é necessário conhecer a radiação solar e suas componentes?

Cada local no globo terrestre apresenta uma característica própria bem definida, devido a sua localização geográfica. Por esse motivo, o levantamento do recurso solar é realizado todos os dias e armazenado em diversas instituições oficiais e de pesquisa, tanto pelo governo quando empresas privadas. Um exemplo prático é apresentado a seguir.

Todos os dias durante seu telejornal da manhã, tarde ou noite ele te atualiza com informações de tempo e meteorologia com a previsão do tempo. Atrás dessa notícia, existe um universo de informações levantadas, tratadas e armazenada nas mais variadas medidas de tempo, podendo ser de um dia, de uma hora, minuto ou segundo.

Imagine o volume de informações que estes órgãos trabalham diariamente para que todos nós possamos saber o tempo no decorrer da semana e o rigor que deve ser tratado todas essas variáveis? Inimaginável não é mesmo?

Devido à toda essa quantidade de informação é necessário obedecer a um padrão comum para medição, coleta, tratamento e armazenamento dessas grandezas para que se possa comparar diversas localidades e produzir documentos oficiais, como por exemplo, o Atlas Brasileiro de Energia Solar.

Como todo documento obedece a normas, é possível você encontrar todas a terminologia utilizada por estes órgãos nas normas brasileiras (as NBR's). Na NBR são definidas grandezas como irradiação e irradiância com todas suas componentes, assim como a unidade padrão que pode ser medida, garantindo que se fale a mesma língua em todos os locais do mundo.

Estes padrões são seguidos em sua totalidade pelas estações meteorológicas, onde existem os mais variados equipamentos de medição. Você já ouviu falar em anemômetro, pluviômetro e piranômetro? Estes são alguns desses equipamentos presentes em uma estação meteorológicas e que vamos aprender qual deles podemos utilizar para medir a irradiação solar.

Estas estações, trabalham em parcerias com diversos centros de pesquisas e universidades afim de garantir um banco de dados de irradiação solar seguro e que sirva de utilidade para a sociedade.

Como já dito anteriormente, a publicação de maior relevância no Brasil é o Atlas Brasileiro de Energia Solar, documento este que traz dados de irradiação solar com suas diversas componentes e em diferentes superfícies analisadas em todos os estados brasileiros.

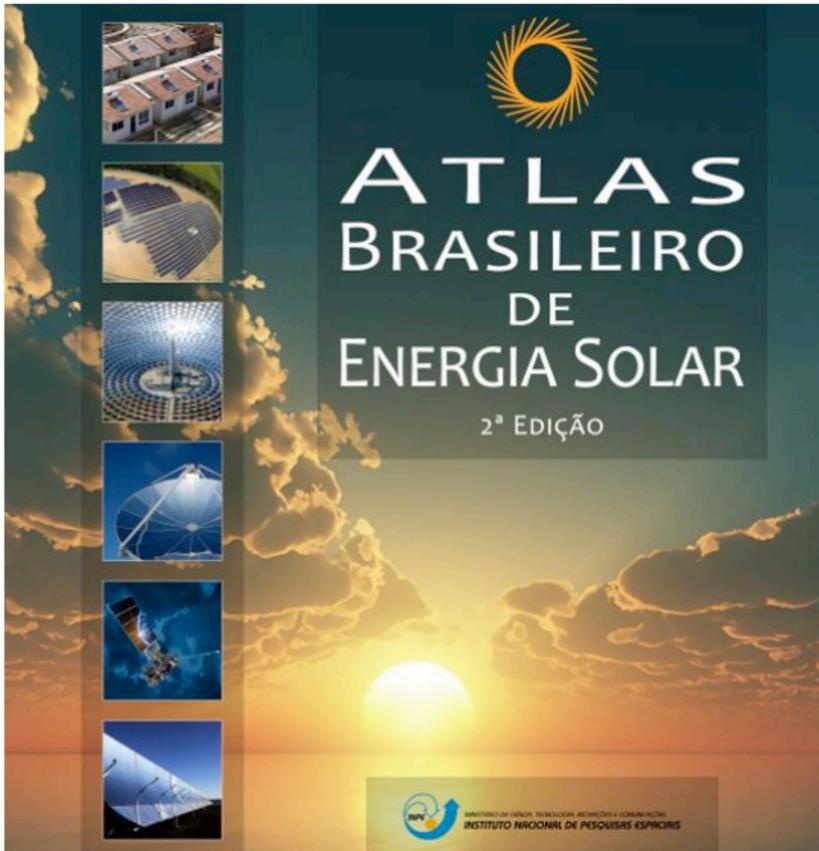


Figura 25: Atlas Brasileiro de Energia Solar [25].

Como todos esses dados disponíveis é possível conhecer o potencial fotovoltaico mundial e brasileiro e saber onde sua implantação é mais adequada, sendo o tema deste capítulo.

RADIAÇÃO SOLAR E SUAS COMPONENTES

A seguir são apresentadas algumas definições e curiosidades sobre a irradiação solar e o Sol.

“A radiação solar é a forma de transferência de energia advinda do Sol, através da propagação de ondas eletromagnéticas”.

- O Sol dista em média cerca de 150.000.000 km da terra;
- As radiações emitidas pelo Sol atingem a camada externa da atmosfera terrestre com intensidade que depende da distância Sol-Terra;

- A intensidade média é conhecida como “constante solar” (G_{AM0}):

$$G_{AM0} = 1.367 \text{ W/m}^2$$

- Na superfície terrestre a intensidade de radiação máxima é cerca de:

$$G_{HOR} = 1.000 \text{ W/m}^2$$

A radiação solar apresenta 3 componentes:

- Radiação direta;
- Radiação difusa;
- Radiação devida ao albedo.

A seguir é feita a definição de cada uma destas componentes, sendo identificadas na Figura 26.

A radiação direta corresponde aos raios solares que chegam diretamente do sol em linha reta e incidem sobre o plano horizontal.

A radiação difusa corresponde aos raios solares que chegam indiretamente ao plano, sendo resultado da difração na atmosfera e da reflexão da luz na poeira, nas nuvens e em outros objetos.

A radiação devida ao albedo corresponde à fração da radiação refletida nos arredores e no solo ^[26].

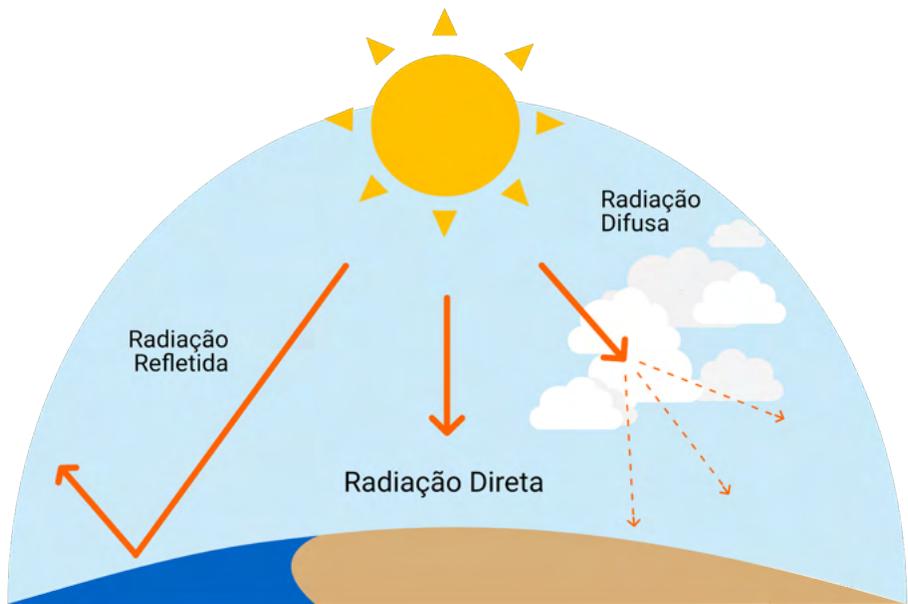


Figura 26: Irradiação solar e suas componentes.

Dentre estes tipos de radiação solar, pode-se fazer 2 tipos de medições de grandezas que será abordado mais adiante:

- a irradiância;
- e a irradiação.

O albedo em alguns materiais é mostrado na Tabela 1, e este pode se encontrar circundantes na instalação fotovoltaica.

Superfície	Albedo
Gramado	0,2
Asfalto	0,15
Terra	0,17
Superfície da água	0,1
Neve	0,8

Tabela 1: Albedo em diversas superfícies ^[19]

Como mostrada na tabela, o material que apresenta maior albedo é a camada de neve, enquanto uma superfície com asfalto possui o menor albedo.

Outra característica que devemos conhecer é a Massa de Ar (AM). A massa de ar (*Air Mass*) é a razão entre o caminho óptico percorrido pelos raios solares na atmosfera e o caminho vertical na direção de zênite, ao nível do mar (Figura 27).

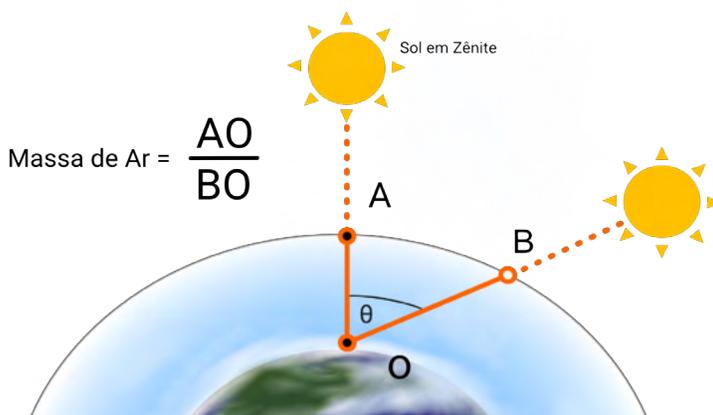


Figura 27: Representação da massa de ar.

De acordo com a figura apresentada, é possível fazer o cálculo da massa de ar aplicando a fórmula simples da divisão da distância do Sol percorrida pelos raios solares pela distância vertical na direção ao zênite.

O Espectro solar também é uma característica que deve ser conhecida. O espectro solar que chega à superfície terrestre é diferente do presente fora da atmosfera, e varia com a massa de ar, vapor de água e gases presentes na atmosfera. Sendo que a irradiação solar extraterrestre é superior a irradiação ao nível do mar.

IRRADIAÇÃO E IRRADIÂNCIA

O tema a seguir abordará definições de 2 grandezas: a irradiação e a irradiância.

Todas as definições a seguir são encontradas na **Norma Brasileira: ABNT – NBR 10899: 2006 Energia solar fotovoltaica – Terminologia** [24]:

- **Irradiância solar (G)** – É a taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, normalmente medida em Watt por metro quadrado (W/m^2).
- **Irradiância direta (G_{DIR})** – É a irradiância solar incidente em uma superfície, sem

ter sido espalhada pela atmosfera, podendo ser horizontal ou normal.

- **Irradiância difusa (G_{DIF})** – É a potência radiante do céu, recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal, excluída a irradiância direta.

- **Irradiância global (G_{HOR})** - Potência radiante solar, recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal, que é igual à irradiância direta mais a irradiância difusa.

- **Albedo** - Índice relativo à fração da energia radiante solar, recebida em uma unidade de área, devida à refletância dos arredores e do solo onde está instalado um dispositivo. A irradiância devida ao albedo é simbolizada por G_{ALB} .

- **Irradiância total (G_{TOT})** – É a potência radiante solar total com as componentes direta, difusa e de albedo, recebida em uma unidade de área em uma superfície com inclinação qualquer.

Os conceitos de irradiação, ainda de acordo com a ABNT – NBR 10899: 2006 Energia solar fotovoltaica – Terminologia [24] são apresentados a seguir.

- **Irradiação solar (I ou H)** - Irradiância solar integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente uma hora ou um dia.

1. Medida em watt hora por metro quadrado ou Joule por metro quadrado (Wh/m^2 ou J/m^2).

2. É simbolizada por “I”, quando integrada em uma hora “H”, quando integrada em um dia

- **Irradiação difusa** - Irradiância difusa integrada durante um intervalo de tempo especificado: I_{DIF} ou H_{DIF}

- **Irradiação direta** - Irradiância direta integrada durante um intervalo de tempo especificado: I_{DIR} ou H_{DIR}

- **Irradiação global** - Irradiância global integrada durante um intervalo de tempo especificado: I_{HOR} ou H_{HOR}

- **Irradiação total** (que é a que vamos aplicar nos nossos projetos fotovoltaicos) - Irradiância total integrada durante um intervalo de tempo especificado: I_{TOT} ou H_{TOT}

Portanto, a irradiância é uma potência medida em uma dada superfície, enquanto a irradiação é a energia em uma dada superfície medida um determinado período de tempo (horas, dias ou ano). O resumo destas definições é apresentado na Figura 28.

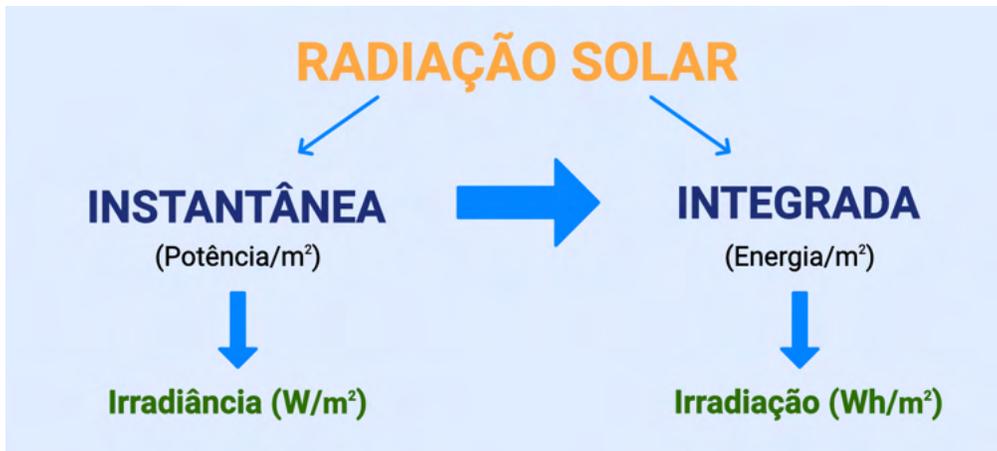


Figura 28: Irradiância e irradiação.

A irradiância é uma grandeza que pode ser medida por equipamentos conhecidos como radiômetros, estes podem ser de simples sensores de silício ou piranômetros de termopilha. Sua unidade é medida em W/m^2 , ou seja, é a potência instantânea medida em uma determinada superfície. Enquanto a irradiação é a medida da irradiância integralizada durante um intervalo de tempo, podendo ser por hora, dia ou ano.

A seguir é mostrado na Figura 29, o comportamento da curva de irradiância em um dia de céu limpo em um módulo fotovoltaico fixo e outro no módulo fotovoltaico acoplado a um seguidor solar.

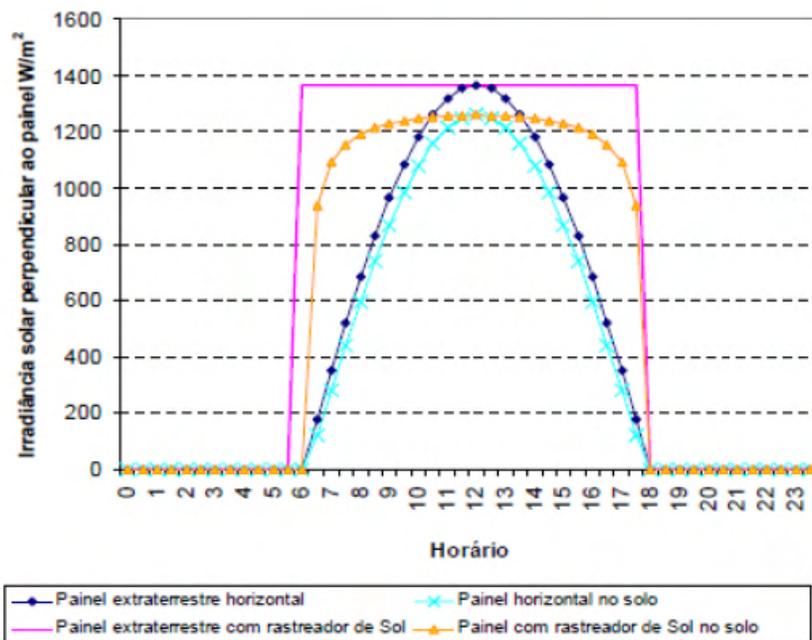


Figura 29: Irradiações em diferentes planos ^[19].

Pode-se concluir que os painéis com rastreadores podem apresentar maior resposta gerando um maior aproveitamento da irradiação diária, enquanto painéis fixos apresentam uma curva mais variável ao longo do dia. A mesma comparação pode ser feita com painéis fixo instalados horizontalmente e inclinados, onde a diferença se mostra mais acentuada para o período de inverno (Figura 30).

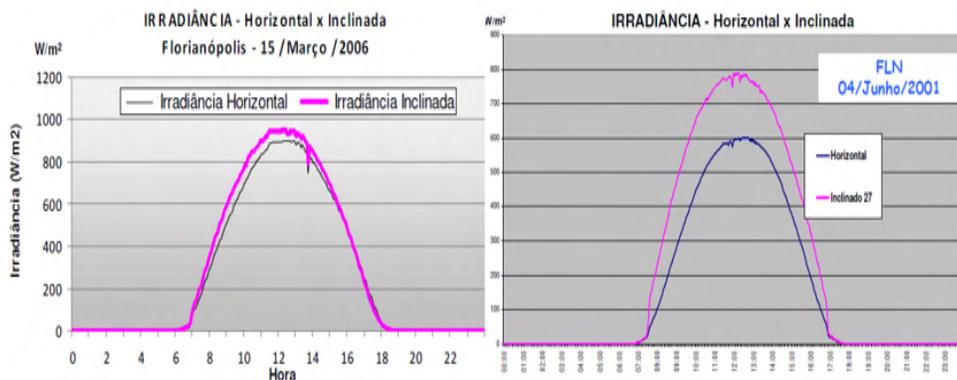


Figura 30: Comparação entre irradiação no plano horizontal x inclinado ^[19].

Com isso, conclui-se que a estratégia de inclinar os painéis fotovoltaicos deve maximizar os ganhos na geração de energia por estes sistemas, já que dependem do recurso solar. Logo, conhecer o local de aplicação com relação às coordenadas geográficas e os bancos de dados de irradiação solar adequados é fundamental ao projeto de um sistema.

INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DA IRRADIAÇÃO SOLAR

O tema a seguir refere-se aos conhecimentos sobre banco de dados de irradiação solar, assim como saber como estes dados são coletados e tratados. Diversos são os instrumentos que medem essa grandeza dentro de uma estação meteorológica e será abordado a seguir.

A estação solarimétrica geralmente se encontra dentro de uma estação meteorológica, onde suas principais funções são levantar dados de radiação solar; coletar dados de temperatura, umidade, direção, velocidade do vento e pressão atmosférica.

Esses dados contribuem na confecção do atlas de radiação solar e para o ensino e para a pesquisa. A estação solarimétrica pode ser composta pelos seguintes equipamentos:

- Piranômetro: mede a radiação global (direta + difusa);
- Pirgeômetro (radiômetro Infravermelho de Precisão): mede a radiação de onda longa;
- Pireliômetro: mede a radiação direta;
- Sensor de Temperatura e Umidade (termohigrômetro);
- Sensor de Pressão;
- Coletor de Dados (Data logger).

O piranômetro termoeletrônico é destinado a realizar medições da irradiância global, normalmente no plano horizontal, ou seja, campo hemisférico e, é composto por um sensor de termopilha com resposta espectral de até 2.500 nm^[13].

Um exemplo prático é o caso da UTFPR – Câmpus Curitiba que em 2015, adquiriu um piranômetro termoeletrônico modelo CMP 03, do fabricante Kipp&Zonen e um datalogger CR1000 da fabricante Campbell Scientific, que foram instalados na cobertura de um dos blocos sede Centro do câmpus Curitiba, conforme mostrado na Figura 32^[27].

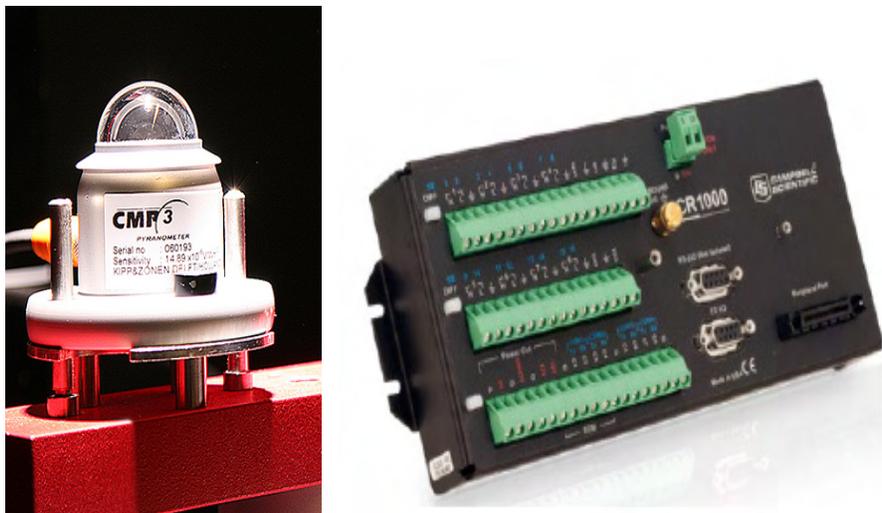


Figura 31: Piranômetro e data logger instalados na UTFPR – Campus Curitiba. Foto do piranometro cortesia da Kipp&Zonen e Datalogger [28].

Este piranômetro é capaz de medir uma irradiância de até 1.500 W/m^2 , instalado juntamente com o datalogger da UTFPR e configurado para coletar dados solarimétricos em intervalos de minuto a minuto. O equipamento iniciou a coletar os dados no dia 15 de setembro de 2015 e já em seu primeiro dia de operação, alcançou valores de irradiância superiores a 1.000 W/m^2 por volta do meio dia, e o valor de irradiação, por sua vez, foi de $4,97 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{dia}$.

Mais recentemente no ano de 2019, a UTFPR instalou estações solarimétricas padrão SONDA e EPE (Empresa de Pesquisa Energética), que são destinadas a levantar e melhorar a base de dados dos recursos de energia solar e eólica no Brasil. A iniciativa fez parte do projeto P&D ANEEL/COPEL-Distribuição/UTFPR-CT – PD 2866-0464/2017 – “Metodologia para Análise, Monitoramento e Gerenciamento da Geração Distribuída por Fontes Incentivadas”, sendo um dos objetivos do projeto coletar e analisar dados referentes às medições das irradiâncias global horizontal, difusa, direta normal e global no plano inclinado na latitude [29]. Na Figura 32 é mostrado a estação solarimétrica SONDA instalada em um dos campos da UTFPR.

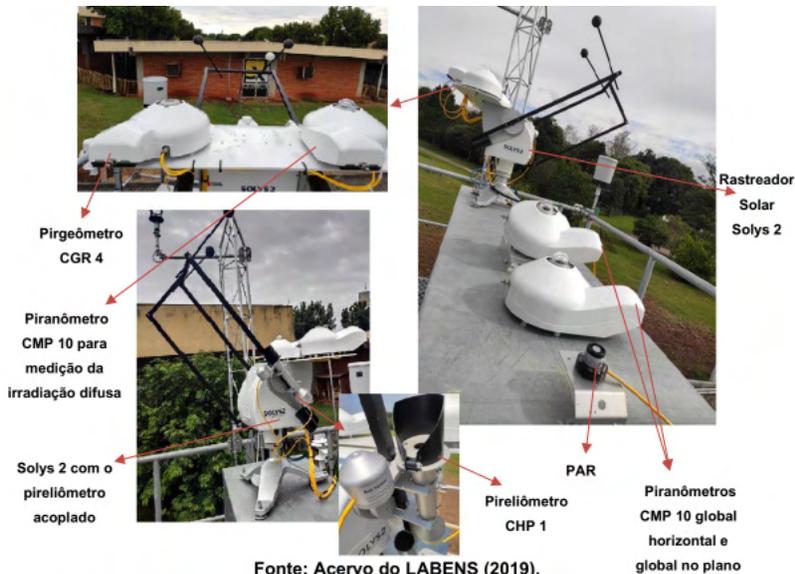


Figura 32: Equipamentos empregados na estação solarimétrica [29].

Conforma mostrado na Figura 32, as estações da rede SONDA devem possuir piranômetros para aquisição de dados de irradiância global horizontal e irradiância horizontal difusa, onde algumas também medem a irradiância direta normal através de um pireliômetro acoplado a um rastreador solar, sendo que todos esses radiômetros devem ser de padrão secundário [29].

No Brasil, o órgão responsável por dados meteorológicos é o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) que representa o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, responsável pela promoção de informações meteorológicas à sociedade através do portal de acesso na internet ou por solicitação de dados no local ou meio eletrônico, disponibilizados gratuitamente (Figura 33) [30].

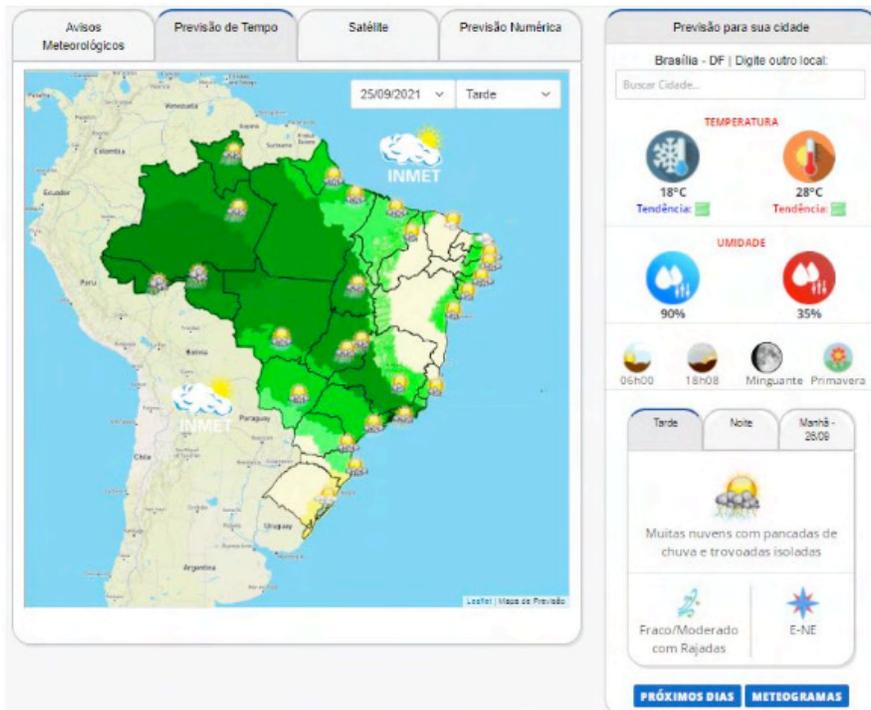


Figura 33: Site do INMET [30].

Neste sentido, o órgão tem diversas funções, dentre elas elaborar e divulgar, diariamente, em nível nacional, a previsão do tempo, anunciar avisos e boletins meteorológicos especiais; promover a execução de estudos e levantamentos meteorológicos e climatológicos referente à agricultura e outras atividades correlatas [30].

A partir do portal, é possível coletar diversos parâmetros meteorológicos como: temperatura, umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento, pressão atmosférica, precipitação, radiação solar, dentre outras variáveis cujas medidas tomadas são mensuradas em intervalos de minuto a minuto, e integralizadas no período de uma hora. Para a coleta e armazenamento desses dados, o instituto é dotado de estações de sondagem de ar superior (radiossonda); estações meteorológicas de superfície, operadas manualmente; e a maior rede de estações automáticas da América do Sul [30].

As estações automáticas (Figura 34) são constituídas por: subsistema de coleta de dados, através de sensores que medem as variáveis ambientais; subsistema de controle e armazenamento local em *datalogger*; subsistema de energia; subsistema de comunicações; subsistema de banco de dados; e subsistema de disseminação de dados aos usuários.

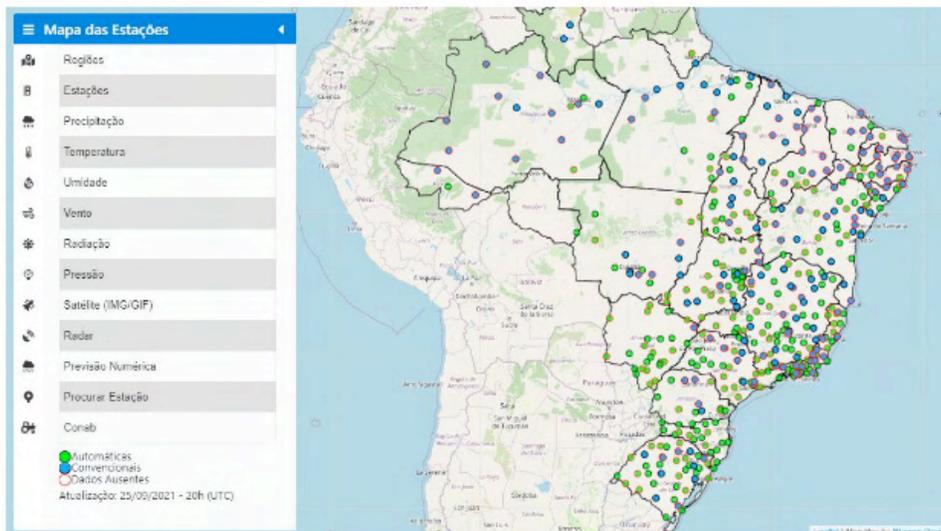


Figura 34: Estações meteorológicas do INMET ^[30].

Desse modo, conforme o banco de dados meteorológicos do INMET ^[30], já incluiu, em forma digital, em seu acervo, informações diárias coletadas desde 1961, e um projeto de recuperação digital de dados históricos se encontra em execução, que por sua vez acrescentará à base de dados meteorológicos aproximadamente 12 milhões de documentos.

BANCO DE DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR

Em seguida será abordado o conteúdo sobre o banco de dados de irradiação solar no Brasil, que também são conhecidos como dados solarimétricos e aprender como trabalhar com os valores de irradiação solar.

Os dados solarimétricos se referem a valores de irradiação solar incidente em um determinado local durante um determinado período de tempo, que são medidos por meio de instrumentos específicos em estações meteorológicas. Esses dados podem ser obtidos através de banco de dados nacionais ou *softwares* desenvolvidos por empresas do setor elétrico, grupos de pesquisas, universidades e fabricantes ou representantes de equipamentos fotovoltaicos.

Pinho e Galdino (2014, p. 85) ^[13] afirmam que a partir do histórico dessas medições, “pode-se viabilizar a instalação de sistemas fotovoltaicos em uma determinada região, garantindo o máximo aproveitamento do recurso ao longo do ano”, pois há variações da intensidade irradiação solar de acordo com a localização geográfica. Por esse motivo, conhecer do recurso solar é a variável que apresenta maior relevância para o desenvolvimento de um projeto de sistema de aproveitamento da energia solar.

Diversos são os procedimentos para levantamento do recurso solar, que podem ser medidos por Radiômetros x modelos computacionais.

- Os Radiômetros – medem a irradiância através de estações solarimétricas instaladas no solo e estes requerem instalação, distribuição espacial, manutenção, coleta de dados etc.

- Já os modelos computacionais – estimam a irradiância ou irradiação a partir de dados meteorológicos e de outros tipos. Quanto a validação dos dados obtidos por estes modelos, estes são baseados em dados medidos, obtidos de estações solarimétricas. Entretanto, o uso destes modelos está sujeito à incertezas e erros.

Por essa razão vamos utilizar o banco de dados de irradiação solar a partir da aplicação do Atlas Brasileiro de Energia Solar, documento este que utiliza as 2 formas de medição faladas a pouco, mostrado no início do capítulo. Este documento foi elaborado por um conjunto de pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), sendo parte do Projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*), o qual inclui uma série de informações englobando desde mapas e dados digitais das diversas componentes da irradiação solar, até dados detalhados de infraestrutura e parâmetros socioeconômicos dos países participantes deste projeto-piloto.

O Atlas Brasileiro de Energia Solar ^[25] contempla um banco de dados de irradiação com as médias de mais de 10 anos de coletas realizadas por estações solarimétricas no solo, utilizando o modelo de transferência radiativa BRASIL-SR, no qual fornece estimativas de irradiação solar mediante comparação com valores medidos em superfície em estações distribuídas pelo território brasileiro.

Com relação aos dados históricos e mapas solarimétricos presentes nesse documento, são referentes ao período de julho de 1995 a dezembro de 2005, na resolução espacial de 10 km x 10 km. Os dados desse mapa se referem aos valores médios das estimativas do total diário de irradiação global horizontal e irradiação incidente sobre um plano com inclinação igual à latitude do pixel em consideração.

Em seguida será mostrado os principais mapas fotovoltaicos do Brasil presentes no Atlas Brasileiro de Energia Solar. Na Figura 35 é apresentado os mapas solarimétricos de irradiação global horizontal. O mapa apresentado na esquerda se refere à irradiação global horizontal média anual no território brasileiro, enquanto os mapas da direita apresentam o comportamento mensal da irradiação.

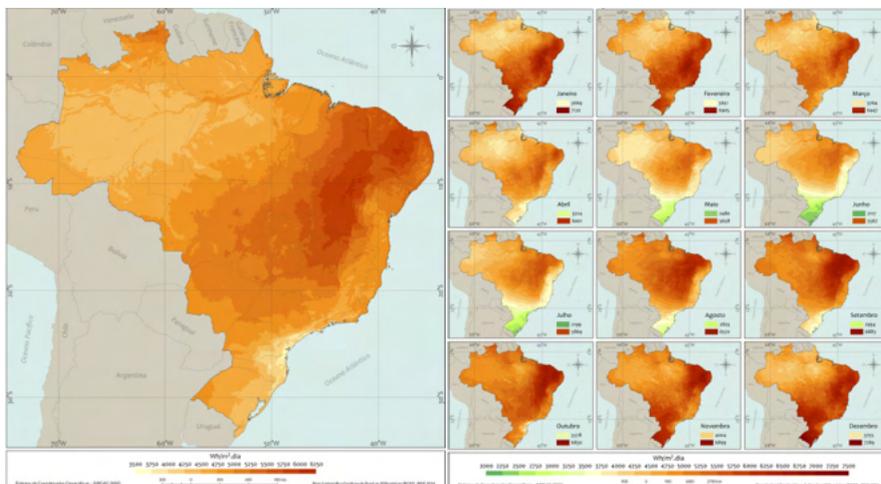


Figura 35: Mapas de irradiação global horizontal [25].

Na Figura 36 são mostrados os mapas solarimétricos referentes aos mapas solarimétricos de irradiação no plano inclinado, ou seja, inclinação igual a latitude do local, na esquerda comportamento anual e na direita a irradiação mensal.

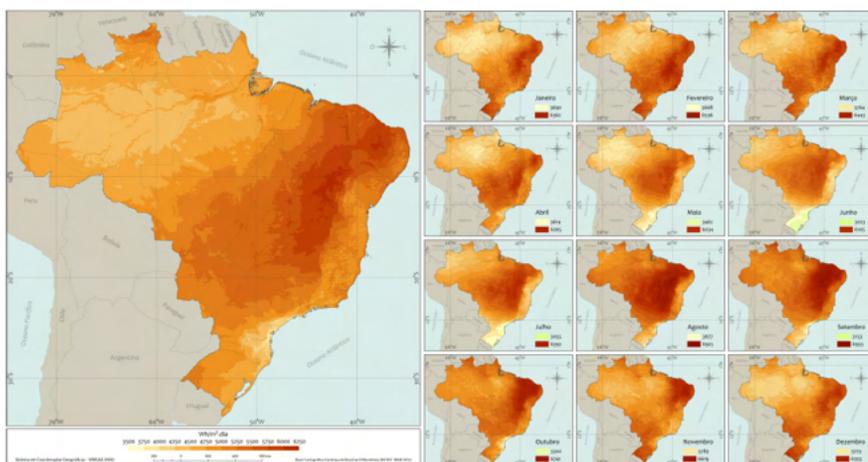


Figura 36: Mapas de irradiação no plano inclinado na latitude [25].

Os dados que este Atlas apresenta são trazidos na Tabela 2, utilizando como exemplo para a cidade de Curitiba em forma de dados digitais apresentados por meio de planilhas do Excel.

COU	LON	LAT	00_ANNU	01_JA	02_F	03_MA	04_AI	05_MJ	06_JU	07_JI	08_AU	09_SI	10_O	11_N	12_D	
4186	Brasil	-49,3490000000	-25,4005000000	4214	5313	5175	4567	3790	3046	2735	2901	3893	3864	4409	5286	5593
4187	Brasil	-49,2490000000	-25,4005000000	4194	5318	5158	4538	3782	3047	2758	2892	3864	3830	4359	5230	5557

Tabela 2: Dados de irradiação global horizontal para a cidade de Curitiba [25].

As primeiras colunas se referem às coordenadas geográficas do local, em que podem-se aplicar os filtros de Latitude e Longitude para encontrar o ponto mais próximo de sua localização. Estes dados representam a irradiação média diária global horizontal respectiva para cada mês em Wh/m².dia para Curitiba, assim como a irradiação média diária anual.

POTENCIAL FOTOVOLTAICO MUNDIAL E DO BRASIL

No último tema deste capítulo, será abordado o panorama mundial e brasileiro, onde é destacado o potencial fotovoltaico conforme o perfil da escala de irradiação solar. O primeiro mapa apresentado é referente à capacidade fotovoltaica no mundo através do mapa solarimétrico com a irradiação global horizontal, conforme Figura 37.

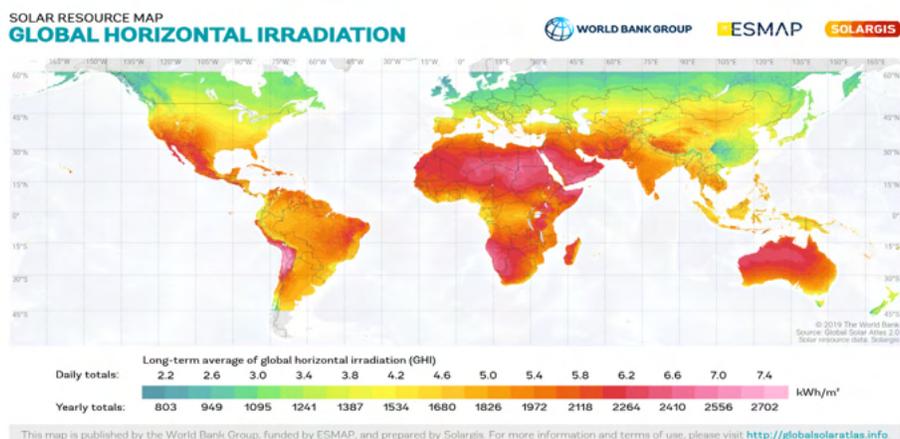


Figura 37: Irradiação global horizontal [31].

De acordo com a figura apresentada, o continente africano e a Oceania possuem a maior capacidade fotovoltaica, referentes à irradiação global horizontal, enquanto os países do Norte apresentam as menores taxas de irradiação global horizontal.

No cenário brasileiro a região Nordeste do país apresenta excelentes níveis de irradiação solar, principalmente no semiárido, enquanto a região Sul, os mais altos índices

de irradiação solar ocorrem nos meses de verão, coincidindo com o período de estiagem na região e com o período de maior demanda energética dessa parte do país [32].

Além do Atlas Brasileiro de Energia Solar, diversos municípios brasileiros têm desenvolvido seu próprio mapa solarimétrico conferindo maior detalhamento quanto à irradiação solar de sua localidade. Alguns exemplos são apresentados a seguir.

O mapa mostrado na Figura 38 se refere ao estado do Ceará lançado em 2010, reunindo dados solarimétricos de 45 anos, através de simulações numéricas realizadas para o período de 1963 a 2008.

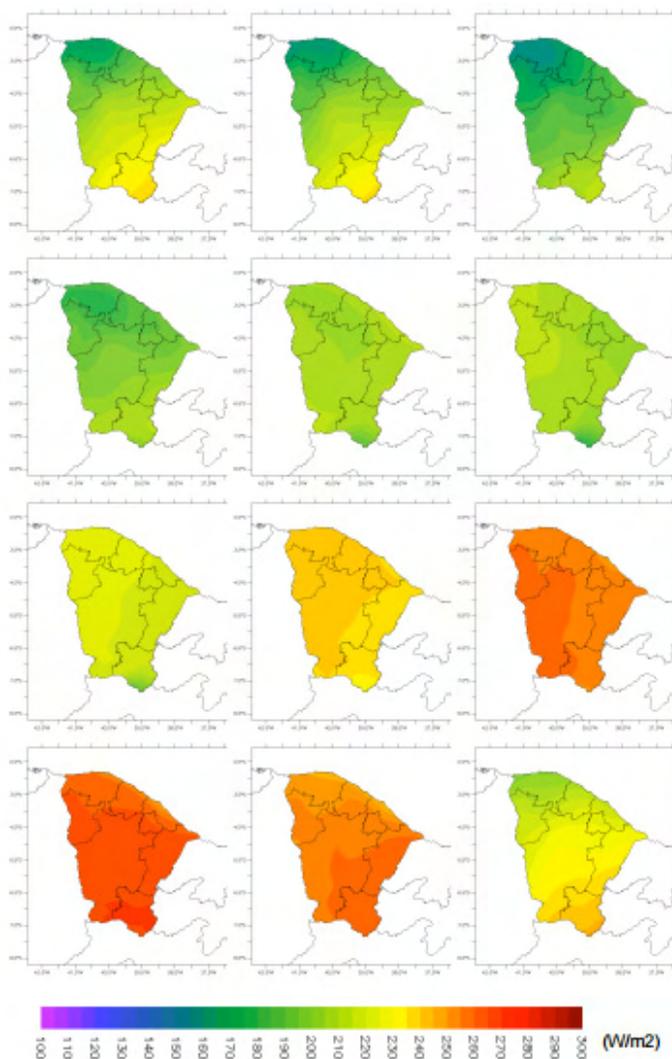


Figura 38: Atlas de energia solar do estado do Ceará [33].

O Atlas de Energia Solar do Estado do Ceará apresenta a compilação da radiação solar incidente sobre o estado, por meio de mapas climatológicos e anuais que permitem identificar a distribuição espacial e avaliar a variação sazonal da disponibilidade de energia solar [33].

O estado do Rio de Janeiro lançou seu mapa solarimétrico (Figura 39) no ano de 2016, realizado pela EGP Energia e PUC Rio [34] que demandou levantamento de dados das estações solarimétricas existentes; instalação de novas estações de monitoramento em Resende, Macaé e Xerém; geoprocessamento das informações do banco de dados etc. Além do Atlas de Energia Solar no Estado do Rio de Janeiro, existe uma ferramenta de site online voltadas para a geração distribuída.

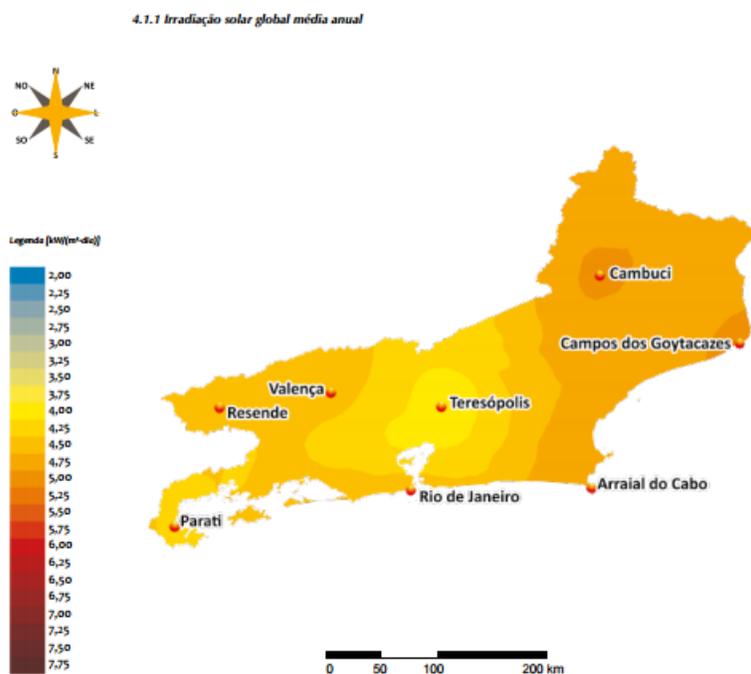


Figura 39: Atlas de Energia Solar do Estado do Rio de Janeiro [34].

Na figura do mapa de energia solar do Estado do Rio de Janeiro, nota-se que a escala de irradiação varia de 3,75 a 5,50 kW/m².dia, devido a sua localização na grande maioria a nível do mar.

No ano de 2017 houve o lançamento do Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná, ferramenta está que coloca à disposição dos usuários informações de radiação solar em qualquer ponto do Estado, permitindo que o consumidor faça simulações quanto ao SFVCR necessário para atender suas necessidades de energia elétrica [35].

O Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná contempla informações sobre irradiação no plano horizontal, direta normal, difusa, assim como a irradiação para o plano inclinado na latitude para todas as regiões do Estado com a produtividade de um sistema fotovoltaico pode obter para a região elencada. A publicação contou com a parceria entre INPE, Itaipu Binacional e Universidade Tecnológica Federal do Paraná e um dos mapas dessa publicação é mostrado na Figura 40.

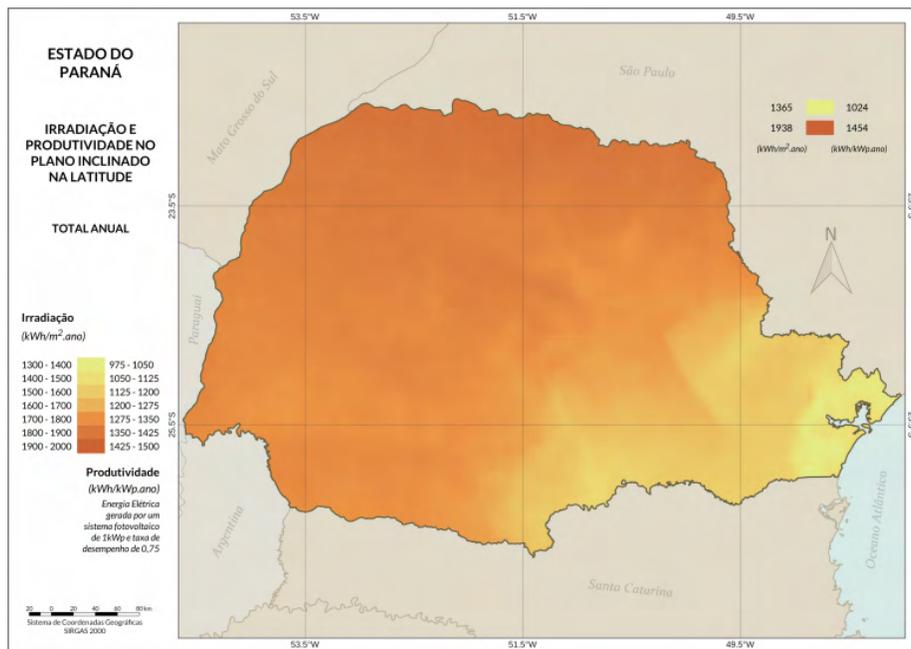


Figura 40: Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná [36].

Conforme Tiepolo *et al.*, (2017) [36], o estado do Paraná apresenta um enorme potencial existente se comparado a outros estados e regiões do Brasil e com a Europa. O nível médio de irradiação solar no estado é de 1.789 kWh/m².ano, com a maior média ocorrendo no mês de março, sendo a média do Paraná aproximadamente 43% superior à média apresentada na Alemanha, que tem índices médios de irradiação solar equivalente a 1.251 kWh/m².ano, sendo até 2014 o país com maior capacidade instalada mundial.

Com relação à produtividade estimada total anual média, considerando a inclinação do painel fotovoltaico igual à latitude local, orientação para o norte e taxa de desempenho de 75%, o Paraná apresenta produtividade equivalente a 1.342 kWh/kWp, enquanto a produtividade estimada total anual média da Alemanha é de 938 kWh/kWp [36].

FUNDAMENTOS DA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

Você já havia imaginado que a partir de cristais de silício seria possível produzir geradores de energia elétrica? Através de diversos processos químicos e industriais a matéria bruta do silício é transformada em material nobre gerando eletricidade através do efeito fotovoltaico.

Ao longo dos anos a evolução da microeletrônica foi tamanha que além da aplicação na informática, esse produto alcançou também o setor de energia elétrica. No entanto, essas pequenas lâminas de silício produzidas em processos químicos requerem muita energia em seus processos de fabricação fazendo que este ainda seja um produto custoso.

Assim, entender todo o ciclo de vida desse material é essencial para um bom projeto e conhecer fornecedores de módulos fotovoltaicos te dá oportunidade de comparar tecnologias e custos para execução de um bom projeto para você e seu cliente.

Existe um universo de tecnologias disponíveis para as mais diversas aplicações comerciais e industriais, sendo possível até mesmo a substituição de elementos arquitetônicos em fachadas em edifícios.

Neste capítulo os conhecimentos dos tipos de células fotovoltaicas serão aprofundados para que você tenha uma adequada decisão na hora do projeto fotovoltaico, conhecendo o mercado fotovoltaicos e suas tendências.

Todo projeto exige uma padronização de nomenclatura e simbologia, por isso será abordado mais sobre normas da ABNT para o setor fotovoltaico, assim como os processos produtivos das células fotovoltaicas que compõem um módulo.

CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

O primeiro tema desse capítulo é iniciado lembrando alguns dos conceitos básicos do funcionamento de uma célula fotovoltaica. A seguir é retomado a definição do efeito fotovoltaico explicado no primeiro capítulo.

O efeito fotovoltaico (Figura 41 - esquerda) se dá através da conversão direta da energia da luz utilizando o espectro visível em energia elétrica. O dispositivo que realiza essa conversão é a célula fotovoltaica (Figura 41), que é geralmente fabricada a partir de silício cristalino ou outros componentes químicos.

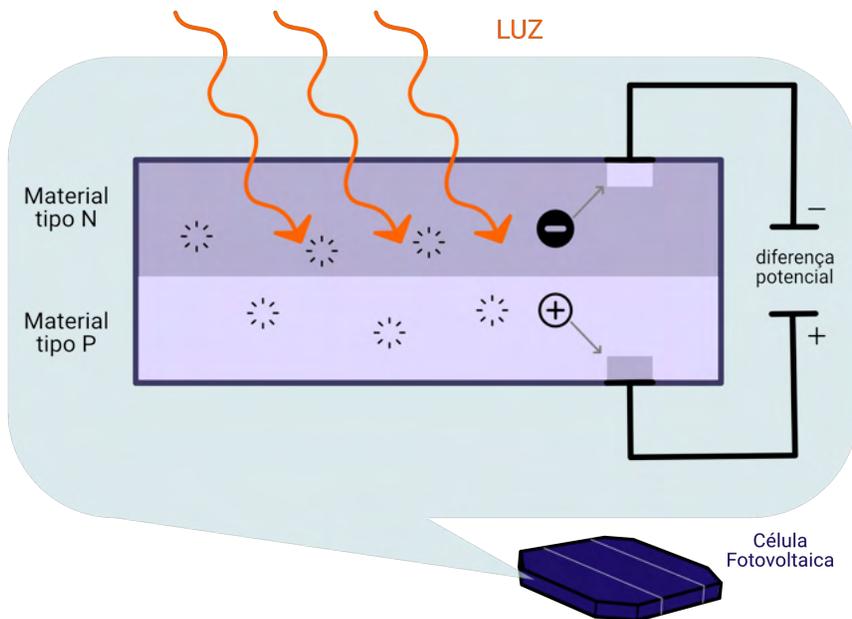


Figura 41: O efeito fotovoltaico e a célula fotovoltaica (abaixo).

Uma importante consideração que deve ser feita é que a tecnologia solar fotovoltaica é diferente da tecnologia solar térmica, que utiliza o calor através da radiação infravermelha para aquecimento.

Outra consideração importante é saber diferenciar o efeito fotoelétrico do fotovoltaico: Efeito Fotoelétrico (Figura 42):

1. É caracterizado pela emissão de elétrons para fora da superfície do material quando este é exposto à luz.
2. Os elétrons serão ejetados se a energia da radiação for maior que a energia do material.

$$E_{\text{foton}} = h \cdot f > E_{\text{material}} \quad (h \text{ constante de Planck})$$

3. Os elétrons tendem a retornar ao material.

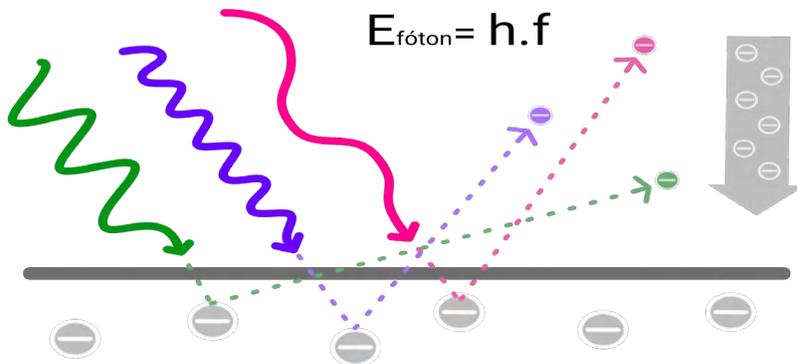


Figura 42: O efeito fotoelétrico.

Já o Efeito Fotovoltaico (Figura 41), que é o que ocorre nas células fotovoltaicas:

1. É caracterizado pela formação de uma diferença de potencial (tensão elétrica) entre os terminais de uma junção PN semicondutora quando este material é exposto à luz.

2. Os elétrons fotogerados são movidos para o material N e as lacunas aparecem no material P. A barreira de potencial mantém elétrons e lacunas afastados. Se for estabelecido um circuito externo, os elétrons poderão circular, o que caracteriza uma corrente elétrica.

Sobre as células fotovoltaicas, existem diferentes tipos de tecnologias utilizadas para a fabricação de células fotovoltaicas:

- A tecnologia tradicional que utiliza lâminas de silício cristalino se divide em silício monocristalino e policristalino:

- O Silício monocristalino (representada pelo símbolo m-Si) mostrada na Figura 43:



Figura 43: Célula de silício monocristalino.

Este tipo de silício tem um aspecto mais uniforme e apresenta uma coloração mais azul escuro devido ao seu grau de pureza.

- Já o silício policristalino (representado pelo símbolo p-Si) ou também chamado de silício multicristalino mostrada na Figura 44:



Figura 44: Célula de silício policristalino.

Este tipo de silício apresenta uma coloração mais azul claro que o monocristal e variações quanto a uniformidade dos cristais aplicados na sua produção.

Cabe ressaltar que cerca de 90% da produção mundial de módulos é baseada no

silício cristalino (m-Si e p-Si).

• Outro material aplicado é a tecnologia de filmes finos de silício (Figura 45) ou outros materiais – que geralmente são depositados sobre substratos rígidos ou flexíveis.



Figura 45: Célula de filme fino ^[37].

Os filmes finos apresentam a característica de serem flexíveis o que lhes abrem uma enorme gama de aplicações.

Essa tecnologia pode ser constituída pelos seguintes materiais:

- Silício amorfo ou silício amorfo hidrogenado (a-Si)
- Telureto de cádmio (CdTe)
- Disseleneto de cobre e índio (CIS)
- Disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS)
- Silício micromorfo ou microcristalino ($\mu\text{Si/a-Si}$)
- Arsenieto de gálio (GaAs)

As mais recentes tecnologias ainda em fase de desenvolvimento são as células orgânicas (Figura 46), tipo de célula solar de polímero que usa a eletrônica orgânica, utilizando o processo industrial (*roll to roll*) de impressão de células fotovoltaicas orgânicas em substrato leve, flexível e transparente.

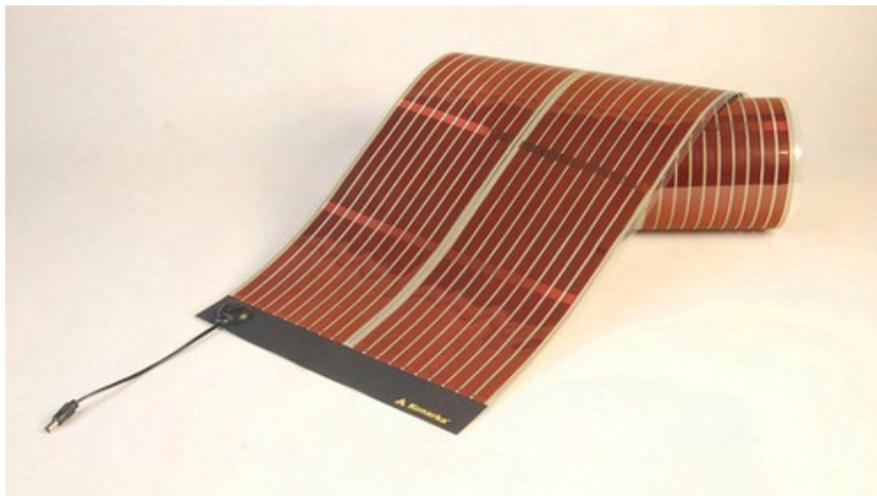


Figura 46: Célula orgânica ^[38].

Quanto a aplicação de cada tipo de célula é muito variável conforme as premissas de projeto, pois a eficiência para cada tipo de célula é bastante variável e será explicado mais adiante.

ELEMENTOS FOTOVOLTAICOS E SEU FUNCIONAMENTO

Muito já foi abordado sobre células fotovoltaicas, módulos e painéis não é mesmo? Para evitar confundir estes elementos são esclarecidas diferenças entre estes elementos e é destacado seu funcionamento em seguida.

Todas as definições a seguir você encontra na **Norma Brasileira: ABNT – NBR 10899: 2006 Energia solar fotovoltaica – Terminologia** ^[39]

- Célula fotovoltaica - dispositivo elementar especificamente desenvolvido para realizar a conversão direta de energia solar em energia elétrica.
- Módulo fotovoltaico - Unidade básica formada por um conjunto de células solares, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica.



Representação esquemática de um módulo fotovoltaico.
O triângulo indica o polo positivo.

- Painel fotovoltaico - Um ou mais módulos fotovoltaicos interligados eletricamente, montados de modo a formar uma única estrutura.

Na Figura 47 a seguir são destacadas as diferenças entre cada elemento fotovoltaico para poder utilizar a terminologia correta em projetos fotovoltaicos.



Figura 47: Hierarquia fotovoltaica [23].

A seguir é definido com maior profundidade como é o funcionamento de uma célula fotovoltaica de silício.

- Uma célula fotovoltaica é, essencialmente, uma junção PN dimensionada e otimizada para transformar radiação solar diretamente em eletricidade.

- A tensão da barreira de potencial da junção, V_B ($V_{\text{built in}}$), tenderá a impedir a recombinação de portadores gerados pela radiação incidente, os quais poderão ser utilizados no circuito externo.

- Mesmo com a presença do campo elétrico interno (V_B) ainda ocorrerá alguma recombinação, no interior e na superfície da célula. No entanto, a maior parte dos pares elétron-lacuna será separada, gerando a corrente elétrica para o circuito externo.

- A célula fotovoltaica típica é uma lâmina de silício (espessura de $180\mu\text{m}$ a $250\mu\text{m}$), dopada com impureza trivalente, que dá origem ao material tipo P.

- Nesta lâmina se faz a difusão de impureza pentavalente (p. ex. fósforo), obtendo-se uma região tipo N, com espessura típica de $\sim 0.5\mu\text{m}$ mostrado na Figura 48.

Assim forma-se uma junção PN surgindo a barreira de potencial (V_B).

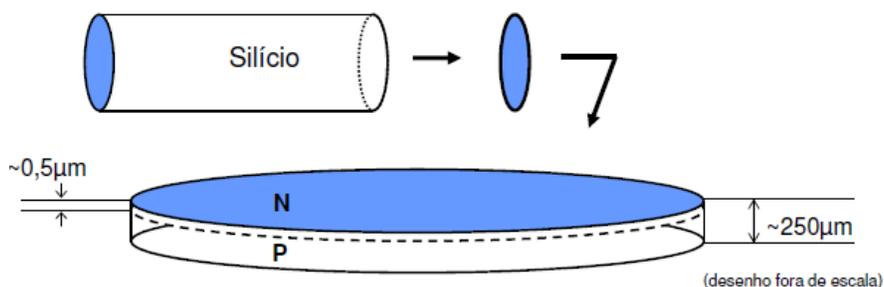


Figura 48: Representação da lâmina de silício do material tipo PN ^[19].

- Os fótons (Figura 49) que penetram na célula e têm energia superior à banda proibida, poderão ser absorvidos por elétrons da banda de valência, os quais passarão à banda de condução, gerando assim um par elétron-lacuna.

- Os elétrons foto gerados estarão disponíveis no material N e deverão ser coletados para constituir a corrente elétrica fornecida pela célula.

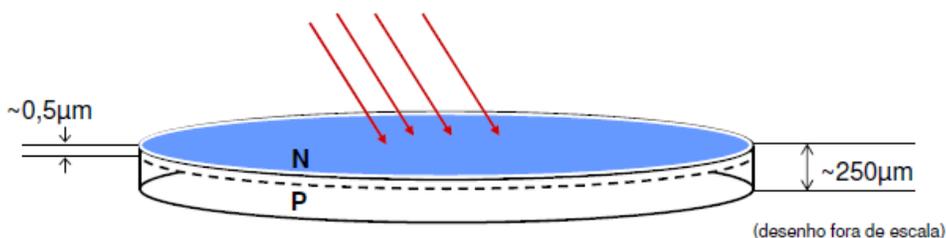


Figura 49: Fótons incidentes na camada N da célula fotovoltaica ^[19].

- Os fótons não absorvidos sairão novamente ao exterior pela face não iluminada e, como os refletidos, não serão úteis para a fotogeração.

- A célula possui uma camada antirefletora (ARC), aplicada sobre a face iluminada, destinada a reduzir a reflexão e aumentar a eficiência (Figura 50).
- A grade metálica na superfície frontal é destinada a coletar os elétrons foto gerados no polo negativo (Figura 50).
- Na superfície traseira existe um contato metálico destinado a retornar os elétrons que deixaram a superfície frontal no polo positivo (Figura 50).

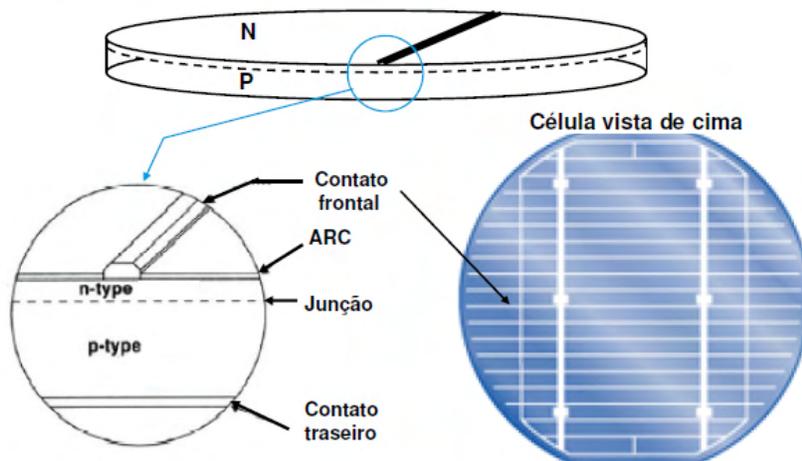


Figura 50: Detalhes da constituição de uma célula fotovoltaica ^[19].

- A região de separação entre os materiais P e N é denominada junção PN.
- Ao ser formada a junção PN, surge a barreira de potencial (V_B) com tensão de aproximadamente 0,6 V ($\sim 0,58 - 0,62$ V), conforme mostrado na Figura 51.

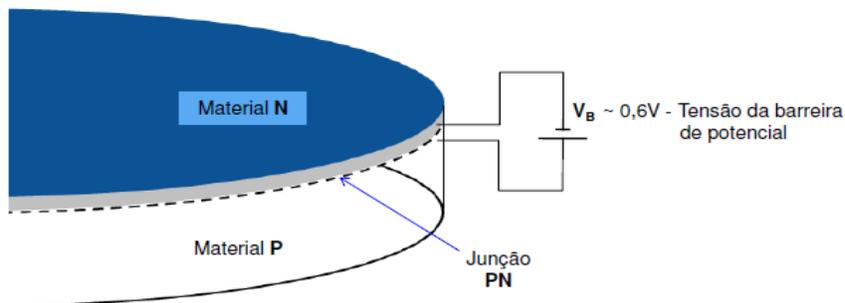


Figura 51: Esquemático da barreira de potencial na junção PN da célula fotovoltaica ^[19].

- A tensão da barreira de potencial (V_B) tenderá a impedir a recombinação dos portadores gerados pela radiação incidente, que ficarão disponíveis para constituir a corrente elétrica externa.
- A corrente fornecida pela célula é proporcional à área exposta à radiação.
- Os elétrons foto gerados estarão disponíveis no material N e deverão ser coletados para constituir a corrente elétrica fornecida pela célula (Figura 52).
- Os fótons não absorvidos sairão novamente para o exterior pela face não iluminada e, como os refletidos, não serão úteis para a fotogeração (Figura 41).

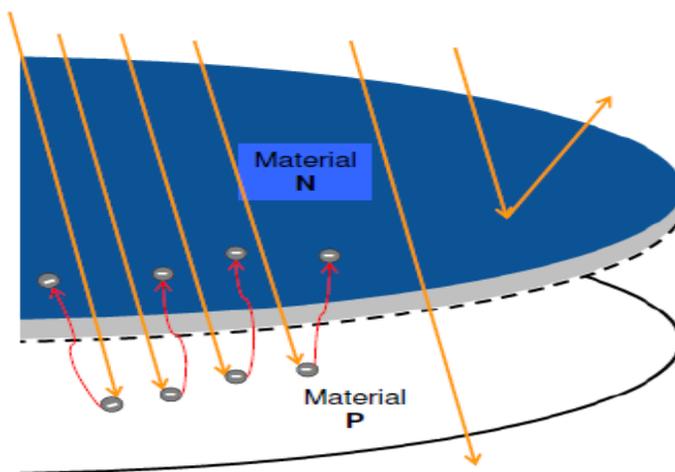


Figura 52: Elétrons sendo absorvidos pelo material N gerando corrente elétrica ^[19].

- Mesmo com a presença do campo elétrico interno (V_B) ainda ocorrerá alguma recombinação no interior e na superfície da célula.

No entanto, a maior parte dos pares elétron-lacuna será separada, possibilitando circular corrente no circuito externo.

PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Neste próximo tema serão abordados os processos de produção de células fotovoltaicas de silício cristalino que dependendo do método utilizado na fabricação, haverá maior eficiência de conversão de energia elétrica que ocorre no interior das células.

Na Figura 53 é demonstrado os dois diferentes procedimentos para obter células de silício cristalino. O primeiro método representado em azul escuro mostra o caminho que o silício deve percorrer para se tornar uma célula de silício monocristalino.

O silício monocristalino é obtido através do processo de *Czochralsky*, o qual é um método de cultura de cristais usado para a produção industrial de monocristais de uma diversidade de materiais cristalinos para os quais se pretende elevada pureza e cristais isentos de defeitos ^[40].

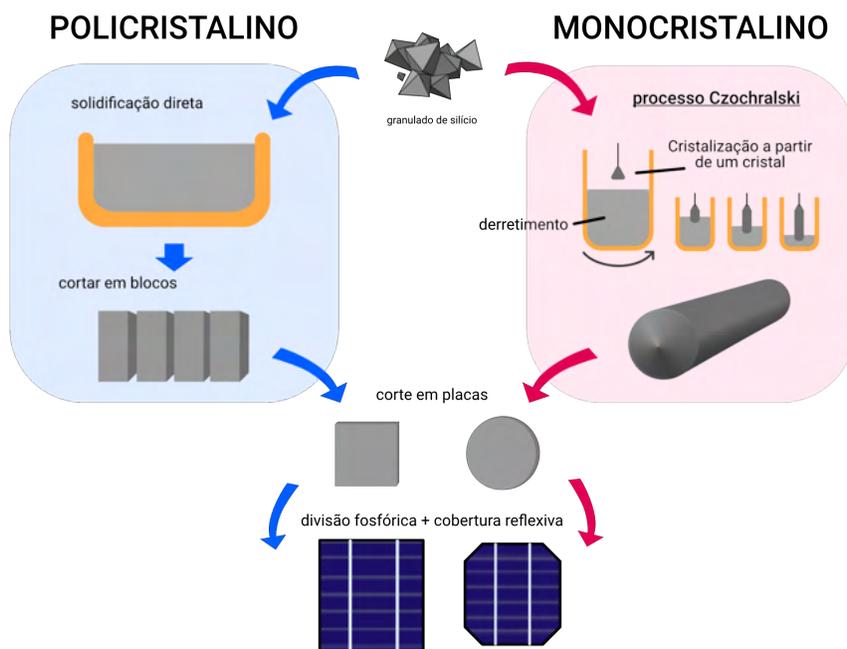


Figura 53: Processos de obtenção das células de silício cristalino.

Na produção do silício policristalino, o processo utilizado é a fundição dos cristais em um bloco, preservando desta forma a formação de múltiplos cristais, que quando este bloco é cortado e fatiado, é possível observar esta formação múltipla de cristais se diferenciando visivelmente do silício monocristalino.

Tanto o silício monocristalino como o policristalino uma vez fundido, eles são serrados em blocos quadrados e, em seguida, fatiados em células. Durante esta fase estas duas tecnologias apresentam semelhanças aos de um único cristal (monocristalino) tanto no desempenho como na degradação ^[41].

Na Figura 54 são mostrados os lingotes de silício monocristalino obtidos pelo processo *Czochralsky* e o bloco de silício policristalino obtido no processo de fundição.

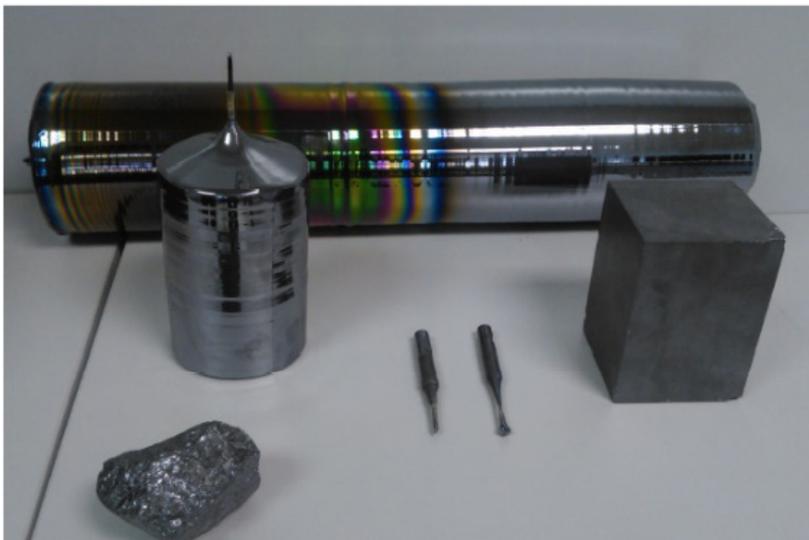


Figura 54: Lingotes e bloco de silício mono e policristalino [19].

Cabe ressaltar que o processo *Czochralsky* apresenta um processo de produção robusto e custoso, onde requer mais uso de energia do que na produção do silício policristalino, gerando mais resíduos na sua fabricação conforme mostrado na Figura 55.

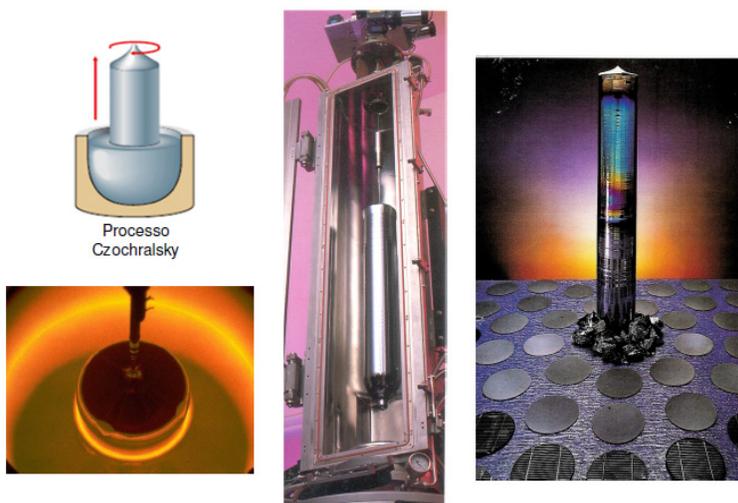


Figura 55: Equipamentos e resíduos empregados no processo Czochralsky [19].

Para ambos os silícios é necessário seguir os seguintes procedimentos após a obtenção dos blocos descritas na Figura 56.

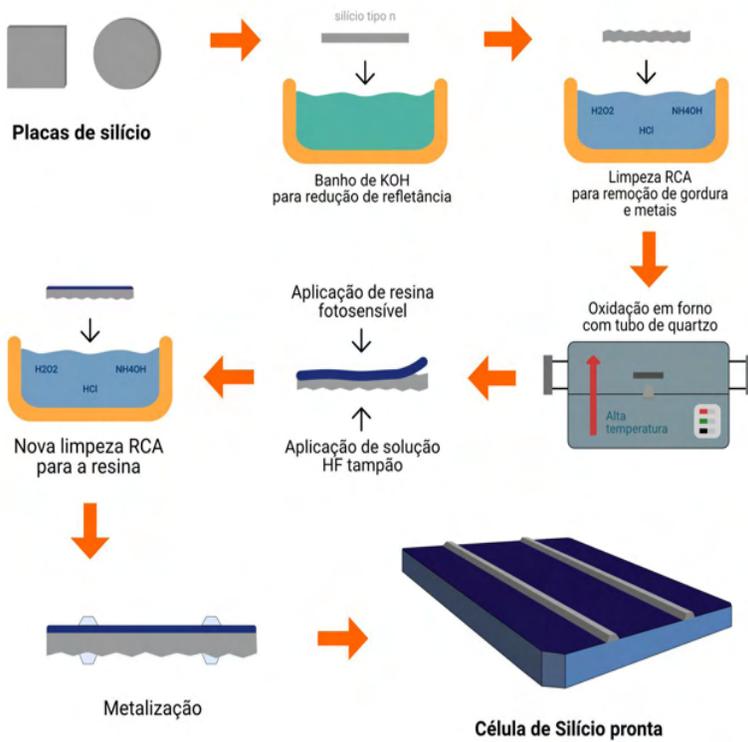


Figura 56: Etapas do processo de fabricação da célula de silício cristalino.

Etapas do processo de fabricação de células de silício:

- Lâmina de silício tipo P - Deposição da camada AR
- Eliminação de danos de serragem - Impressão do contato frontal
- Texturização - Impressão do contato traseiro
- Dopagem com fósforo tipo N
- Fusão dos contatos
- Isolação das bordas - Teste e seleção ^[42]

Na Figura 57 é mostrado o caminho simplificado que o silício percorre até se transformar em uma célula fotovoltaica, para então compor um módulo fotovoltaico.

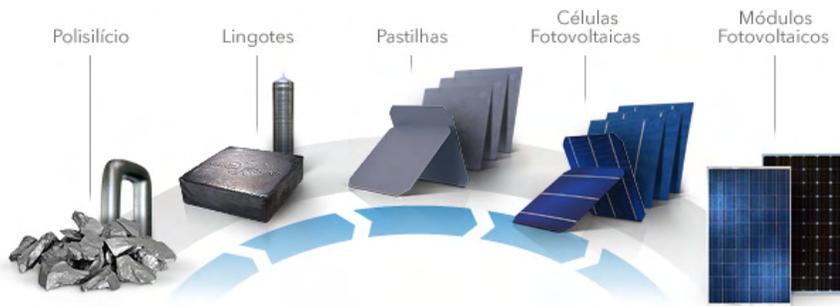


Figura 57: Ciclo de vida do silício cristalino até compor um módulo fotovoltaico ^[43].

Já para obtenção dos filmes finos de silício ou outros componentes, utiliza-se o processo conhecido como técnica de LPCVD (sigla do inglês - *Low Pressure Chemical Vapor Deposition*) tem sido a mais utilizada para a deposição de silício, inclusive em processos industriais, uma vez que apresenta vantagens importantes como a possibilidade de produção em larga escala, elevado tamanho de grão e simplicidade tecnológica ^[44].

Após toda a explicação desses processos é notório entender motivo de os módulos fotovoltaicos ainda serem custosos, não é mesmo? A razão para isso é explicada devido ao ciclo de vida do silício bruto, que até chegar à composição dos módulos fotovoltaicos, depende muita energia em sua fabricação, além dos processos químicos essenciais para garantir sua condutividade no processo de conversão de energia elétrica na fotogeração.

O MÓDULO FOTOVOLTAICO

O último tema desse capítulo se refere a uma introdução ao módulo fotovoltaico que é responsável pela geração de energia fotovoltaico através do efeito fotovoltaico explicados anteriormente.

Um módulo fotovoltaico é composto de um conjunto de células dispostas sobre uma estrutura rígida e interligadas eletricamente. Geralmente as células são ligadas em série para produzir tensões maiores, conforme mostrado na Figura 58.

Na sua parte posterior, há uma caixa de conexões elétricas, para a ligação dos cabos elétricos fornecidos junto com o módulo. Os cabos possuem conectores padronizados, permitindo a rápida conexão de módulos em série ^[17].

Entretanto, uma importante observação deve ser feita quanto às conexões em série no que se refere ao sombreamento individual de células FV. Quando eventualmente uma destas for sombreada, o desempenho daquela célula será reduzido.

Por outro lado, se outro módulo não sombreado é ligado em paralelo, o primeiro resultará em aquecimento da célula sombreada, o que pode ser resolvido com a instalação

de diodos *bypass*, protegendo contrafluxos de corrente para uma ou mais células fotovoltaicas no módulo ^[45].

Além de compor a associação de células, o módulo tem ainda a função de proteger as células das intempéries, isolá-las eletricamente de contatos exteriores e fornecer rigidez mecânica ao conjunto. O módulo FV, conforme mostrado na Figura 59, é constituído por um vidro temperado e antirreflexivo para a cobertura frontal, por um material encapsulante transparente e isolante (EVA- acetato de vinil-etila), pelas células FV, as quais são ligadas entre si por pequenas tiras metálicas fornecendo contatos externos de saída. Em sua parte posterior, encontra-se uma cobertura, geralmente constituída de polifluoreto de vinila, por uma estrutura metálica que suporta todo o equipamento e por uma caixa de conexões elétricas, como já mencionado anteriormente ^[16].

No entanto, um módulo pode somente produzir limitados índices de energia, não sendo suficientes para alimentar circuitos elétricos de edificações residenciais e comerciais, e por esse motivo os módulos são conectados em arranjos, agrupados de forma que podem fornecer maiores tensões e correntes sendo este arranjo denominado de painel FV ^{[45][46]}.

Messenger e Ventre (2010) ^[45] afirmam que quando os módulos são conectados em série geralmente resultam em altas tensões, enquanto conexão de módulos em paralelo resulta em altas correntes. Portanto, a configuração do arranjo FV visa adequar o desempenho do sistema de acordo com as características de entrada de cada inversor. Este equipamento é utilizado nos SFVCR, converte a corrente contínua (CC) originada dos módulos em corrente alternada (CA) que será visto nas próximas secções ^[15].

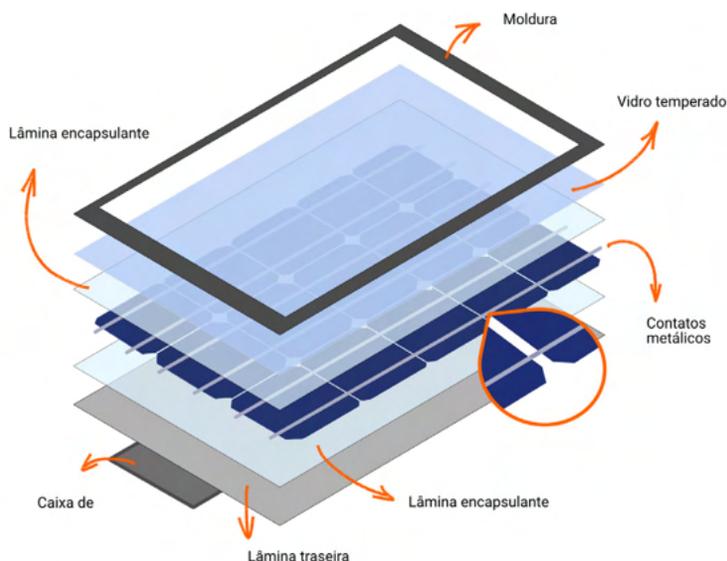


Figura 58: Componentes do modulo fotovoltaico.

Os módulos fotovoltaicos podem ser encontrados dos mais variados tamanhos conforme sua potência. Além disso, é possível encontrar em diferentes cores atualmente utilizados para revestimento arquitetônico conforme Figura 59.

Quanto à aplicação podemos empregar os módulos fotovoltaicos, sendo que podem ser aplicados nos telhados e coberturas nas edificações, conhecidos como BAPV (Sigla do inglês para *Building Applied Photovoltaic System*).

Os sistemas BIPV além de gerar eletricidade, também podem fornecer funcionalidades adicionais para o edifício, como por exemplo, proteção contra os raios do sol, isolamento térmico, proteção contra a chuva, sombreamento parcial de áreas, substituição de telhas etc. ^[41].

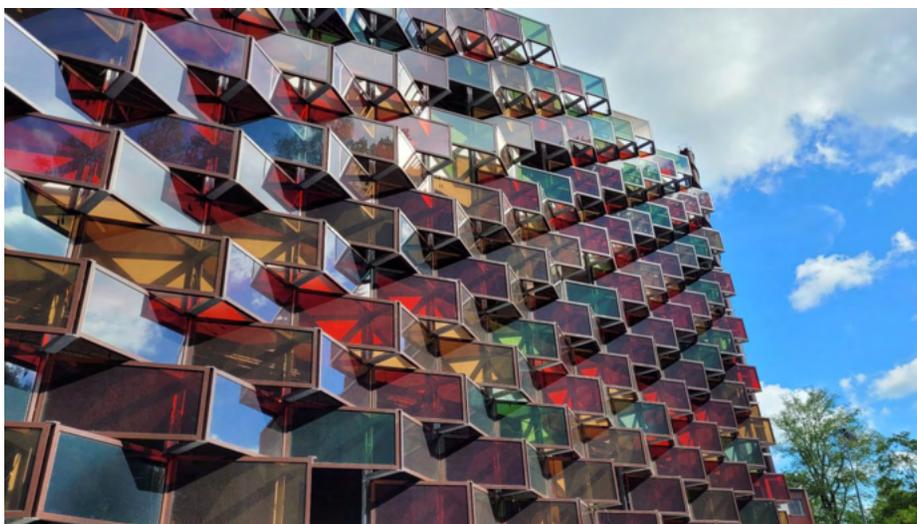


Figura 59: Módulos fotovoltaicos integrando elementos de fachada em um edifício ^[47].

Mas como vista na imagem anterior, também é possível empregá-lo na construção substituindo outros materiais como janelas ou coberturas de estacionamento é conhecido como BIPV (*Building Integrated Photovoltaic System*).

Enfim, existe um universo de aplicações que pode ser feita utilizando os módulos fotovoltaicos tanto de silício cristalino como os filmes finos, e abordaremos mais esse assunto nos próximos capítulos.

CARACTERÍSTICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Você se lembra dos variados tipos de células fotovoltaicas explicados no capítulo anterior? Estas células podem ser aplicadas nos módulos fotovoltaicos que quando ligados em um painel geram energia elétrica nas mais variadas condições de operação.

Dentro do universo fotovoltaico onde foi iniciado pela primeira e segunda geração de tecnologias tradicionais, sendo composto por silício mono e policristalino, é essencial entender as características de cada tecnologia. A terceira geração de tecnologia fotovoltaica é composta pelos filmes finos que são derivados de compostos químicos menos abundantes da superfície da terra.

Cada material que compõem uma célula e posteriormente integram um módulo fotovoltaico, apresentam propriedades bem definidas quanto a sua eficiência de conversão, resposta espectral diferentes conforme o comprimento da onda e efeitos sobre altas temperaturas. E evidentemente toda tecnologia apresenta prós e contras na sua aplicação.

Para que os consumidores possam comparar e decidir na escolha de uma tecnologia, existe uma folha de dados de resultados de testes que foram padronizados por órgãos competentes, no caso do Brasil o Instituto de Metrologia (INMETRO) ^[48]. Nesta folha de dados é possível encontrar muitas informações elétricas, mecânicas, térmicas e operacionais garantindo confiabilidade ao produto.

Neste capítulo será definido os termos presentes na folha de dados encontrada nos módulos fotovoltaicos como: condições Standard Test Conditions (STC); AM (sigla do inglês para *Air Mass*); tensão de circuito aberto; corrente de curto-circuito e curvas IxV (TensãoxCorrente) diversas. Estes parâmetros são primordiais ao projetista ao longo do projeto, pois aumenta o leque de opções possibilitando a melhor tomada de decisões mediante a necessidades do cliente.

Muitos termos técnicos não é mesmo? Não se preocupe, pois o objetivo deste tema é se familiarizar com estes termos e começar a agregar ao vocabulário técnico dos projetistas.

MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO CRISTALINO

O tema é iniciado apresentando os diferentes tipos de módulos fotovoltaicos, principalmente os de silício cristalino, assim destacando sua eficiência de conversão e suas variadas aplicações. Um módulo fotovoltaico é composto de um conjunto de células dispostas sobre uma estrutura rígida e interligadas eletricamente e é onde ocorre a fotogeração através do fenômeno do efeito fotovoltaico.

A fotogeração se baseia em 3 fenômenos físicos principais que são eles:

- A absorção da radiação pelo dispositivo e geração de pares elétron-lacuna;

- A movimentação, internamente no dispositivo, dos portadores gerados;
- E a separação dos portadores gerados por meio de um campo elétrico interno ao dispositivo → gerando uma barreira de potencial (V_B)

Em síntese esses 3 fenômenos ocorrem na junção PN da célula fotovoltaica (Figura 60).



Figura 60: A célula de silício cristalino ^[19].

É possível fabricar esses conjuntos de células fotovoltaicas a partir dos mais diferentes componentes químicos como silício cristalino, caracterizando a tecnologia tradicional, ou em filmes finos que são geralmente aplicados em substratos rígidos e flexíveis, as quais constituem um módulo fotovoltaico.

A seguir será abordado sobre as características da tecnologia tradicional dos módulos fotovoltaicos de silício cristalino destacando sua eficiência de conversão, as vantagens e desvantagens de cada tecnologia.

Módulo de silício monocristalino (m-Si)

A utilização dos módulos de silício monocristalino merece um destaque especial por ser a tecnologia antecessora empregada na conversão fotovoltaica. No entanto, devido ao processo de fabricação o qual utiliza um único cristal de silício ultrapuro, esta tecnologia é a mais custosa dentre as tecnologias fotovoltaicas.

Por isso, é possível reconhecer facilmente as diferenças entre este módulo e o de silício policristalino, pois apresentam uma cor uniforme, indicando silício de alta pureza e cantos tipicamente arredondados conforme mostrado na Figura 61.

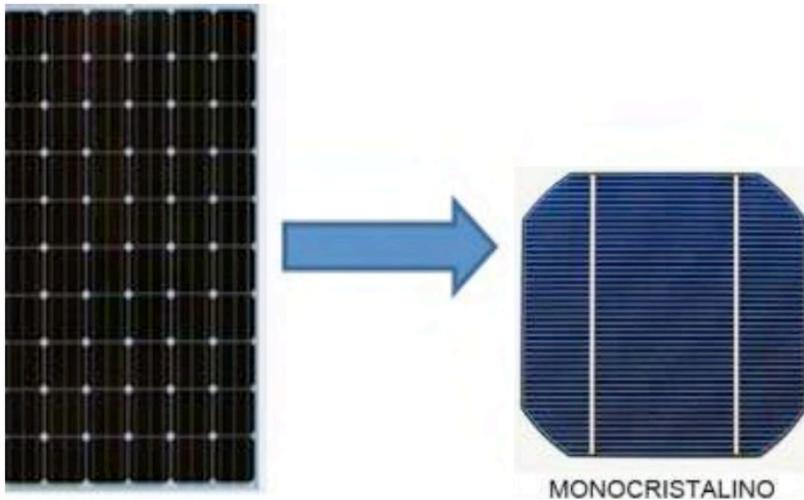


Figura 61: Módulo de silício monocristalino.

Estes módulos são fabricados a partir de um único cristal de silício ultrapuro, (lingotes de silício de forma cilíndrica), este é fatiado como um “salame” fazendo assim lâminas de silício individuais, que são então tratadas e transformadas em células fotovoltaicas. Cada célula fotovoltaica circular tem seus “4 lados” cortados fora a fora para otimizar o espaço disponível no painel solar monocristalino e aproveitar melhor a área do painel. O painel solar é composto por uma matriz de células fotovoltaicas em formações de série e paralelo [41].

Estudos apontam que a eficiência comercial média de um módulo de silício monocristalino é de 18%. O processo de produção utilizado é o *Czochralski* conferindo uma forma arredondada aos lingotes de silício, posteriormente apresentando uma coloração azul escuro ou quase preto (com antirreflexo), cinza ou azul acinzentado (sem antirreflexo) [17].

Vantagens:

- Módulos fotovoltaicos de silício monocristalino ocupam menos espaço, devido a maior eficiência, uma vez que estes necessitam de menos espaço para gerar a mesma quantidade de energia elétrica.
- A vida útil dos módulos monocristalinos é maior que 30 anos e eles vem com garantia de 25 anos.
- Tendem a funcionar melhor do que módulos policristalinos em condições de pouca luz.

Desvantagens:

- Módulos monocristalinos são o mais custoso, ficando a critério do projetista analisar qual a melhor escolha dependendo da área disponível.
- O processo *Czochralski* usado para produzir silício monocristalino resulta em grandes lingotes cilíndricos, resultando uma quantidade significativa do silício não é aproveitada naquela célula e precisa ser reciclado.

Módulo de silício policristalino (m-Si)

Os módulos de silício policristalino foram introduzidos no mercado em 1981 e apresentam a principal diferença entre módulos de silício policristalino com relação ao método de fabricação empregado. Este método é o processo de fundição dos cristais, onde cristais de silício são fundidos em um bloco, preservando desta forma a formação de múltiplos cristais. Quando este bloco é cortado e fatiado, é possível observar esta formação múltipla de cristais, conforme mostrado na Figura 62.

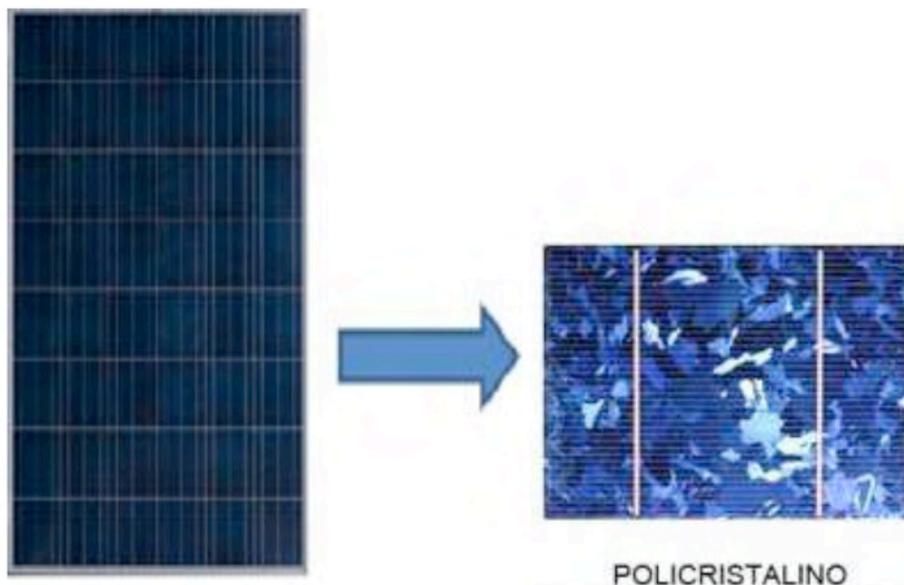


Figura 62: Módulo de silício policristalino.

Quanto a sua eficiência na conversão é em média de 15%, que após serem fundidos e aquecidos em forma quadrada, recebem uma coloração azul (com antirreflexo), cinza prateado (sem antirreflexo).

Vantagens:

- A quantidade de silício residual gerado durante o processo de corte das células fotovoltaicas é menor em comparação com monocristalino.
- Painéis policristalinos tendem a ser um pouco mais baratos que os painéis solares monocristalinos.
- A vida útil dos painéis policristalinos é maior que 30 anos e eles vem com garantia de 25 anos.

Desvantagens:

- A eficiência de módulos fotovoltaicos policristalinos é reduzida comparada ao silício monocristalino, devido, a menor pureza do polisilício.
- Menor energia por m², necessitando assim de uma área maior de alocação para gerar a mesma quantidade de Watts/m² que o painel monocristalino.

MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE FILMES FINOS

Agora será apresentado a tecnologia dos módulos fotovoltaicos de filmes finos (Figura 63), os quais apresentam sua principal característica quanto a sua aplicação, podendo ser em substratos rígidos ou flexíveis. Essa tecnologia também é conhecida como células fotovoltaicas de película fina (TFPV), podendo ser constituído dos seguintes materiais:

- Silício amorfo (a-Si)
- Telureto de cádmio (CdTe)
- Disseleneto de cobre e índio (CIS)
- Disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS)
- Silício micromorfo ($\mu\text{cSi/a-Si}$)
- Arsenieto de gálio (GaAs)
- Célula fotovoltaica orgânica



Figura 63: Célula de filme fino ^[49].

As principais características dos módulos de filmes finos são definidas a seguir:

- Utilizam pouca matéria prima quando fabricadas a partir de:
 - c-Si - 250 μ m (0,25mm) de espessura
 - a-Si - 1 μ m (0,001mm) de espessura
- Os substratos podem ser aplicados em superfícies rígidas (vidro) ou flexíveis (aço inoxidável), ou em superfícies planas, curvos, transparentes.
- Essa característica apresentada confere a esse material uma boa aparência estética, podendo substituir elementos arquitetônicos; sendo que os módulos semitransparentes responde bem à luz natural;
- A integração monolítica entre células conferem que essas células de multijunção apresentem uma tensão de circuito aberto (V_{oc}) elevada;
- Os processos de processo são automatizados garantindo o baixo custo de produção, se produzidos em grande escala.

A seguir será apresentado a descrição sobre cada material:

Módulo de silício amorfo (a-Si)

Devido a produção de energia elétrica ser baixa nesta tecnologia, as células fotovoltaicas baseadas em silício amorfo (Figura 64), tradicionalmente, só tinham sido usadas para aplicações de pequena escala. Ex: calculadoras de bolso. No entanto, as inovações recentes permitiram que esta tecnologia seja utilizada também em aplicações de larga escala.

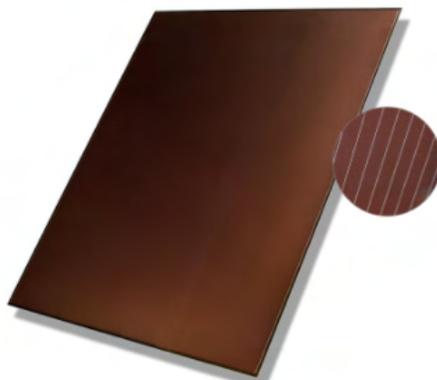


Figura 64: Módulo de silício amorfo.

A partir de uma técnica de fabricação chamada de “empilhamento”, várias camadas de células de silício amorfo podem ser combinadas, resultando em taxas mais elevadas de eficiência (tipicamente cerca de 6-9%). Somente 1% do silício utilizado em células de silício cristalino é necessário nas células solares de silício amorfo [41].

Módulo de Telureto de Cádmio (CdTe)

A tecnologia de telureto de cádmio (Figura 65) é a única tecnologia de painéis solares de película fina que superou o custo/eficiência de painéis fotovoltaicos de silício cristalino em uma parcela significativa do mercado mundial de painéis solares.



Figura 65: Módulo de telureto de cádmio.

A eficiência de módulos fotovoltaicos com base na tecnologia de telureto de cádmio

são muitos similares aos de silício cristalino podendo chegar a 17%. A aplicação desta tecnologia é geralmente utilizada em grande escala presente nas usinas fotovoltaicas.

Módulo de disseleneto de cobre, índio e gálio (CIS, CIGS)

A produção comercial de módulos fotovoltaicos CIGS flexível (Figura 66) foi iniciado na Alemanha em 2011. Em comparação com as outras tecnologias de filme-fino acima, as células solares CIGS mostraram o maior potencial em termos de eficiência, contendo menor quantidade do cádmio (material tóxico que é encontrado em células solares de CdTe).



Figura 66: Módulo CIGS.

Os índices de eficiência para painéis solares CIGS normalmente operam na faixa de 10-12% e já existem alguns sendo vendidos no Brasil passando dos 13%.

Módulo de células orgânicas (OPV)

As mais recentes tecnologias ainda em fase de desenvolvimento são as células orgânicas (Figura 67), tipo de célula solar de polímero que usa a eletrônica orgânica, utilizando o processo industrial (*roll to roll*) de impressão de células fotovoltaicas orgânicas em substrato leve, flexível e transparente.

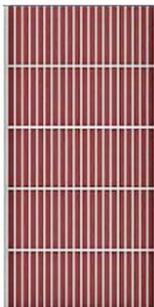


Figura 67: Módulo de células orgânicas.

A célula solar de polímero orgânico foi idealizada há muitos anos como uma tecnologia fotovoltaica flexível, de baixo custo, feita utilizando processos de impressão, máquinas simples e materiais abundantes. Eles utilizam um processo industrial (*roll to roll*) de impressão de células fotovoltaicas orgânicas em substrato leve, flexível e transparente. As eficiências das células orgânicas variam.

Vantagens dos filmes finos:

- A produção em massa é simples em comparação com a tecnologia cristalina. Isto os torna potencialmente mais baratos de fabricar do que as células de silício cristalino.
- Sua aparência homogênea é esteticamente bonita.
- Pode ser feito flexível, o que abre um leque de aplicações muito grande.
- Altas temperaturas e sombreamento de árvores e outras obstruções tem menos impacto sobre o desempenho do painel solar de filme fino.

Desvantagens dos filmes finos:

- Módulos de filme fino não são, em geral, utilizados na maioria das instalações de sistemas fotovoltaicos residenciais. Eles são baratos, mas eles também exigem uma grande quantidade de espaço.
- Menos eficiência por m² significa que o seu custo com estrutura de instalação, mão-de-obra e cabeamento tende a aumentar.
- Painéis solares de filme fino tendem a degradar mais rapidamente do que os painéis solares monos e policristalinos, e é por isso que eles geralmente vêm com uma garantia mais curta.

CURVAS E PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS

Toda vez que você precisar pesquisar características dos módulos fotovoltaicos é possível encontrá-las na folha de dados, a qual chamamos de *datasheet* que geralmente se encontra disponível no portal dos fabricantes de módulos fotovoltaicos.

Termos como: condições STC; AM (sigla do inglês para *Air Mass*); tensão de circuito aberto; corrente de curto-circuito e curvas IxV (TensãoxCorrente) diversas serão necessárias para a escolha do projetista ao longo do projeto.

Então neste tema será falado mais sobre estes termos e saber quando utilizar. Todas as definições a seguir você encontra na legislação do INMETRO ^[48] para ensaio de módulos fotovoltaicos.

Parâmetros Característicos:

- **Condições-padrão para ensaio - STC - “Standard Test Conditions”** - Visa determinar as características elétricas do módulo nas seguintes condições

- Temperatura de junção da célula: 25°C
- Irradiância total: 1000W/m², normal à superfície de ensaio
- Espectro solar para AM 1,5

- **Massa de Ar - AM (Air Mass)** - Razão entre o caminho ótico percorrido pelos raios solares na atmosfera e o caminho vertical na direção de zênite ao nível do mar (conforme já apresentado na Figura 27).

- **Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}) (open circuit voltage)** - tensão gerada por um conversor fotovoltaico sem carga (saída aberta), para valores preestabelecidos de temperatura e irradiância total.

- **Corrente de Curto-Circuito (I_{sc}) (short circuit current)** - corrente de saída de um conversor fotovoltaico, na condição de curto-circuito, e para valores preestabelecidos de temperatura e irradiância total.

- **Curva característica ou Curva I-V** => representação dos valores da corrente de saída de um conversor fotovoltaico, em função da sua tensão de saída, para condições preestabelecidas de temperatura e de irradiância total (Figura 68).

- **Potência Nominal de um Módulo – P_{NOM}** - É o valor de potência que o módulo fornece nas condições-padrão de ensaio (STC) e é especificado na etiqueta pelo fabricante.

- Corresponde ao Ponto de Potência Máxima (P_{MP}), nas STC.

- A potência nominal do módulo é especificada em Wp (watt-pico) e é dada pela seguinte equação:

$$P_{NOM} = P_{MP} = I_{MP} \times V_{MP} (@ STC) \rightarrow Wp \text{ (watt-pico)}$$

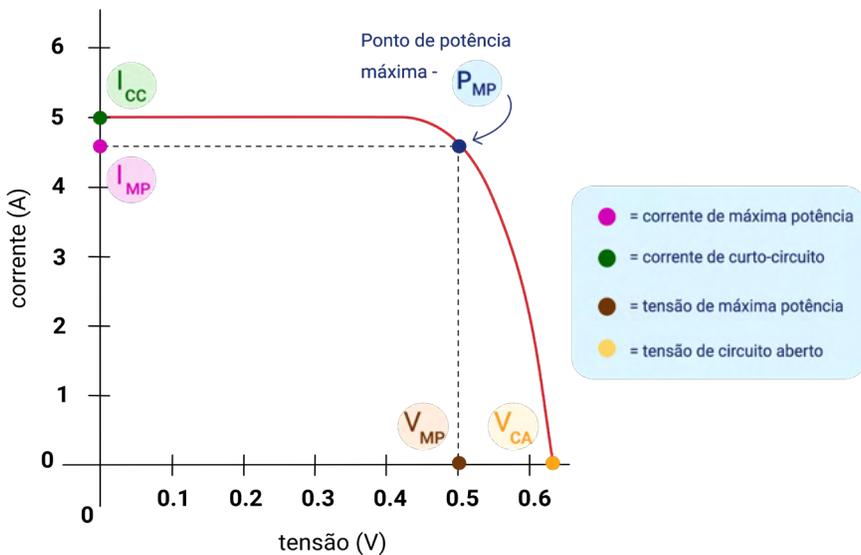


Figura 68: Representação do ponto de máxima potência.

• **Fator de Forma (FF, Fill Factor)** - razão entre a potência máxima (P_{MP}) e o produto da tensão de circuito aberto (V_{OC}) pela corrente de curto-circuito (I_{SC}), especificada na forma de porcentagem (Figura 69).

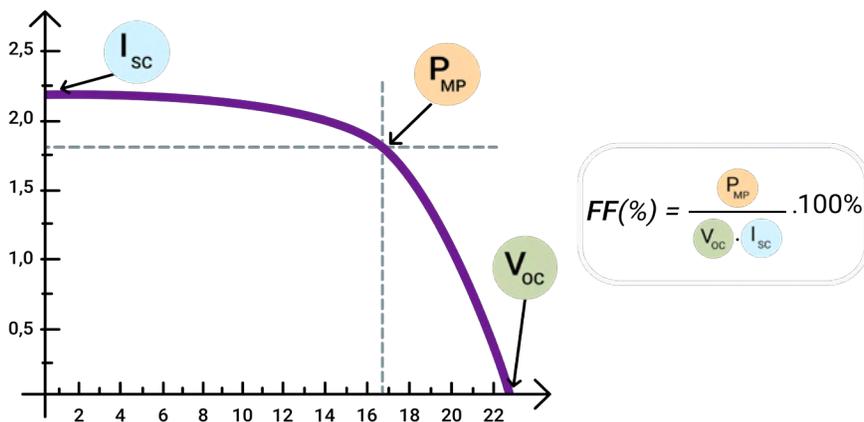


Figura 69: Representação do fator de forma.

Curvas Características:

- Curvas características (I-V) de módulo fotovoltaico
- Influência da Irradiância (W/m^2)

A seguir é mostrada na Figura 70 a Curvas I-V de um módulo para vários níveis de Irradiância (W/m^2), com temperatura constante em $25^\circ C$.

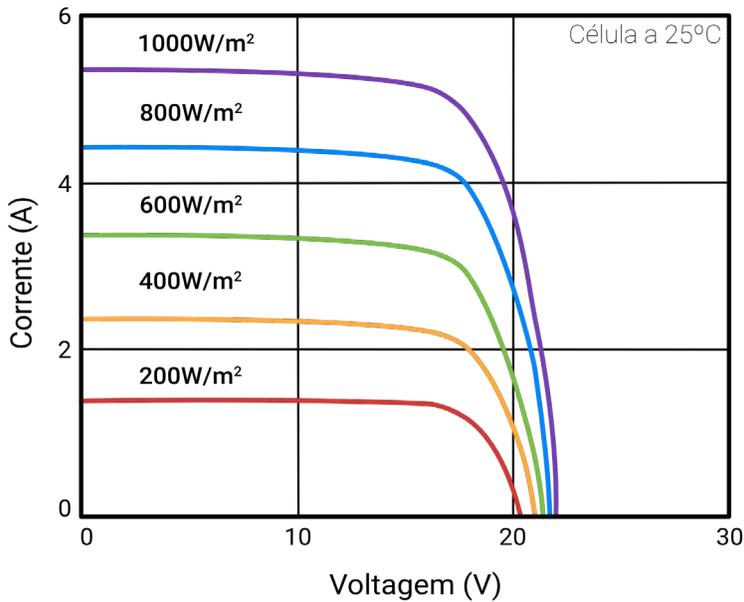


Figura 70: Curva I-V.

De acordo com o gráfico mostrado na Figura 85, quanto maior a irradiância, maior será a tensão e corrente neste módulo proporcional à potência que pode ser produzida por este módulo.

- Influência da Temperatura ($^\circ C$)

Por sua vez, as Curvas I-V de um módulo para várias temperaturas das células é mostrada na Figura 71, com Irradiância constante em $1000W/m^2$ e AM 1,5.

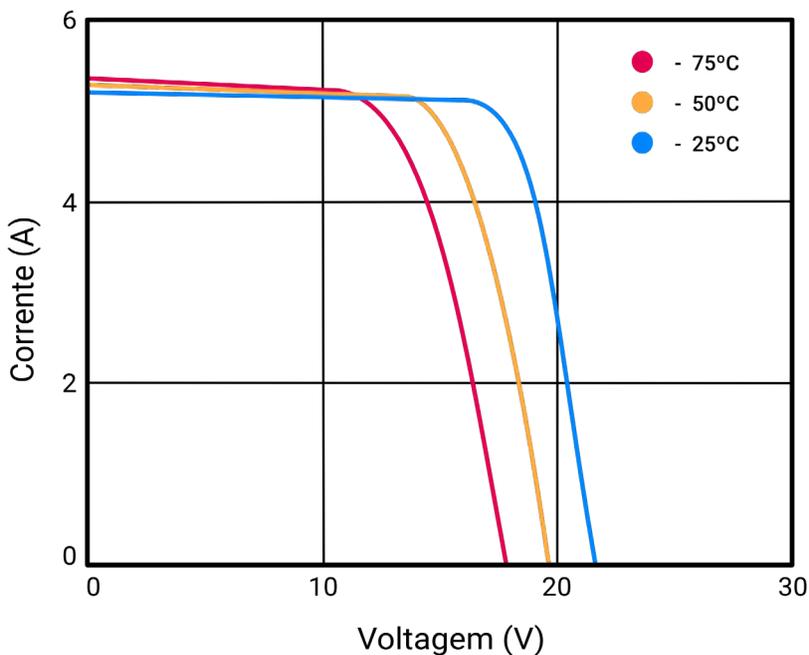


Figura 71: Curva I-V para temperatura.

De acordo com o gráfico mostrado na Figura 71, quanto maior a temperatura de operação do módulo maiores são as correntes, mas menores são as tensões interferindo na potência de operação que pode ser reduzida. Exemplo de uma folha de dados de um módulo fotovoltaico:

Nesta folha de informações você encontrará:

- Parâmetros elétricos nas condições padrão de teste e na condição nominal de circuito aberto;
- Características térmicas;
- Condições de operação;
- Características gerais;
- Especificações de embalagem.

EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO DA CÉLULA FV E DO MÓDULO FV

A eficiência de conversão da célula fotovoltaica e do módulo também são encontrados na folha de dados abordada no tópico anterior. Geralmente estes dados são apresentados em forma de símbolos e neste livro eles serão definidos para o maior conhecimento da tecnologia fotovoltaica. Continuaremos com a definição de mais parâmetros característicos.

• Eficiência de conversão (η)

$$\eta = P_o / P_i$$

P_o = potência obtida na saída do conversor

P_i = potência da radiação solar incidente sobre a área do conversor (célula ou módulo) fotovoltaico.

• Eficiência de conversão de célula ou módulo - η (%)

É a razão entre a potência máxima fornecida pela célula (ou módulo fotovoltaico), e o produto da área da célula (ou do módulo), pela irradiância total.

$$\eta(\%) = \frac{P_{MP}}{(A_{MT} \cdot \text{ou} \cdot A_{CT}) \cdot G_{TOT}} \cdot 100\%$$

A_{MT} - área total do módulo

A_{CT} - área total da célula

• Eficiência de conversão (Módulos comerciais @ STC)

Cada tecnologia apresenta uma eficiência de conversão conforme especificações de seu fabricante. Na seguida iremos definir as faixas de eficiência de conversão para cada tecnologia empregada nos módulos fotovoltaicos.

- Módulos de silício monocristalino (m-Si) apresentam eficiência em torno de 14 - 17 %
- Módulos de silício monocristalino especiais (m-Si) 17 – 20 % (“HIT”; “back contact”)
- Módulos de silício monocristalino bifaciais apresentam eficiência superior a 20%
- Módulos de silício policristalino (p-Si) apresentam eficiência em torno de 13 - 16 %
- Módulos de silício amorfo (a-Si) estabilizado podem ter uma eficiência em torno de 6 - 8 %

- Módulos de Telureto de Cádmio (CdTe) entre 7 - 10 %
- Módulos de Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio (CIGS) entre 9 - 11 %
- Módulos de silício que utilizam silício microamorfo (a-Si/ μ c-Si) aproximadamente 8 - 9 %

• Escolha da Tecnologia

A escolha da tecnologia muitas vezes depende de diversas variáveis que devem ser consideradas em um projeto fotovoltaico, dentre eles encontram-se os aspectos energéticos, pois como visto toda tecnologia existente apresenta características próprias, principalmente no que se refere à eficiência de conversão.

Outro fator importante no desenvolvimento e aplicação de projetos fotovoltaicos são os aspectos arquitetônicos onde a estética do edifício deve ser respeitada, interferindo no posicionamento e estrutura destes sistemas, de acordo com sua aplicação.

A área disponível deve ser uma das premissas mais importantes, pois impactam proporcionalmente na potência instalada (Wp) definindo a capacidade de o sistema atender determinadas demandas por energia elétrica.

E finalmente quando se deseja obter uma maior eficiência, conforme foi apresentado neste capítulo, conseqüentemente a área utilizada será menor.

Assim, um bom projeto deve ser bem definido qual será o foco da aplicação: preciso de uma maior eficiência aplicando em uma área limitada, ou tenho um vasto espaço ampliando sua gama de escolhas de tecnologias.

Para simplificar, vamos trazer um ótimo exemplo elaborado pela empresa SMA exemplificando a aplicação de cada tecnologia de módulo fotovoltaico na instalação de 1kWp, representado na Figura 72 a seguir.

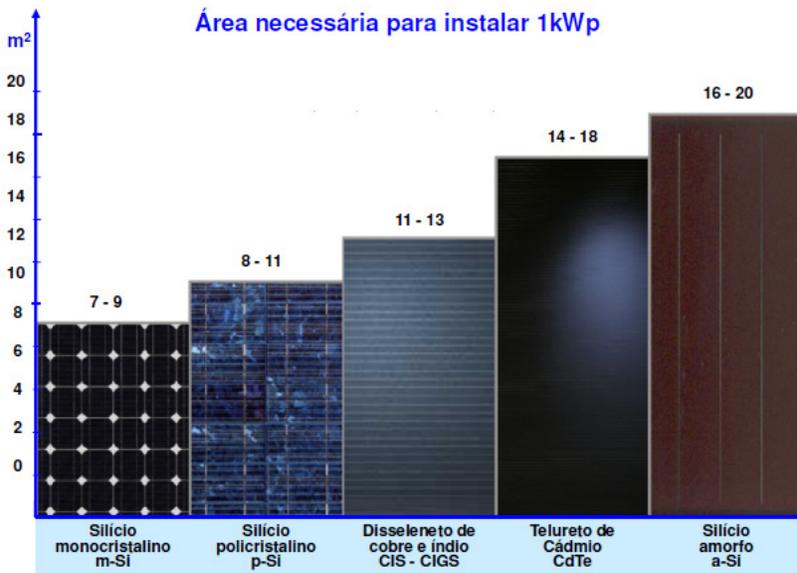


Figura 72: Área necessária para instalar 1kWp ^[19].

Podemos notar que existe uma grande variação entre as áreas necessárias para aplicar os mesmos 1kWp de potência nas tecnologias apresentadas. Os módulos de silício monocristalino requerem uma área menor, enquanto os módulos de silício amorfo uma área que representa quase o dobro.

Existem ainda outros fatores que podem limitar a eficiência dos módulos fotovoltaicos e estão em fase de pesquisa. São eles:

- Reflexão;
- Absorção incompleta dos fótons;
- Recombinação;
- Recuperação parcial da energia dos portadores fotogerados;
- Operação fora do ponto de máxima potência;
- Resistência de contatos;
- Sombreamento pela grade de contato.

EFEITOS DA TEMPERATURA E RESPOSTA ESPECTRAL DAS CÉLULAS

O último tema deste capítulo é referente aos efeitos da temperatura nos módulos fotovoltaicos abordados anteriormente. Finalizaremos falando sobre a resposta espectral

de cada tipo de célula fotovoltaica, que como vimos apresenta diferentes eficiências de conversão. Vamos falar agora sobre o coeficiente de temperatura:

• Coeficientes de temperatura

O aumento da temperatura de operação, de um modo geral, tem efeito negativo no desempenho dos dispositivos fotovoltaicos, reduzindo a eficiência de conversão. Estes efeitos podem interferir em 3 outros parâmetros de operação que são eles (α = corrente; β = tensão; γ = potência):

- Coeficiente de temperatura sobre a corrente (α) influenciando diretamente, resultando:

I_{sc} aumenta ligeiramente

- Coeficiente de temperatura sobre a tensão (β) pode impactar na:

V_{oc} diminui acentuadamente

- Coeficiente de temperatura sobre a potência (γ)

A potência máxima diminui, pois o efeito da temperatura sobre V_{oc} é maior do que sobre I_{sc} .

O coeficiente γ depende da tecnologia fotovoltaica aplicada e em geral é negativo.

• Normalmente esses parâmetros são especificados na folha de dados do módulo, para irradiância de 1000 W/m² e AM 1,5.

Um exemplo para um módulo fotovoltaico de silício monocristalino m-Si é apresentado a seguir, onde:

$$\alpha = +2,2 \text{ mA/}^\circ\text{C}$$

$$\beta = -0,14 \text{ V/}^\circ\text{C}$$

$$\gamma = -0,38 \text{ \%/}^\circ\text{C}$$

Neste exemplo dado, o coeficiente de temperatura sobre a corrente é de 2,2 mA para cada grau aumentado. Logo, temos que o coeficiente de temperatura sobre a tensão de -0,14 Volts para cada grau aumentado e consequentemente um coeficiente de temperatura sobre a potência de -0,38% para cada grau aumentado.

Na Figura 73 a seguir, nota-se quais tecnologias apresentam maiores quedas sobre as potências quando o coeficiente de temperatura é aumentado.

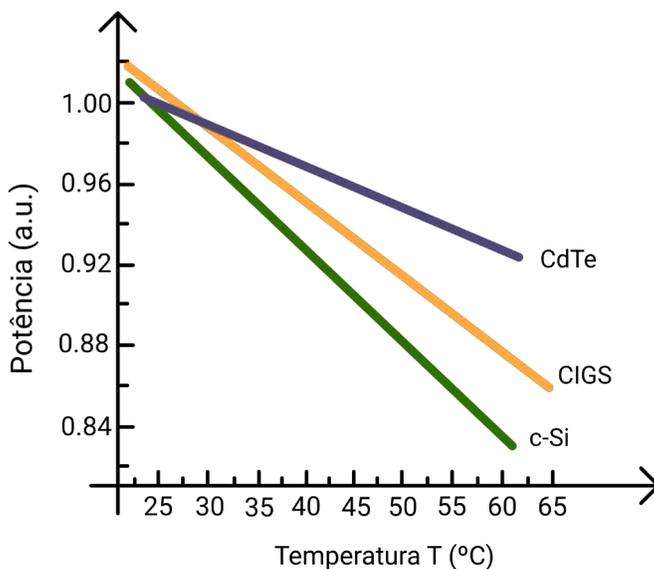


Figura 73: Resposta das células conforme a temperatura.

A seguir mais alguns exemplos para tecnologias de silício cristalino comparando com o silício amorfo:

$$\text{c-Si: } \gamma = -0,45 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$$

$$\text{a-Si: } \gamma = -0,13 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$$

Com o gráfico apresentado na Figura 89 e exemplo mostrado anteriormente, podemos concluir que módulos de silício cristalino apresentam uma menor queda de potência quanto maior a temperatura no módulo fotovoltaico.

Resposta espectral dos diferentes tipos de células FV

- A radiação solar não é monocromática, apresenta diferentes comprimentos de onda;
- As células fotovoltaicas, dependendo dos materiais empregados, apresentam diferentes sensibilidades para cada comprimento de onda da radiação solar incidente, conforme já apresentado na Figura 15.

Conforme já citado anteriormente, um bom projeto fotovoltaico deve levar em consideração a tecnologia a ser empregada, analisando o ambiente onde está será aplicada, devido às características de luminosidade, temperatura e sombreamento que interferem consideravelmente na aplicação destes sistemas.

CONHECENDO O SFVI

Este capítulo será abordado o tipo mais antigo de geração de energia fotovoltaica com armazenadores, as famosas baterias. Você sabia que há vários tipos de sistemas adequados para atender regiões isoladas e distantes da rede elétrica ou ainda que são protegidas por leis ambientais?

Neste item será apresentado essa possibilidade de levar energia para o meio rural para aplicações agrícolas e industriais através da energia solar, conferindo maior sustentabilidade social econômica e ambiental a estes locais.

Além da fonte solar é possível aplicar outras fontes renováveis e convencionais para complementar a geração garantindo maior confiabilidade e autonomia ao sistema.

Logo, será abordado mais sobre os Sistemas Fotovoltaicos Isolados (conhecidos pela sigla SFVI ou SFI), que são regulamentados pela ANEEL e conhecer as diversas possibilidades e equipamentos empregados neste sistema.

Como já mencionado é possível levar energia para o meio rural para aplicações agrícolas e industriais através da energia solar empregando SFVI. Dentre estes sistemas existem ainda subsistemas que se aplicam nas mais variadas cargas de corrente contínua ou alternada.

Você já deve ter percebido ao longo de nossas estradas no Brasil, que existe sistemas de monitoramento diversos aplicando módulos fotovoltaicos em pontos que não há rede elétrica nestas rodovias. Este é um dos exemplos típicos de SFVI.

Além dos sistemas de monitoramento ou sinalização nas estradas, é possível alimentar sistemas de telecomunicações para registro e armazenamento de dados em áreas que não contemplam da rede elétrica. Você já de estar se perguntando: mas como é possível garantir fornecimento ininterrupto de energia nestes locais?

Isso mesmo! O elemento chave para o bom funcionamento dos SFVI são os acumuladores de energia, ou seja, as baterias, que são capazes de armazenar a energia quando há incidência solar para posterior utilização desta nos momentos em que não há presença do Sol.

Apesar da facilidade na operação destes sistemas, estes requerem a utilização de alguns equipamentos adicionais que protegem as baterias contra descargas e limitam seu carregamento, garantindo maior vida útil a estes dispositivos.

Nos sistemas isolados domiciliares também é necessária aplicação de um equipamento conversor de energia elevando a tensão alterando a corrente para atendimento dos eletrodomésticos convencionais da residência.

Existe ainda, a possibilidade de agrupar junto ao gerador fotovoltaico outras fontes de energias como: a eólica e o geradores à diesel, garantindo maior autonomia aos sistemas naquela região nos momentos críticos, em que não há irradiação solar ou ventos

suficientes para gerar energia à instalação.

Toda as condições de operação, instalação e fornecimentos dos SFVI são regulamentadas por uma normativa específica, onde consumidor, concessionária e ANEEL apresentam responsabilidades, direitos e deveres referentes à sua aplicação.

CARACTERÍSTICAS DOS SFVI

Agora vamos entender as principais características dos sistemas fotovoltaicos isolados. A seguir são listadas as principais características destes sistemas:

- Não possuem conexão com o sistema público de fornecimento de energia elétrica;
- Normalmente são instalados em locais sem acesso à rede elétrica, conforme você já ouviu no histórico desses sistemas anteriormente;
- A energia elétrica gerada normalmente é armazenada em baterias, ou em outras formas de armazenamento de energia;
- Podem atender a um consumidor (SFVI individual) ou a vários consumidores (SFVI em minirrede);
- Podem ser projetados para alimentar cargas CC e/ou cargas CA;
- Podem ser utilizados para atender cargas especiais.

Dentre estas características descritas a que merece destaque e que vamos conhecer mais a fundo é o atendimento individual ou minirrede. Os SFVI individuais geram energia elétrica para atender uma única unidade consumidora, enquanto a minirrede gera uma energia elétrica que é compartilhada entre um grupo de unidades consumidoras que estão próximas umas das outras ^[50].

Sistemas Isolados Individuais

A eletrificação com sistemas individuais consiste no atendimento de domicílios individuais mediante aplicação da energia solar, conforme mostrado na Figura 74. Os elementos que caracterizam este sistema são a própria carga, o gerador fotovoltaico e um acumulador, que permita dissociar o horário de consumo do horário da geração.

Para os sistemas isolados individuais podemos adotar basicamente três configurações: atendimento exclusivo em Corrente Contínua (CC), atendimento misto CC/CA e atendimento exclusivamente em Corrente Alternada (CA). O atendimento em CC é mais comum em países da África e da América do Sul, especialmente para sistemas de potência abaixo de 100Wp, no entanto, estes sistemas geram limitações na utilização de eletrodomésticos convencionais ^[13].



Figura 74: Sistema FV Isolado em Xapuri ^[19].

Na imagem apresentada na Figura 74, o sistema isolado individual tem a seguintes características: potência nominal de 255 Wp com 2 módulos de silício policristalino, 2 baterias estacionárias de 150 Ah localizado na cidade de Xapuri no Acre.

Sistemas Isolados em Minirede

Em algumas localidades isoladas no Brasil, utiliza-se sistemas com minirredes de distribuição para o fornecimento de eletricidade (Figura 75), onde a tecnologia mais utilizada é o gerador a diesel. No entanto, este tipo de sistema apresenta um alto custo operacional, em função da manutenção e do transporte do óleo diesel, uma vez que as unidades consumidoras estão afastadas dos centros urbanos. Outras desvantagens relacionadas aos grupos de geradores a diesel são de caráter socioambiental, pois pode haver vazamentos durante o transporte do óleo diesel, emissão de gases poluentes e produção de ruído ^[50].



Figura 75: Sistema FV Isolado em Minirede em Guaraqueçaba ^[50].

Na imagem apresentada na Figura 75, o sistema isolado em miniredes tem as seguintes características: potência nominal de 1.890 Wp com 9 módulos de silício policristalino, 8 baterias estacionárias de 220 Ah localizado na cidade de Guaraqueçaba no Paraná.

Assim, a tecnologia de sistemas fotovoltaicos isolados visa fornecer energia elétrica de forma confiável, e ao mesmo tempo, diminuir a dependência de recursos externos. O dimensionamento adequado tanto do sistema fotovoltaico, como do banco de baterias, deve ter como objetivo minimizar ou eliminar a utilização do grupo gerador a diesel e maximizar a vida útil do banco de baterias, diminuindo os custos de operação e manutenção do sistema nestas regiões ^[13].

Tipos de cargas

As cargas alimentadas podem ser as mais diversas em CC ou CA, podendo também alimentar cargas especiais. O exemplo mais comum é o sistema fotovoltaico isolado para atender sistemas de bombeamento de água e irrigação, sistemas de telecomunicações e monitoramento remoto e outras aplicações como proteção catódica, cerca elétrica e dessalinização.

Bombeamento de água

No sistema de bombeamento de água, a energia é geralmente armazenada na forma de energia potencial gravitacional, retida em tanques elevados, conforme mostrado na Figura 76.

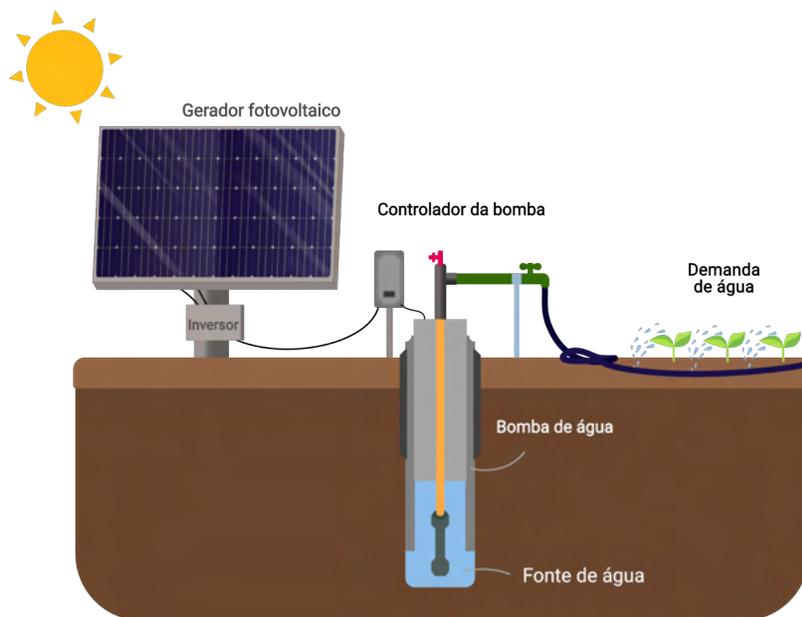


Figura 76: Esquemático de um sistema de bombeamento de água.

Já os sistemas de irrigação são exemplos de sistemas isolados sem armazenamento, quando toda água bombeada é imediatamente usada, ou com armazenamento, quando a água bombeada é armazenada em um reservatório elevado para uso posterior ^[13].

Sistemas de telecomunicações e monitoramento remoto

Desde o início de suas aplicações terrestres, os sistemas fotovoltaicos são usados para fornecer energia para a área de telecomunicações, devido à sua simplicidade e reduzida manutenção (Figura 77). A confiabilidade das fontes de energia para a maioria das aplicações nesta área deve ser bastante alta.



Figura 77: Sinalizador fotovoltaico ^[51].

Geralmente, esses sistemas necessitam de baixa potência e são instalados em áreas remotas com acesso limitado e, frequentemente, com severas condições climáticas (vento, maresia). Com relação à energia necessária para atender determinada carga, esta varia de acordo com o modo de operação e o tempo de utilização dos equipamentos ^[13].

Outras aplicações

Os sistemas fotovoltaicos podem ser utilizados para proteção catódica, de forma a impedir a corrosão de estruturas metálicas enterradas, conforme mostrado na Figura 78. Vamos entender mais sobre esse assunto adiante.

Proteção catódica é um processo de controle contra a corrosão de metais (tubulações e estruturas). O princípio básico é tornar o elemento metálico a ser protegido - um aqueduto, por exemplo - em um cátodo de uma célula de corrosão, o que pressupõe a presença de um ânodo. Assim, o processo natural de perda de elétrons da estrutura para o meio, fenômeno que causa a corrosão, é compensado pela ligação da estrutura metálica a um ânodo de sacrifício, em geral, um eletrodo de cobre/sulfato. O direcionamento da corrente elétrica preserva a estrutura metálica, ocorrendo corrosão controlada no ânodo ^[52].

Este tipo de proteção é quase sempre usado quando existe uma fonte de energia disponível no local, geralmente de baixa tensão CC, utilizada para “vencer” o potencial entre o material galvânico entre o metal enterrado e o ânodo. Neste caso, um ou mais ânodos são enterrados nas proximidades do metal a ser protegido e a fonte de tensão

externa é conectada entre estes anodos e o metal a ser protegido ^[13].

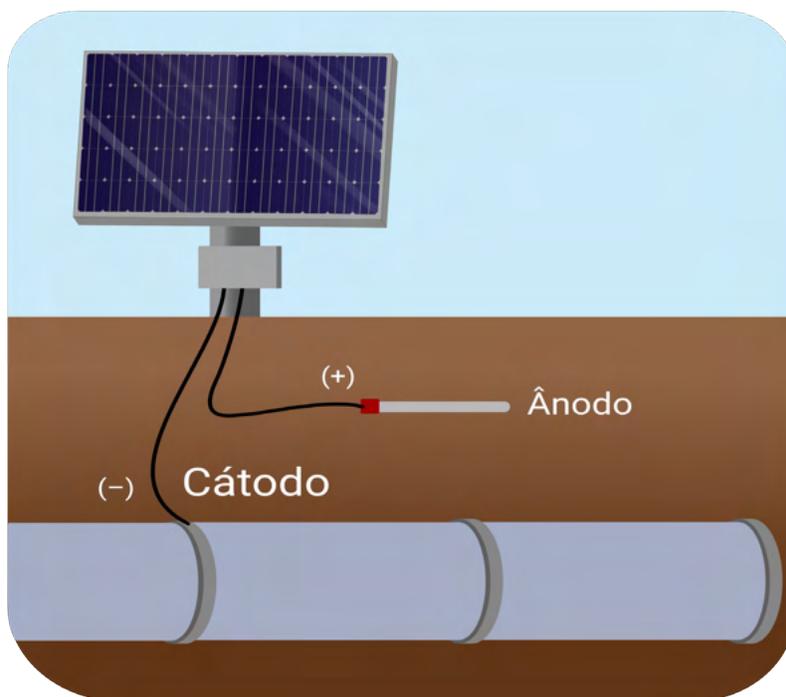


Figura 78: Esquemático de um sistema FV para proteção catódica.

Para interromper o movimento natural da corrente elétrica que flui do metal para o eletrólito, podem também ser utilizados sistemas fotovoltaicos, que fornecem a tensão necessária para reverter o fluxo de corrente, que passa a ser do anodo para o metal ser protegido ^[13].

EQUIPAMENTOS DOS SFVI

Neste item será abordado os equipamentos que compõem um sistema fotovoltaico isolado e entender a interação entre cada um deles. Em seguida são listados cada equipamento constituinte deste sistema e posteriormente definido, conforme mostrados na Figura 79.

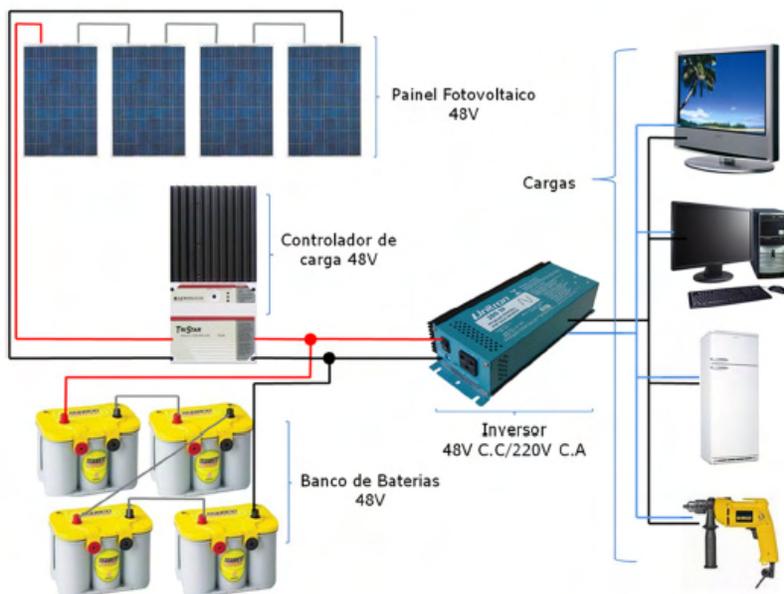


Figura 79: Diagrama pictográfico de um SFVI [19].

Assim conforme visto na Figura 79 o sistema fotovoltaico isolado possui os seguintes equipamentos:

- Módulos FV;
- Controlador de carga (e descarga);
- Banco de baterias;
- Inversor;
- Diversos: (dispositivos de manobra, proteção e aterramento; fiação elétrica e conectores; dispositivos de medição e monitoramento; estruturas de fixação).

Os módulos fotovoltaicos são os responsáveis pela geração de energia elétrica, conforme descrito anteriormente, nas mais diversas potências de operação. Sabemos que este equipamento gera energia em corrente contínua, o que requer o emprego de outros equipamentos quando se deseja atender cargas de corrente alternada que é o caso dos nossos equipamentos e eletrodomésticos residências.

Vamos iniciar aprendendo mais sobre o controlador de carga do SFVI (Figura 80), a seguir são listadas as principais características deste equipamento.

- Controlar o carregamento das baterias;

- Pode também, em alguns casos, controlar o descarregamento das baterias;
- Tipos: (ON/OFF; PWM; MPPT);
- Opera normalmente em: 12V; 24V ou 48V



Figura 80: Controladores de carga ^[19].

A imagem mostrada traz alguns exemplos de controladores de carga disponíveis no mercado. A seguir vamos definir os tipos de controladores:

- On/Off: Consiste na atuação de uma chave, quando a tensão no banco de baterias chega a valores pré-determinados, máxima tensão e/ou mínima tensão, a chave abre ou fecha;
- PWM: A estratégia de controle de tensão constante, bastante usada hoje em dia, baseia-se, principalmente, no controle de modulação por largura de pulso (PWM), onde as baterias são alimentadas por uma corrente pulsada;
- MPPT: Controladores de carga com buscador de ponto máximo de potência são atualmente os controladores de melhor eficiência. A função de MPPT pode produzir ganhos em potência de até 35% comparados com controladores convencionais. Na Figura 81 são mostrados gráficos com a vantagem e a eficiência do uso desse tipo de controladores.

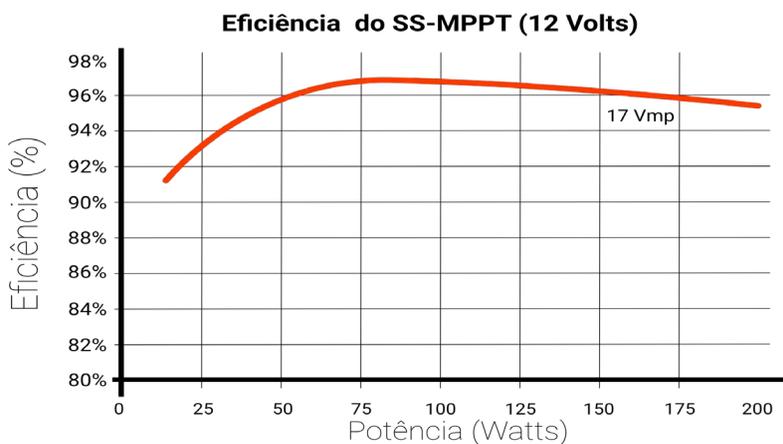
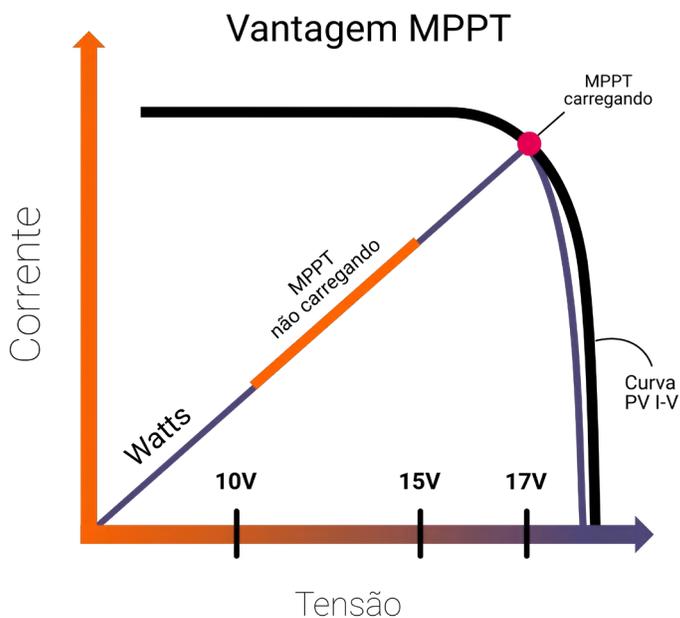


Figura 81: Especificação do ponto de máxima potência do controlador de carga.

Na Figura 81 é mostrada a faixa de tensão ideal que estes controladores operam acima de 17V, onde ocorre o ponto de máxima potência, momento em que o sistema obtém um perfil mais estável.

Será falado agora do elemento chave dos sistemas isolados que são os acumuladores de energia, ou seja, as baterias, conforme mostrado na Figura 82. As características das baterias são as seguintes:

- Armazenar a energia fotogerada, para permitir o consumo nos momentos de baixa ou nenhuma radiação solar;
- Normalmente do tipo: chumbo-ácido, estacionária;
- Tensões mais usuais no barramento CC: 12V, 24V ou 48V.



Figura 82: Banco de baterias ^[19].

Quanto as recomendações de instalação são as seguintes:

- Instalação: diretamente no piso; em caixas; em armários, conforme imagem mostrada;
- Optar por locais de instalação secos, limpos e frescos.
- Altas temperaturas resultam em redução da vida útil (Ambientes Ventilados);
- Enquanto baixas temperaturas $<15^{\circ}\text{C}$ resultam em redução de eficiência (Utilizar suportes de modo a evitar contato direto com piso);
- Piso nivelado e com capacidade a suportar o peso da bateria;
- Consultar o fabricante quanto a emissão de gases e necessidade de sala independente.

A vida útil de uma bateria é determinada pelo número de ciclos de carga e descarga que ela pode realizar. Dois fatores que influenciam no número máximo de ciclos da bateria

são: temperatura de utilização e profundidade de descarga (Figura 83). Quanto maior a temperatura e/ou profundidade de descarga, menor será a vida útil das baterias.

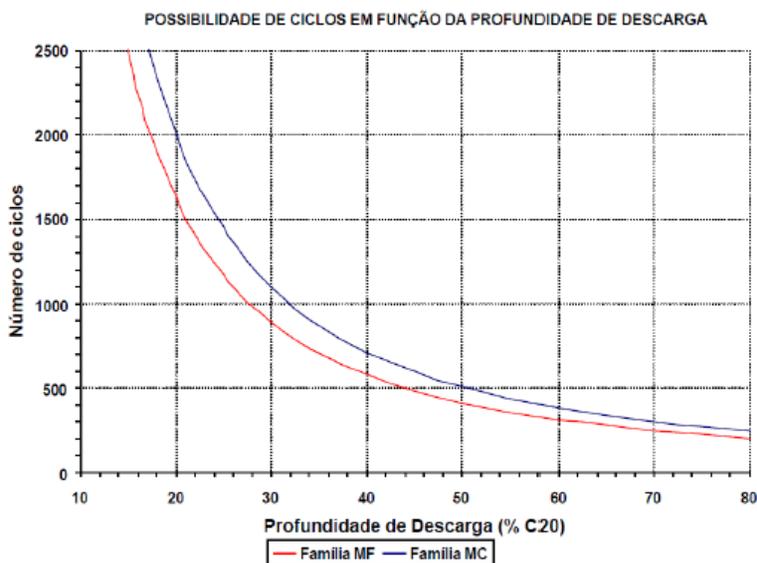


Figura 83: Gráfico com a profundidade de descarga de uma bateria ^[19].

No que se refere à profundidade de descarga, que corresponde à porcentagem da carga máxima da bateria quando descarregada, o controlador de carga pode minimizar os riscos de descarga excessiva das baterias ^[54].

O último equipamento que compõe o sistema fotovoltaico isolado refere-se ao inversor, conforme mostrado na Figura 84. Este equipamento apresenta as seguintes características:

- Equipamento responsável pela conversão da energia CC em energia CA;
- Pode ser tipo senoidal pura ou senoidal modificada;
- Devem ser especificadas:

}	Tensão de entrada (ex: 12Vcc);
	Tensão de saída (ex: 220Vca);
	Frequência (60 Hz);
	Potência (ex: 800W).



Figura 84: Inversores [19].

Os inversores são equipamentos de alta eficiência (até 98%) utilizados para converter a corrente contínua (CC) em alternada (CA) [19]. No caso de aparelhos que são ligados em corrente contínua, estes podem ser conectados diretamente no controlador de carga, dispensando o inversor.

Inversores eletrônicos para sistemas fotovoltaicos isolados estão disponíveis no mercado em uma vasta gama de potências e tensões de entrada, tipicamente 12V, 24V ou 48V [26].

APLICAÇÕES DO SFVI

É possível utilizar os sistemas fotovoltaicos em diversos sistemas domiciliares, sendo eles individuais ou em comunidades, caracterizando se por atendimento em minirredes. Além disso, falamos também que é possível atender o meio rural com objetivo de eletrificação, principalmente para fins de bombeamento de água (Figura 85).

Assim, as principais aplicações para sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água são:

- Bombeamento de água residencial;
- Bombeamento de água para pequenas comunidades;
- Bombeamento de água para consumo animal;
- Sistemas de irrigação;
- Bombeamento industrial.



Figura 85: Esquemático de um sistema de bombeamento de água.

Por outro lado, equipamentos para monitoramento remoto e comunicação de dados necessitam de uma fonte de energia confiável, de forma a evitar a interrupção ou a perda de dados (Figura 86). Devido à confiabilidade e à simplicidade dos sistemas fotovoltaicos, estes estão substituindo a fonte convencional CA, para alimentação de alguns equipamentos de baixo consumo, mesmo em áreas atendidas pela rede elétrica ^[19].



Figura 86: Sistema de monitoramento e comunicação de dados ^[53].

Diversas são as aplicações dos sistemas fotovoltaicos na área de telecomunicações, dentre elas estão:

- Estações remotas de rádio;
- Estações repetidoras de TV;
- Auxílio à navegação;
- Estações base de telefone celular;
- Telefones de emergência em estradas.
- Monitoramento de condições ambientais (estações meteorológicas, maregráficas, anemométricas, pluviométricas, de poluição etc.);
- Controle de tráfego em estradas;
- Registros sísmicos (sismógrafos);
- Pesquisas científicas.

Quase todos os sistemas de monitoramento remoto, alimentados com energia fotovoltaica, funcionam com tensão de 12 VCC. A carga varia de acordo com a quantidade de detectores, taxa de aquisição de dados e os requisitos de transmissão de dados. É comum que as baterias desses sistemas tenham uma autonomia de pelo menos 30 dias, porque a demanda de carga pode não exceder alguns miliampères. No caso de armazenamento de dados, este pode ser feito em memória de massa no local e os dados coletados periodicamente, ou transmitidos online, via comunicação por celular, por exemplo, para um computador remoto, onde é efetuado o tratamento das informações ^[13].

Como falado anteriormente, é possível aplicar sistemas fotovoltaicos isolados para alimentar cargas específicas com os sistemas de proteção catódica que têm um grande mercado incluindo a proteção de:

- Torres de transmissão;
- Tanques de armazenamento;
- Pontes;
- Dutos de petróleo;
- Tubulações de gás, óleo combustível, água etc.

Estudam apontam alguns cuidados na hora do projeto, onde deve-se seguir a recomendação de projetar um sistema que forneça sempre uma corrente maior e de sentido oposto à corrente que causa corrosão. O dimensionamento do sistema de proteção catódica precisa obedecer à lei de Ohm. Correntes excessivas devem ser evitadas, pois elas podem resultar na formação de bolhas no revestimento que protege o metal ou ocasionar uma fragilização por Hidrogênio no metal ^[13].

Nas áreas rurais é comum o uso de cercas elétricas para proteção de propriedades ou para contenção de animais na criação de bovinos ou caprinos (Figura 87). No confinamento de animais, a cerca elétrica pode representar vantagens econômicas em relação à cerca convencional, incluindo menor custo de material (arames, mourões) e de mão de obra, além de demandar menos tempo de construção ^[13].

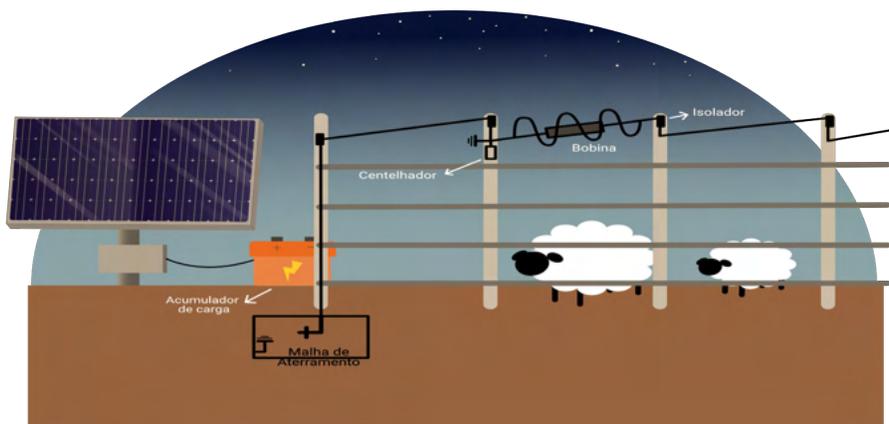


Figura 87: Sistema fotovoltaico utilizando para eletrificação de cercas.

A dessalinização é de relevante importância em locais onde há escassez de água potável, mas há água com considerável teor de sal, como é o caso de grande parte do subsolo do nordeste brasileiro. Os dessalinizadores têm uma vasta área de aplicação como: no abastecimento de consumidores isolados, em embarcações fluviais ou marítimas, na agricultura, em fábricas de gelo, em água para operações menos nobres, como lavagem de pisos e limpeza em geral no caso de hotéis ou pousadas, em operações militares etc.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser utilizados como fonte de energia para os sistemas de dessalinização, que tanto pode ser usado em localidades remotas, onde não haja fornecimento de energia elétrica pela concessionária local, quanto onde esta estiver disponível. No caso isolado, a bomba CA pode ser alimentada por um sistema fotovoltaico de bombeamento d'água ou por um grupo gerador.

A vantagem do uso do gerador fotovoltaico é, em geral, função da supressão, integral ou parcial, da queima de combustíveis fósseis para acionamento da motobomba, o que, em localidades remotas e de difícil acesso, com precária logística de fornecimento do combustível, é de importância capital na sustentabilidade do processo ^[13].

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS HÍBRIDOS

Dentre os sistemas fotovoltaicos temos os sistemas híbridos que são àqueles em que existe mais de uma forma de geração de energia, como por exemplo, grupo gerador a diesel, aerogeradores e geradores fotovoltaicos, conforme Figura 88. Estes sistemas são mais complexos e necessitam de algum tipo de controle capaz de integrar os vários geradores, de forma a otimizar a operação para o usuário. Existem várias configurações possíveis, assim como estratégias de uso de cada fonte de energia ^[13].

A seguir estão listadas as principais características dos Sistemas FV Híbridos:

- Utilizam uma ou mais fontes geradoras (complementares) de energia elétrica além do gerador FV;
- A interligação das fontes geradoras de energia pode se dar no barramento CC após os controladores da carga, ou no barramento CA (desde que os inversores sejam do tipo “interligados à rede elétrica”);
- Podem ser provido ou não de um sistema de armazenamento de energia elétrica em baterias.

No entanto, o controle de projeto, a otimização e operação de sistemas de energia híbridos com duas ou mais fontes de energia são complexos e o risco de falha aumenta. Pesquisadores estudaram uma ampla variedade de métodos para reduzir a complexidade do projeto de sistemas de energia híbridos ^[55].

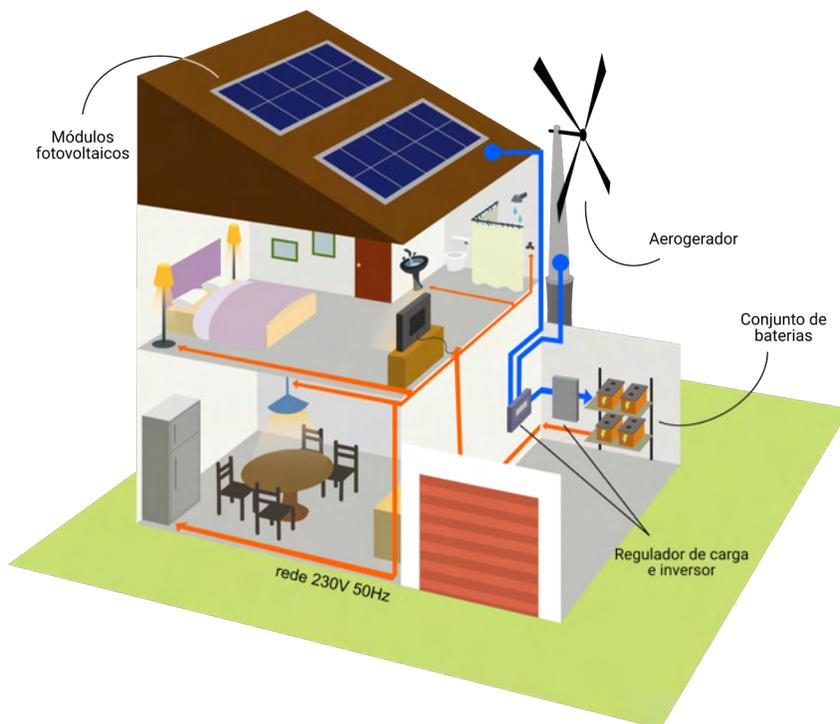


Figura 88: Esquemático de um sistema fotovoltaico híbrido.

A onipresença e o rápido desenvolvimento da tecnologia da energia solar levaram à inclusão mais frequente de energia solar em sistemas híbridos em comparação com outras fontes renováveis. A aceitação do sistema híbrido de energia solar junto ao sistema solar autônomo aumentou porque a energia solar não é suficiente para satisfazer a demanda de eletricidade em muitos lugares. Assim, a energia solar foi implementada em sistemas híbridos com outra fonte, adicionando o dispositivo de armazenamento e um dispositivo de controle desses sistemas devem ser mais competitivos e práticos para a eletrificação de áreas remotas sem acesso à rede elétrica [55].

Embora, a energia solar e eólica são as fontes de energia renovável mais presentes e sustentáveis em todo mundo, ambas se tornam imprevisíveis e às vezes não são capazes de atender a demanda de pico à medida que as mudanças no clima ocorrem. Por esta razão, os sistemas de energia solar ou eólica sozinhos não podem fornecer sempre energia suficiente para atender à demanda. Felizmente, a intensidade da energia fornecida por uma fonte destas fontes é muitas vezes adequada para compensar a outra, permitindo que a demanda de energia seja atendida. Por esse motivo, os sistemas híbridos serão mais adequados [55].

Em muitos locais afastados da rede elétrica, o combustível diesel continua a ser uma tecnologia de geração de energia econômica e bem comprovada. Embora um gerador

a diesel seja a tecnologia mais utilizada para geração de energia elétrica em locais rurais, a longo prazo, o uso do diesel não se torna viável, devido às flutuações nos preços deste. Por este motivo, o gerador a diesel é usado juntamente com fontes renovável como as fontes de energia solar e eólica (Figura 89). No entanto a parte diesel do sistema emite gases prejudiciais, sendo estas emissões são significativamente superiores às dos sistemas renováveis mencionados ^[55].

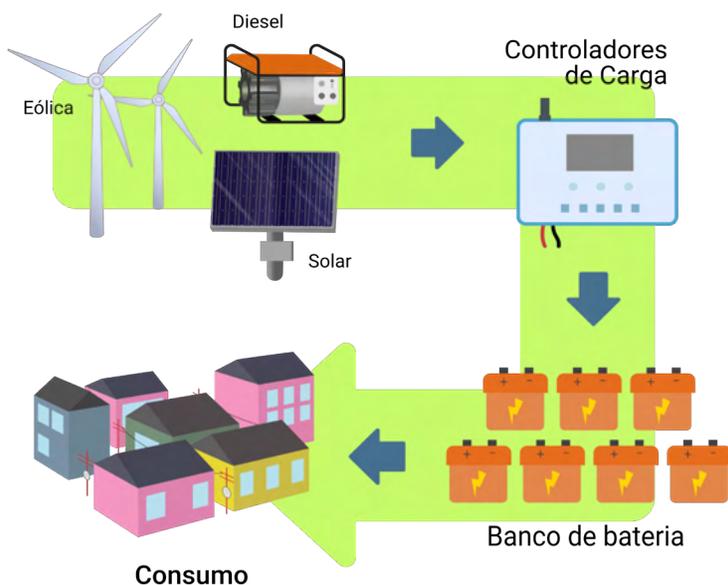


Figura 89: Sistema híbrido fotovoltaico-eólico-diesel.

Os sistemas híbridos de energia solar-eólica-diesel têm requisitos de manutenção mais baixos do que o sistema de geração de energia diesel. A combinação do sistema híbrido é selecionada com base na demanda de energia do local, nos dados meteorológicos e nos preços de diesel e outros componentes. Em muitos locais distantes, os custos dos sistemas de geração de eletricidade, como energia solar, estes sistemas híbridos se assemelham, tornando o principal objetivo de desenvolver um sistema ambientalmente amigável que possa atender a demanda exigida sem a escassez de capacidade ^[55].

Na Figura 90 é mostrado um sistema isolado híbrido fotovoltaico-diesel instalado em Nova Mamoré em Rondônia:



Figura 90: Sistema isolado híbrido fotovoltaico-diesel instalado em Nova Mamoré ^[19].

O sistema mencionado foi implantado pela GUASCOR Solar do Brasil em parceria com o LABSOLAR da UFSC em abril de 2001, o sistema FV de 20,48kWp para operar junto a uma mini rede elétrica alimentada por três geradores diesel de 60kVA cada.

Quando sua operação iniciou em 2001 a 2011 (quando chegou a rede pública convencional), de modo contínuo com um gerador diesel, o segundo gerador diesel entra/sai de operação automaticamente em função da demanda de energia, e o terceiro gerador diesel é reserva do sistema. Na Figura 91 é mostrado do diagrama esquemático deste sistema.

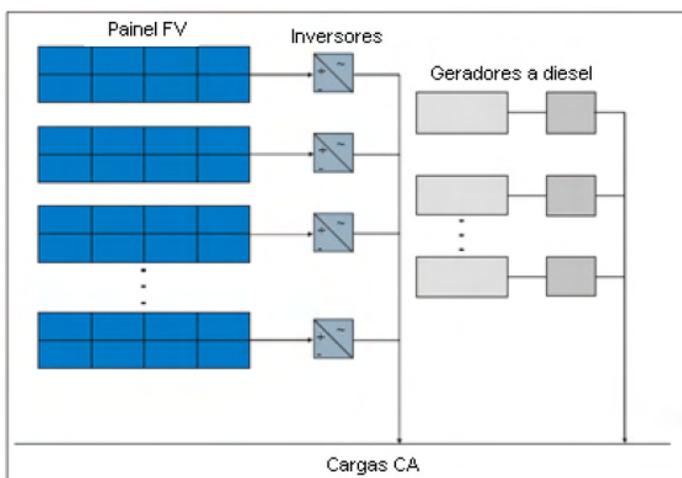


Figura 91: Diagrama esquemático do sistema híbrido de Nova Mamoré ^[19].

Na época, com a instalação do sistema FV houve uma grande redução no consumo

de diesel, visto que durante os momentos de alta incidência solar, só é necessário o acionamento de um gerador diesel para servir de referência de tensão para os inversores do sistema FV. O painel FV era composto por 320 módulos FV de silício amorfo com 64Wp cada, e 32 inversores da marca WÜRTH de 650W.

LEGISLAÇÃO DOS SFVI

O último tema deste capítulo é referente à legislação que estabelece os procedimentos e as condições de fornecimento por meio de Microsistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica – MIGDI ou Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente – SIGFI ^[56]. Vamos abordar alguns pontos desta resolução.

Este documento está dividido em 41 artigos dispostos em 7 seções as quais determinam: suas definições; o atendimento com microssistemas ou sistemas individuais e da disponibilidade mensal garantida; a vistoria e da ligação; a medição da leitura e do faturamento; o fornecimento em período diário reduzido; a tensão em regime permanente e da continuidade do serviço e suas disposições gerais.

Dentre as definições mais relevantes tem-se que um microsistema isolado de geração e distribuição de energia elétrica – MIGDI: é um sistema isolado de geração e distribuição de energia elétrica e deve apresentar o limite de potência instalada total de geração de até 100 kW.

Quanto ao atendimento com microssistemas ou sistemas individuais, estes deve ser realizado em corrente alternada conforme níveis de tensão estabelecidas no município onde se encontra a instalação. As unidades consumidoras devem ser projetadas respeitando uma autonomia mínima de 48 horas, podendo a distribuidora fornecer disponibilidade mensal garantida superior a 80 kWh/UC.

Fica sob a responsabilidade da distribuidora local de energia elétrica a vistoria e a ligação, assim como a medição, leitura e faturamento, sendo facultativo o uso de equipamento de medição nas unidades consumidoras, onde a concessionária se reserva no direito de basear-se na estimativa de consumo.

O fornecimento de energia elétrica, com período diário reduzido, deve observar um total mínimo de 8 horas diárias consecutivas ou divididas, no máximo, em dois períodos diários. Também fica sob a responsabilidade da distribuidora em promover audiência pública na respectiva localidade para informar as horas do dia em que ocorrerá o fornecimento de energia elétrica, bem como a sua eventual divisão em dois períodos.

Um dos pontos mais importantes nesta resolução é a seção referente à tensão em regime permanente e da continuidade do serviço. Neste sentido, a concessionária local

fica responsável a garantir que estes sistemas forneçam níveis de tensão adequados em regime permanente, para que não haja desvios significativos que possam prejudicar o funcionamento dos equipamentos dos consumidores.

Por fim, na última seção desta normativa se encontram as responsabilidades da distribuidora local e dos consumidores, quando ao fornecimento e deveres destes últimos quanto à quitação de débitos. Também é exposto as responsabilidades e obrigações da ANEEL de garantir a qualidade no atendimento ao consumidor e fiscalizar a concessionária.

CONHECENDO O SFVCR

Neste último capítulo será abordado sobre o tipo mais recente de geração de energia fotovoltaica sem uso de acumuladores. Você sabia que há vários tipos de sistemas adequados utilizados em residências, indústrias e comércios que operam em conjunto com a rede elétrica local?

Estamos falando dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, que são muitos mais simples e fáceis de aplicar no meio urbano e ainda pode muitas vezes substituir elementos arquitetônicos de uma edificação convencional.

Neste item será apresentada essa possibilidade de produzir energia elétrica junto ao ponto de consumo no contexto das cidades, conferindo maior sustentabilidade social econômica e ambiental a estes locais.

Assim como nos sistemas fotovoltaicos isolados, também é possível aplicar outras fontes renováveis e convencionais para complementar a geração garantindo maior confiabilidade e autonomia ao sistema.

Vamos aprender mais sobre os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (conhecidos pela sigla SFVCR ou SFCR), que são regulamentados pela ANEEL e conhecer as diversas possibilidades e equipamentos empregados neste sistema.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica estão cada vez mais presentes na matriz energética mundial, seja pela aplicação de usinas fotovoltaicas de grande porte ou por meio de usinas geradoras de mini e microgeração incorporada às edificações, atuando como geração distribuída inserida no meio urbano.

Diversas são as vantagens com a implantação desses sistemas, dentre elas estão: elevada produtividade (pois toda a energia disponibilizada pelos módulos é utilizada), ausência do banco de baterias e ao desligamento automático do inversor quando na ausência de energia da rede elétrica. O inversor é o “coração” desse sistema e é a partir dele que acontece a conversão entre corrente e tensões nos níveis da rede elétrica local, além de garantir a segurança à instalação, evitando assim o fenômeno de ilhamento.

O fenômeno de ilhamento ocorre quando parte da rede elétrica é desconectada proposadamente ou acidentalmente do restante do sistema da concessionária, mas essa continua a ser energizada por um ou mais geradores distribuídos conectados a ela, formando um subsistema isolado ^[23].

Neste sentido, entender o funcionamento de tais sistemas, bem como seus componentes e suas atuações são essenciais para estudos de viabilidade técnica e econômica no desenvolvimento de projetos que utilizam SFVCR.

Serão apresentadas também as principais características deste sistema, seus componentes e aplicações, bem como os modelos que podem ser adotados em relação a tarifa de energia e legislação vigente no Brasil para estes sistemas.

No Brasil, existe uma tarifação específica para comercialização da energia fotovoltaica produzidas por estes sistemas, quando há o excedente de energia gerada e este é injetado na rede elétrica local.

Além do mais, toda as condições de operação, instalação e fornecimentos dos SFVCR são regulamentadas por uma normativa específica, onde o consumidor, concessionária e ANEEL apresentam responsabilidades, direitos e deveres referentes à sua aplicação.

CARACTERÍSTICAS DOS SFVCR

Agora vamos entender as principais características dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. A seguir são listadas as principais características destes sistemas:

- Operam com conexão à rede elétrica pública;
- A energia gerada é injetada na rede elétrica. Não necessitam de elemento armazenador;
- Na falta da rede elétrica (desligamento para manutenção ou falha) os SFVCR se desconectam automaticamente da rede, deixando de fornecer energia, evitando o ilhamento;
- Segurança da rede e dos usuários;
- Quando a rede elétrica é restabelecida, automaticamente os SFVCR se reconectam e passam a fornecer energia à rede;
- Utilizados como forma de geração distribuída, integrados a edificações urbanas (kW);
- Utilizados para geração centralizada, com grande potência instalada (MW);
- Elevada produtividade (YIELD) – kWh/kWp.

Na Figura 92 é mostrado o diagrama básico de um SFVCR com seus elementos que compõem este sistema, contemplando o painel solar, inversor, disjuntor, o medidor bidirecional e a presença da rede elétrica.

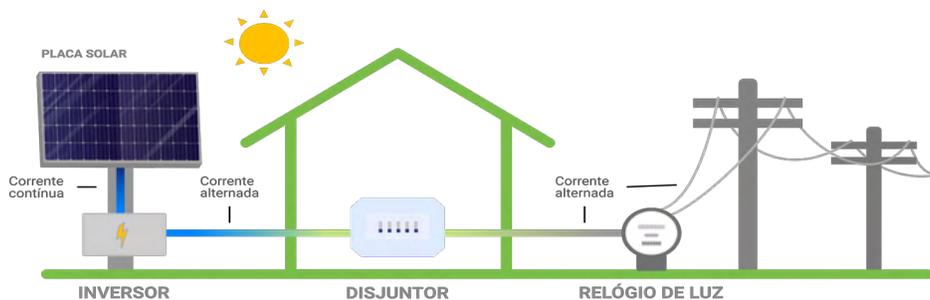


Figura 92: Diagrama de um SFVCR.

Como você já viu, as potências instaladas vão desde poucos kWp em instalações residenciais, até alguns MWp em grandes sistemas operados por empresas ^[13].

Além do baixo impacto na fase de operação, esses sistemas apresentam diversas facilidades como: instalação junto ao ponto de consumo, ausência de peças móveis, baixo índice de manutenção, geram energia elétrica imediatamente após a instalação, operam silenciosamente e com alta confiabilidade em paralelo a rede elétrica local, além de serem modulares permitindo a expansão dos sistemas ou reinstalação em outros locais ^[23].

Do ponto de vista da eficiência energética, estes sistemas podem ser considerados bastante ideais, visto que geração e consumo de energia têm coincidência espacial, minimizando assim as perdas por transmissão comuns aos sistemas geradores centrais tradicionais. Dependendo do perfil de consumo pode ocorrer também muitas vezes uma coincidência temporal com a geração solar, como no caso da demanda por ar-condicionados, em que a coincidência é perfeita (a potência elétrica demandada por ar-condicionado é máxima quando a irradiação é máxima) ^[22].

Desta forma, ainda que no sistema elétrico brasileiro o principal pico de consumo tenha início por volta do pôr do sol, vários ramos das concessionárias elétricas têm picos coincidentes com a máxima oferta solar, aumentando assim o valor da energia gerada nestes períodos ^[22].

Segundo Rüter (2004) ^[22], os sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede oferecem uma série de vantagens para o sistema elétrico, muitas das quais estão relacionadas a custos evitados, dentre elas, podem-se destacar:

- Perdas por transmissão e distribuição de energia são minimizadas;
- Investimentos em linhas de transmissão e distribuição são reduzidos;
- Não apresentam necessidade de área livre, já que a área necessária é a própria edificação;

No que se refere aos sistemas conectados à rede, associados a unidades consumidoras, alguns projetos pilotos começaram a ser instalados no país no final dos anos 90, principalmente em universidades e centros de pesquisa. No entanto, somente em 2012 essa modalidade de geração foi regulamentada pela ANEEL [57].

A ANEEL regulamenta os sistemas fotovoltaicos enquadrados como sistemas de micro e minigeração, pela Resolução Normativa N° 482/2012 [57], e devem atender aos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), Módulo 3 [58], e às normas de acesso das distribuidoras locais. A Resolução 482 estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica, cujas definições serão apresentadas nos subitens a seguir [13].

Os SFVCR são sistemas complexos, embora constituídos basicamente por painel FV e inversor, onde não são empregados elementos armazenadores de energia elétrica. Neste sentido, a rede elétrica da concessionária atua como o elemento armazenador, devido a toda energia gerada ser colocada em paralelo com a energia da rede [23].

Um exemplo real de sistema real que opera desde 2011 em uma universidade no sul do Brasil é o sistema instalado no Escritório Verde (EV) da UTFPR, uma proposta única no Brasil de uma edificação sustentável modelo de 150 m² que adotou diversas estratégias de sustentabilidade em parceria com mais de sessenta empresas, conforme Figura 93.



Figura 93: Vista dos painéis do EV e do inversor - Sede Centro [6] [59].

O SFVCR do EV da UTFPR tem uma potência instalada de 2,1 kWp (10 módulos KYOCERA de tecnologia de silício policristalino, modelo KD210GX-LP ligados em série) e um inversor monofásico em 220V de 2 kW de potência nominal (PVPOWERED modelo

PVP2000).

O acompanhamento nestes sete anos de operação do SFVCR do EV em Curitiba confirma que esse sistema é de alta confiabilidade, visto que ele opera de forma ininterrupta desde sua instalação, de forma limpa e silenciosa e não necessita de área adicional, pois o painel fotovoltaico está instalado sobre o telhado da edificação. Dessa forma, comprova-se que essa é a forma mais promissora de geração distribuída para o ambiente urbano.

Casagrande *et al.*, (2012) ^[60] salientam que a concepção do Escritório Verde é resultado de uma longa busca pela inovação associada à transformação educacional. O projeto teve como objetivos a implementação de um programa de gestão ambiental para o câmpus, promoção da integração da educação ambiental, aplicação de novas tecnologias e práticas capazes de gerar integração entre professores e alunos no câmpus, assim como a comunidade, com o propósito de desenvolver projetos sustentáveis eficazes e programas que podem se beneficiar dos processos de ensino e da própria cidade.

EQUIPAMENTOS DOS SFVCR

Agora serão apresentados os equipamentos que compõem um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica e entender a interação entre cada um deles. Em seguida são listados cada equipamento constituinte deste sistema e posteriormente definido.

- Módulo FV;
- Inversor;
- Proteções elétricas.

Os módulos fotovoltaicos são os responsáveis pela geração de energia elétrica, conforme descrito nos últimos capítulos, nas mais diversas potências de operação. Sabemos que este equipamento gera energia em corrente contínua, o que requer o emprego de outros equipamentos quando se deseja atender cargas de corrente alternada que é o caso dos nossos equipamentos e eletrodomésticos residências.

Inversor

O inversor é o dispositivo eletrônico que converte energia elétrica em CA a partir de uma fonte de energia elétrica em CC. A energia CC pode ser proveniente, por exemplo, de baterias, células a combustível ou módulos fotovoltaicos, mostrado na Figura 94. No que se refere aos parâmetros elétricos, este equipamento deve apresentar uma tensão CA de saída com amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados às cargas a serem alimentadas. Adicionalmente, no caso de sistemas conectados à rede elétrica a tensão de saída do inversor deve ser sincronizada com a tensão da rede ^[13].

Neste sentido Campos (2015) ^[61] ressalta que esses equipamentos devem possuir a proteção anti-ilhamento, fenômeno descrito anteriormente, conferindo segurança aos operadores e técnicos, quando na eventual manutenção e operação da rede elétrica local. Dessa forma, a regulamentação de inversores quanto à segurança na operação é garantida e regulamentada por normas internacionais e nacionais, como a IEEE-519 ^[62], IEEE-929 ^[63], IEC-62116 ^[64] e a NBR IEC 62116 ^[65], sendo consenso entre todas essas normas um tempo máximo de desconexão do inversor equivalente a 2 segundos, após a detecção do desligamento da rede elétrica.

Outro importante aspecto na operação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede é o ponto de operação a que estão submetidos os módulos fotovoltaicos. Estes apresentam uma região de operação chamada de ponto de máxima potência (MPP), função presente no inversor de SFVCR, onde a potência fotogerada, que é o produto tensão x corrente, proporciona seu máximo valor. Esse valor varia continuamente em função da irradiância e da temperatura. Conseqüentemente, sistemas que também de modo contínuo busquem colocar os módulos fotovoltaicos para operar em MPP são capazes de melhorar o desempenho do sistema ^[23].



Figura 94: Exemplo de inversores ^[19].

Com relação à potência nominal, os inversores empregados em microgeração geralmente são monofásicos com potências tipicamente de até 5 kW, podendo ser utilizado mais de um inversor para um determinado arranjo fotovoltaico separado por strings, ou seja, módulos fotovoltaicos conectados em série ^[17] ^[23].

Portanto, a escolha do inversor em um SFVCR deve considerar diversos parâmetros,

dentre eles: a tensão de entrada, potência nominal, quantidade de strings que o inversor suporta, sistema de diagnóstico e monitoramento de parâmetros como tensão e frequência da rede, e sua homologação obrigatória para atuação junto à rede [66].

Proteções elétricas

De acordo com Pinho e Galdino (2014, p. 246) [13], o correto dimensionamento e a adequada utilização de dispositivos de proteção contribuem para a minimização ou até mesmo a eliminação de falhas. Desse modo, o avanço tecnológico dos componentes dos SFVCR faz com que todos eles apresentem, além de robustez, dispositivos de proteção integrados.

Neste sentido, além dos dispositivos de proteção integrados aos equipamentos, a instalação de outros dispositivos de proteção deve ser prevista, como disjuntores, dispositivos de proteção contra surtos (DPS), sistemas de aterramento e sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA), conforme é mostrado na Figura 95 a seguir.

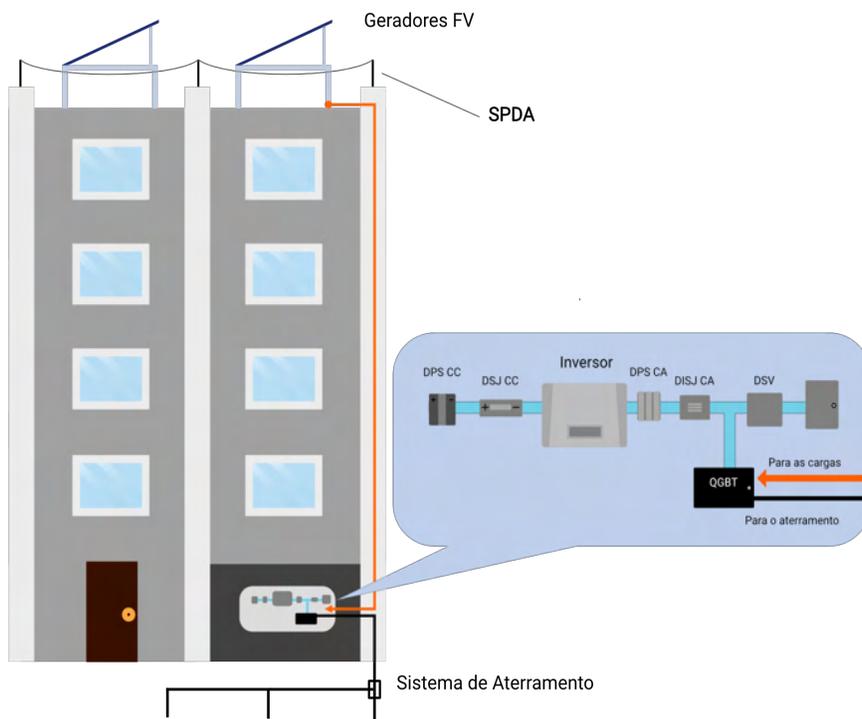


Figura 95: Esquema típico de dispositivos de proteção.

Para garantir segurança às manobras elétricas, a regulamentação ANEEL inicialmente exigia como padrão técnico, a instalação, após o medidor, de uma chave seccionadora sob carga, denominada de dispositivo de seccionamento visível (DSV), utilizada para garantir a desconexão da geração fotovoltaica durante procedimentos de manutenção da rede ^[13]. Entretanto, o uso do DSV não é mais obrigatório conforme regulamentação da ANEEL, cabendo ao projetista sua aplicação no projeto e dimensionamento dos SFVCR.

Fiação Elétrica

- Módulos fotovoltaicos tem garantia média de até 25 anos e os condutores elétricos devem ser dimensionados e instalados de modo a terem vida útil para, no mínimo, o mesmo período.
 - Os condutores devem ser fixados à estrutura para evitar esforço contra o vento e prevenir ação de animais roedores.
 - Os condutores expostos a radiação ultravioleta (UV) devem possuir especificação adequada ou serem protegidos em eletrodutos com proteção a UV.
 - Condutores devem ser dimensionados para queda de tensão de no máximo de 4%
- Padrão de Cores (Figura 96)

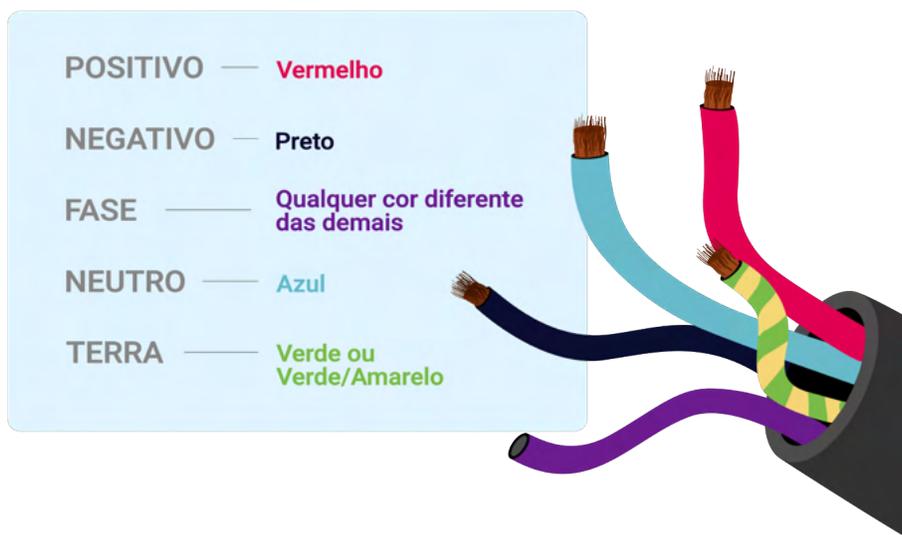


Figura 96: Padrão de cores de fios.

As cores dos fios são padronizadas pela NBR 5410 ^[67] facilita a instalação e manutenção.

Conectores (Figura 97 e 98)

Os conectores MC3 e MC4 são específicos para aplicações em sistemas FV:



Figura 97: Conectores MC 3 e MC4^[19].

Estes são os conectores MC3 E MC4 próprios para ligação de módulos FV.

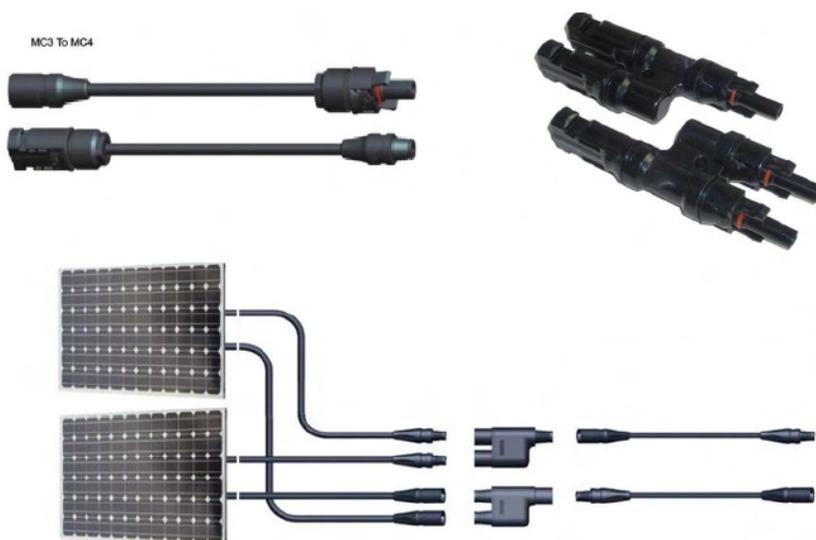


Figura 98: Conectores MC 3 para e MC4 ^[19].

Já estes são conectores MC3 para MC4. Cabe ressaltar que estes conectores foram desenvolvidos e patenteados pela empresa alemã Multi-Contact especialmente para utilização em sistemas fotovoltaicos.

APLICAÇÕES DO SFVCR

Neste item será apresentado as diferentes aplicações dos SFVCR. As instalações fotovoltaicas conectadas à rede elétrica pública podem apresentar duas configurações distintas: podem ser instaladas (i) de forma aplicada/integrada a uma edificação (e.g. no telhado ou fachada de um prédio, e, portanto, junto ao ponto de consumo); ou (ii) de forma centralizada como em uma usina central geradora convencional, neste caso normalmente a certa distância do ponto de consumo ^[22].

A energia solar fotovoltaica distribuída elimina vários destes problemas. Sistemas fotovoltaicos integrados a edificações urbanas e interligados à rede elétrica pública, como ilustrado pela figura 109, são a mais recente tendência nesta área e se justificam porque tanto o recurso energético solar como a demanda energética em edificações urbanas têm caráter distribuído ^[22].

Na forma aplicada a uma edificação, os módulos fotovoltaicos, estes podem ser aplicados nos telhados e coberturas nas edificações, conhecidos como BAPV (Sigla do inglês para *Building Applied Photovoltaic System*), mostrado na Figura 99.



Figura 99: Exemplo de um BAPV ^[19].

Mas como vista na próxima imagem, também é possível empregá-lo na construção substituindo outros materiais como janelas, telhas ou coberturas de estacionamento é conhecido como BIPV (*Building Integrated Photovoltaics System*), mostrado na Figura 100.

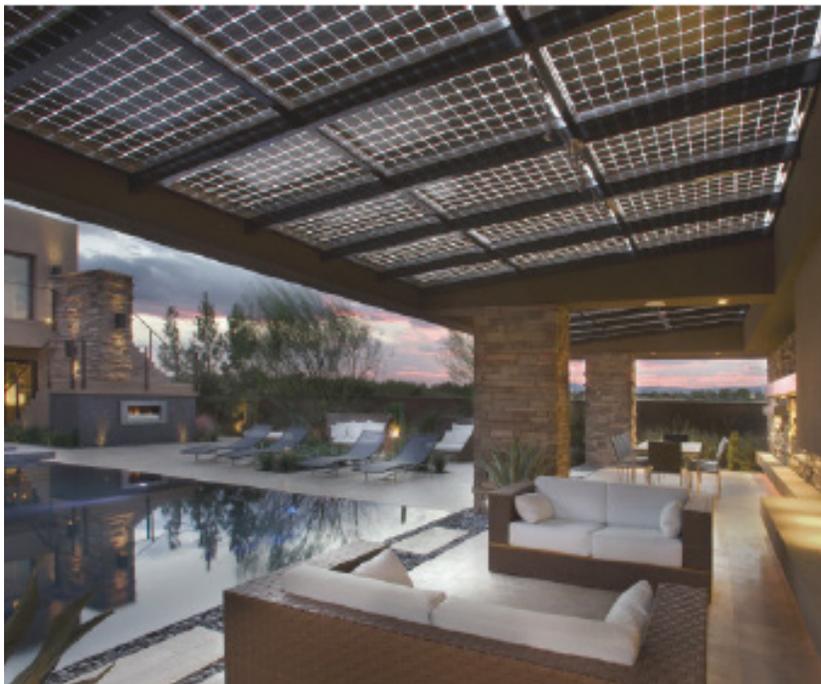


Figura 100: Exemplo de um BIPV ^[19].

Os sistemas BIPV além de gerar eletricidade, também podem fornecer funcionalidades adicionais para o edifício, como por exemplo, proteção contra os raios do sol, isolamento térmico, proteção contra a chuva, sombreamento parcial de áreas, substituição de telhas etc. ^[41].

No cenário brasileiro, após a implementação da resolução normativa 482/2012 da ANEEL, e posterior atualização com a 687/2015, houve um aumento significativo de instalações de micro (até 75 kW), e mini (até 5 MW) centrais FV no Brasil ^{[57][68]}. De acordo com a ANEEL (2021a) ^[69], até o mês de setembro de 2021, houve a implementação de 608.636 unidades FV geradoras no Brasil, o que representa 6.956.831,14 kWp, ou seja, 7 GWp, conforme mostrado na Figura 101.

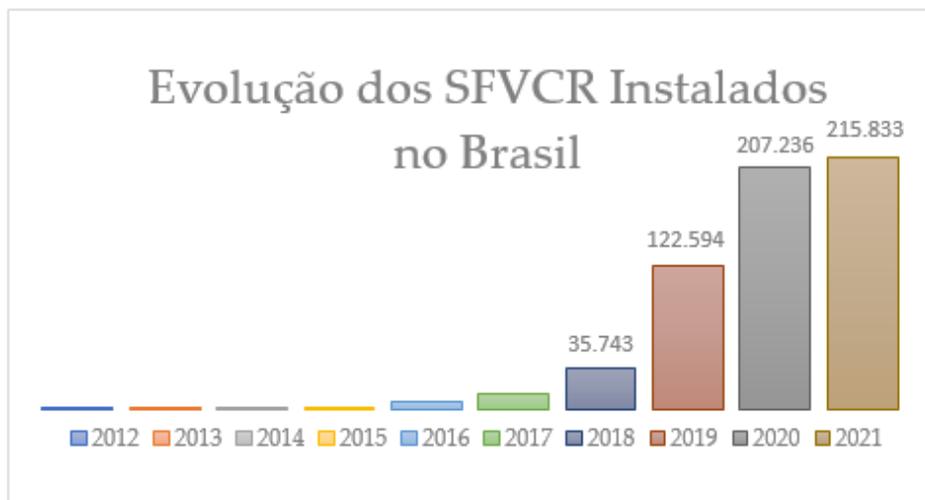


Figura 101: A evolução da geração distribuída no Brasil [69].

* O ano de 2021 representa os sistemas instalados até setembro.

Quanto às usinas FV de larga escala, houve a implementação de 3.844.373,49 kWp de potência fiscalizada (Figura 102), conforme Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA), totalizando 10,3 GWp de potência instalada de capacidade de geração FV do Brasil [70].

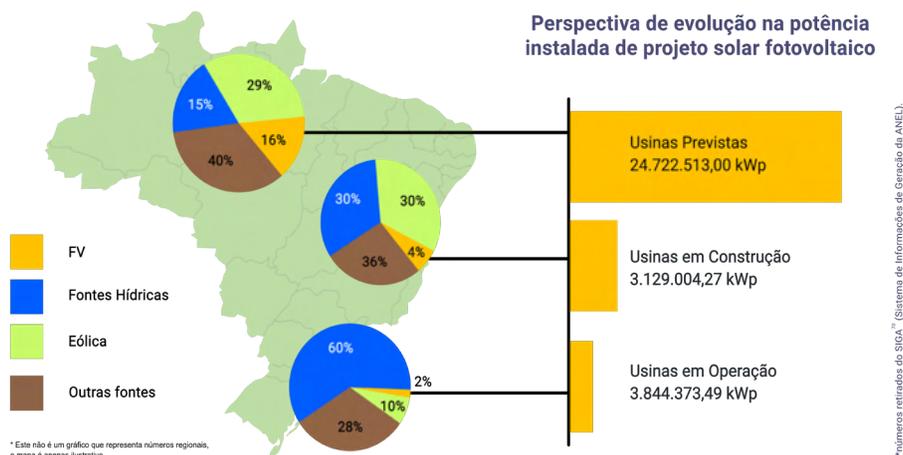


Figura 102: Participação de fontes na matriz elétrica do Brasil.

Esta é a usina Usina Solar Fotovoltaica e Eólica Cidade Azul (Figura 103), implantada

na cidade de Tubarão em Santa Catarina, com objetivo de pesquisa e desenvolvimento de usina híbrida.



Figura 103: Usinas Cidade Azul em Tubarão/SC [71].

No tocante aos impactos ambientais ocasionados por usinas fotovoltaicas, estes se mostram significativos em sua fase de construção dependendo da localidade e da dimensão desta planta. Entretanto, no caso da geração distribuída, ou seja, a aplicação de várias plantas de pequena potência em centros urbanos, esta merece destaque especial devido à possibilidade de instalação em áreas existentes, tais como telhados e fachadas.

Por esse motivo, a implantação desses sistemas e a modificação do cenário urbano, com a adesão de módulos fotovoltaicos, apresentam impacto social e ambiental muito menor do que a causada por usinas hidrelétricas e termelétricas [6].

MODELOS ADOTADOS EM RELAÇÃO A TARIFA DE ENERGIA

Como já falamos no início deste capítulo, existem diversos modelos adotados para tarifar o excedente de energia que SFVCR injetam na rede. Se lembra do nosso diagrama básico de um SFVCR? Na Figura 104 é apresentado novamente este diagrama, mas com a energia circulando em diversos sentidos dentro de uma instalação elétrica residencial.

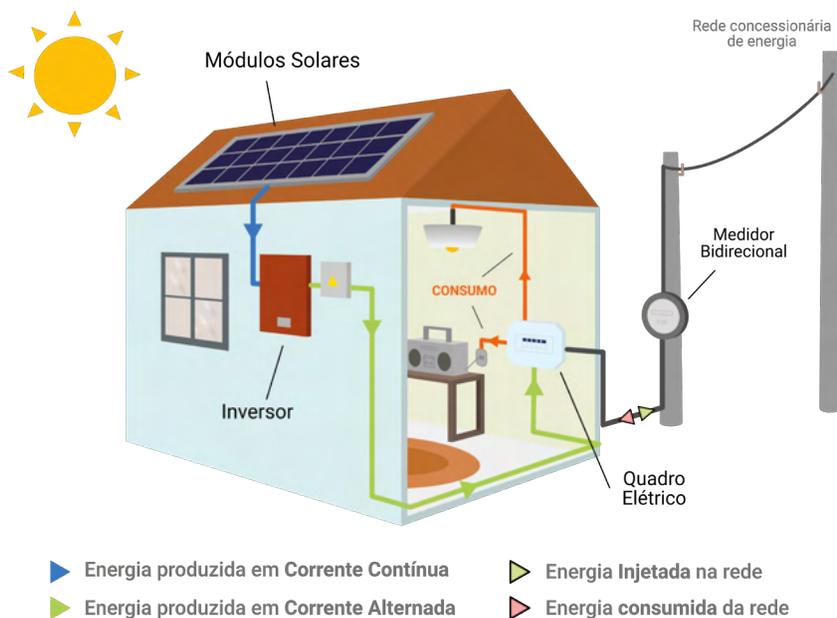


Figura 104: Diagrama de um SFVCR.

Na Figura 104 apresentada temos 5 diferentes cores para os tipos de energia que circulam na instalação que possui um SFVCR. A primeira delas é a corrente produzida em CC pelo SFVCR representada na cor amarela. Após ser convertida pelo inversor de corrente e tensão está corrente, representada agora pela cor verde está pronta para uso nos aparelhos domésticos.

No entanto, antes de alimentar essas cargas essa energia precisa ser distribuída pelo quadro elétrico, para daí sim energizar as cargas. Quando há irradiação solar, e sobra de energia está passando por um medidor bidirecional seguindo para a rede elétrica local, representado pela cor verde com borda azul. Caso contrário, a energia da rede passará por este medidor e alimentará os circuitos da instalação sendo representado pela cor vermelha com borda verde.

Quem fará esse controle é a concessionária de energia local, podendo aplicar diferentes modelos de comercialização dessa energia. O primeiro deles é o sistema *Net Metering*. Este modelo O gerador fotovoltaico TROCA a energia que produz (recebendo créditos em kWh) para serem consumidos.

Outro modelo aplicável presente em muitos países da Europa é a TARIFA-PRÊMIO onde o gerador fotovoltaico vende TUDO o que produz (recebendo a tarifa-prêmio) e o consumidor compra TUDO o que utiliza da concessionária (pagando a tarifa de sua classe tarifária).

No Brasil o modelo aplicado é o Sistema de Compensação, similar ao *Net Metering* em que O gerador fotovoltaico TROCA a energia que produz (recebendo créditos em kWh) para serem consumidos, conforme mostrado na Figura 105.

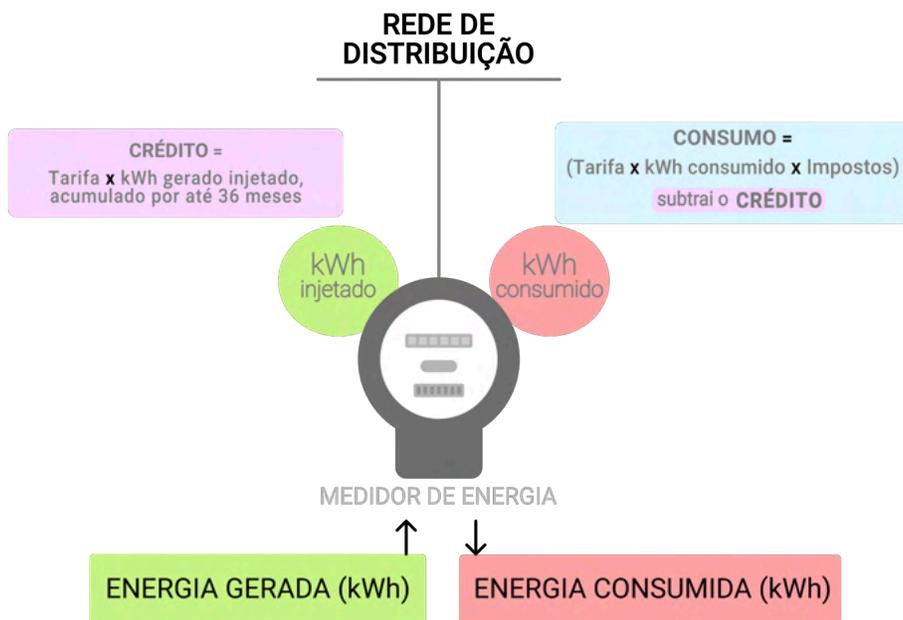


Figura 105: Diagrama para o cálculo do consumo.

Assim o consumo é definido pelo seguinte diagrama mostrado na figura: sendo o produto da tarifa incidente no local pela energia consumida (kWh) pelos impostos menos o crédito que é o valor da energia excedente que o sistema gerou.

No ano de 2017 o CONFAZ – Conselho Nacional de Política Fazendária ^[72] autorizou os estados na concessão de isenção nas operações internas relativas à circulação de energia, sujeitas ao regime de faturamento sob os sistemas de compensação de energia elétrica, conforme nota mostrada no site na imagem da Figura 106.

[Ir para o conteúdo](#) | [Ir para o menu](#) | [Ir para a busca](#) | [Ir para o rodapé](#)

ACESSIBILIDADE | ALTO CONTRASTE | MAPA DO SITE

Conselho Nacional de Política Fazendária
CONFAZ
 MINISTÉRIO DA FAZENDA

Buscar na portal

[Links](#) | [Fale conosco](#) | [SEFAZ](#)

VOCÊ ESTÁ AQUI: [PÁGINA INICIAL](#) > [LEGISLAÇÃO](#) > [CONVÊNIO](#) > [ICMS](#) > [2015](#) > [CONVÊNIO ICMS 16/15](#)

MENU DE APOIO

- Competência
- Quem é Quem
- Secretarias de Fazenda

LEGISLAÇÃO

- Notas Explicativas
- Convênios
- Ajustes
- Atos
- Despachos
- Protocolos
- Boletim do ICMS
- Regimentos
- Órgãos
- Credenciados
- Nota Fiscal Eletrônica

Autoriza a conceder isenção nas operações internas relativas à circulação de energia elétrica, sujeitas a faturamento sob o Sistema de Compensação de Energia Elétrica de que trata a Resolução Normativa nº 482, de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.

CONVÊNIO ICMS 16, DE 22 DE ABRIL DE 2015

Publicado no DOU de 27.04.15

Autoriza a conceder isenção nas operações internas relativas à circulação de energia elétrica, sujeitas a faturamento sob o Sistema de Compensação de Energia Elétrica de que trata a Resolução Normativa nº 482, de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.

O Conselho Nacional de Política Fazendária - CONFAZ, na sua 230ª reunião extraordinária, realizada em Brasília, DF, no dia 22 de abril de 2015, tendo em vista o disposto na Lei Complementar nº 24, de 7 de janeiro de 1975 e na Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, resolve celebrar o seguinte

CONVÊNIO

Cláusula primeira Ficam os Estados de Goiás, Pernambuco e São Paulo autorizados a conceder isenção do ICMS incidente sobre a energia elétrica fornecida pela distribuidora à unidade consumidora, na quantidade correspondente à soma da energia elétrica injetada na rede de distribuição pela mesma unidade consumidora com os créditos de energia ativa originados na própria unidade consumidora no mesmo mês, em meses anteriores ou em outra unidade consumidora do mesmo titular, nos termos do Sistema de Compensação de Energia Elétrica, estabelecido pela Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012.

Figura 106: Liberação do CONFAZ [72].

Muitos estudos apontam que quando há políticas públicas de incentivo a geração fotovoltaica distribuída que é o caso dos SFVCR, a sociedade contempla de diversos benefícios propiciados por estas tecnologias. Além disso, há criação de novos empregos dinamizando a economia dos estados com novas vagas no setor e redução da conta de energia elétrica.

LEGISLAÇÃO DOS SFVCR

O último tema é referente à legislação que estabelece a regulamentação específica para geração distribuída de energia, a Resolução Normativa 482 da ANEEL, em que os consumidores podem gerar sua própria energia por meio de energias renováveis, trocando energia com a distribuidora local com objetivo de reduzir o valor da sua fatura de energia elétrica. Devido ao aumento nas instalações de sistemas geradores de energia, a ANEEL aprovou aprimoramentos na Resolução Normativa nº 482/2012, ampliando e agilizando o acesso ao Sistema de Compensação de Energia Elétrica aos usuários [57].

Segundo as novas regras, a Resolução Normativa nº 687/2015 [68] que começaram a valer a partir de 1º de março de 2016, é permitido o uso de qualquer fonte renovável, além da cogeração qualificada, denominando-se microgeração distribuída a central geradora com

potência instalada até 75 quilowatts (kW) e minigeração distribuída aquela com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW (sendo 3 MW para a fonte hídrica), conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras ^[68].

Assim, quando a quantidade de energia gerada em determinado mês for superior à energia consumida naquele período, o consumidor fica com créditos que podem ser utilizados para diminuir a fatura dos meses seguintes. De acordo com as novas regras, o prazo de validade dos créditos passou de 36 para 60 meses, sendo que eles podem também ser usados para abater o consumo de unidades consumidoras do mesmo titular situadas em outro local, desde que na área de atendimento de uma mesma distribuidora. Esse tipo de utilização dos créditos foi denominado “autoconsumo remoto” ^[68].

Outra inovação da norma diz respeito à possibilidade de instalação de geração distribuída em condomínios (empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras). Nessa configuração, a energia gerada pode ser repartida entre os condôminos em porcentagens definidas pelos próprios consumidores ^[68].

A ANEEL criou ainda a figura da “geração compartilhada”, possibilitando que diversos interessados se unam em um consórcio ou em uma cooperativa, instalem uma micro ou minigeração distribuída e utilizem a energia gerada para redução das faturas dos consorciados ou cooperados ^[68].

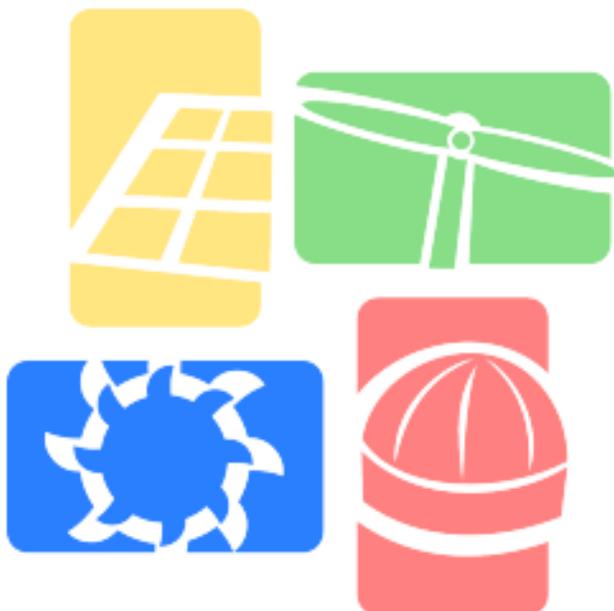
Com relação aos procedimentos necessários para se conectar a micro ou minigeração distribuída à rede da distribuidora, a ANEEL estabeleceu regras que simplificam o processo: foram instituídos formulários padrão para realização da solicitação de acesso pelo consumidor. O prazo total para a distribuidora conectar usinas de até 75 kW, que era de 82 dias, foi reduzido para 34 dias. Adicionalmente, a partir de janeiro de 2017, os consumidores já podem fazer a solicitação e acompanhar o andamento de seu pedido junto à distribuidora pela internet ^[68].

Vamos apresentar um exemplo de uma concessionária de energia elétrica brasileira que adequou a resolução da ANEEL para o seu contexto a COPEL ^[73] (Figura 106). Todas as outras concessionárias em território nacional também atualizaram suas resoluções para atender os procedimentos de conexão de micro e minigeração distribuída.

NORMAS TÉCNICAS COPEL

NTC 905200

ACESSO DE MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA AO SISTEMA DA COPEL (com compensação de energia)



Superintendência de Operação da Distribuição

Emissão: Fevereiro / 2014

Revisão: Abril / 2021

Figura 106: NTC 905200 da COPEL ^[73].

No Paraná, a legislação vigente é abordada através da Norma Técnica da COPEL (NTC) 905200 ^[73]: Acesso de micro e minigeração distribuída ao sistema da COPEL atende

a resolução 482 de abril de 2012 ^[57], da ANEEL, que definiu um prazo de 240 dias a partir da sua publicação para as 38 concessionárias de energia elétrica incluírem em seu acervo de normas técnicas os procedimentos para acesso de micro e minigeração distribuída ^[61].

Para a modalidade de microgeração, cuja potência instalada do gerador distribuído é de no máximo 75 kW, é necessário formular o requerimento de acesso à rede elétrica da COPEL, entregando toda a documentação que consta no capítulo 4.1.1 da NTC 905200 ^[73], sendo que o ponto de conexão do inversor é definido após a medição, sendo a critério do consumidor a sua posição ^[61].

Neste sentido, a NTC declara explicitamente a total responsabilidade do acessante pela correta proteção da sua instalação, incluindo a geração distribuída, sendo necessárias as proteções anti-ilhamento e de abertura do circuito da geração em caso de falta de sincronia entre o gerador e a rede da COPEL.

São abordados requisitos gerais de projeto, em que constam uma série de recomendações do que deve conter o projeto elétrico a ser analisado e aprovado pela COPEL, antes de qualquer implantação do projeto. A etapa que segue a aprovação do projeto é a sua implantação para, posteriormente, ser solicitada a vistoria da COPEL, que verificará rigorosamente se a execução foi em conformidade com o projeto analisado ^[61].

REFERÊNCIAS

- [1] UNITED NATIONS. **Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future**. 1987. Disponível em: <<http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>>. Acesso em: 18 dez. 2015.
- [2] HÁK, T.; JANOUSKOVÁ, S.; MOLDAN, B. Sustainable Development Goals: A need for relevant indicators. **Ecological Indicators**, n. 60, p. 567-573, 2016.
- [3] MIKHAILOVA, Irina. Sustentabilidade: evolução dos conceitos teóricos e os problemas da mensuração prática. **Revista Economia e Desenvolvimento**, n. 16, p. 22-41, 2004.
- [4] NAÇÕES UNIDAS. **Conheça os novos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU**. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/conheca-os-novos-17-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-da-onu/>. Acesso em: 17 mai. 2017.
- [5] HOSSAIN, M.S.; MADLOOL, N.A.; RAHIM, N.A.; SELVARAJ, J.; PANDEY, A.K.; KHAN, A. F. Role of smart grid in renewable energy: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. n. 60, p. 1168-1184, 2016.
- [6] MARIANO, J.D.; SANTOS F.R.; BRITO, G.W.; CASAGRANDE JR, E.F.; URBANETZ JR, J. Hydro, thermal and photovoltaic power plants: A comparison between electric power generation, environmental impacts and CO₂ emissions in the Brazilian scenario. **International Journal of Energy and Environment**, v. 7, n. 4, p 347-356, 2016.
- [7] Itaipu Binacional. **Itaipu, 46 anos: só em 2020, usina já produziu mais de 30 milhões de MWh**. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/noticia/itaipu-46-anos-so-em-2020-usina-ja-produziu-mais-de-30-milhoes-de-mwh>. Acesso em: ago. 2021.
- [8] SOKKA, L. SINKKO, T. HOLMA, A. MANNINEN, K. PASANEN, K. RANTALA, M. LESKINEN, P. Environmental impacts of the national renewable energy targets – A case study from Finland. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 59, p. 1599-1610, 2016.
- [9] MME (Ministério de Minas e Energia). **Número de usinas eólicas se aproxima de 500 instalações no país**. Disponível em: http://antigo.mme.gov.br/web/guest/todas-as-noticias/-/asset_publisher/pdAS9lcdBICN/content/numero-de-usinas-eolicas-se-aproxima-de-500-instalacoes-no-pa-1/pop_up?_101_INSTANCE_pdAS9lcdBICN_viewMode=print&_101_INSTANCE_pdAS9lcdBICN_languageId=pt_BR. Acesso em: ago. 2021.
- [10] KUANG, Y.; ZHANG, Y.; ZHOU, B.; LI, C.; CAO, Y.; LI, L.; ZENG, L. A review of renewable energy utilization in islands. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 59, p. 504–513, 2016.
- [11] KOREA. **Korea leads the Green way**. Disponível em: <http://www.korea.net/NewsFocus/Sci-Tech/view?articleId=104426>. Acesso em: 25 abr. 2016.
- [12] UIHLEIN, A.; MAGAGNA, D. Wave and tidal current energy – A review of the current state of research beyond technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n.58, p. 1070-1081, 2016.

- [13] PINHO, J. T.; GALDINO, M. A.; Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES). CEPEL - GTES. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014, 529p.
- [14] Huawei. **1 GW Ground-mounted Smart PV Plant in Yanchi, China**. Disponível em: <http://www.huawei.com/en/all-products/Solar/References/Yanchi>. Acesso em: 17 mai. 2017.
- [15] SMETS, A.; JÄGER, K.; ISABELLA, O.; SWAAIJ, R.V. ZEMAN, M. **Solar Energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems**. Eindhoven :Eindhoven University of Technology, 2015.
- [16] ZILLES, R.; MACÊDO, W.N.; GALHARDO, M.A.B.; OLIVEIRA, S.H.F. de. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- [17] VILLALVA, M.G.; GAZOLI, J.R. **Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2012.
- [18] **Radiação Solar e a Produção da Energia Fotovoltaica**. Disponível em: http://radiacao-solar.blogspot.com.br/2013_11_01_archive.html?view=classic. Acesso em: 16 mai. 2017.
- [19] URBANETZ JUNIOR, Jair. **Energia Solar Fotovoltaica**. Notas de aulas. 2021.
- [20] **Types of Solar Panels: On the Market and in the Lab [2020]** Disponível em: <https://solarmagazine.com/wp-content/uploads/2020/01/innovative-solar-panel-technologies.png>. Acesso em: 19 set. 2021.
- [21] Energia Solar Concentrada (CSP). **Artigo focado na Energia Solar Concentrada**. Disponível em: <https://docplayer.com.br/3665092-Artigo-focado-na-energia-solar-conteudo-parte-iii-energia-solar-concentrada-csp.html>. Acesso em: 19 set. 2021.
- [22] RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada a rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: Editora UFSC, 2004.
- [23] URBANETZ JUNIOR, J. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade**. 2010. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – UFSC, Florianópolis-SC, 2010.
- [24] Portal Energia. **Em que consiste um sistema seguidor solar fotovoltaico**. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/em-que-consiste-sistema-seguidor-solar-fotovoltaico/>. Acesso em: 17 mai. 2017.
- [25] PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R.; GONÇALVES, A.R.; COSTA, R.S.; LIMA, F.J. L. de; RÜTHER, R.; ABREU, S.L. de; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S.V.; SOUZA, J.G. de. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2.ed. -- São José dos Campos: INPE, 2017.
- [26] VILLALVA, M.G. **Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2015.

- [27] ALMEIDA, L.T. de. **Implantação de um Piranômetro Termoelétrico na UTFPR para Análise do Potencial de Energia Solar Nesta Localidade**. 2015. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica), UTFPR. Curitiba-PR, 2015.
- [28] **CAMPBELL SCIENTIFIC**. CR1000. Disponível em: <https://www.campbellsci.com.br/cr1000-datalogger>. Acesso em: 10 mai. 2016.
- [29] SOUZA, M.B. **Análise e Estimativa das Componentes da Radiação Solar Através de Dados Medidos na Rede EPESOL da UTFPR no Estado do Paraná**. 2020. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.
- [30] INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 25 mai. 2021.
- [31] SOLARGIS. **Download solar resource maps and GIS data for 200+ countries and regions**. Disponível em: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world>. Acesso em: 25 set. 2021.
- [32] MONTENEGRO, A. de A. **Avaliação do Retorno do Investimento em Sistemas Fotovoltaicos Integrados a Residências Unifamiliares Urbanas no Brasil**. 2013. 211 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFSC, Florianópolis-SC, 2013.
- [33] MARTINS, E.S.P.R.; MENEZES NETO, O.L. de.; OLIVEIRA, J.L.; VASCONCELOS JR, F. das C.; RODRIGUES, M.; SAKAMOTO, M. S.; COSTA, A. A. **Atlas Solarimétrico do estado do Ceará**, Fortaleza-CE, 2010.
- [34] **Atlas Rio Solar: atlas solarimétrico do Estado do Rio de Janeiro** / organização: IEPUC - Instituto de Energia da PUC-Rio; [realizado pela EGPEnergia e PUC-Rio. - Rio de Janeiro: Ed. PUC-Rio, 2016.
- [35] ATLAS DE ENERGIA SOLAR DO ESTADO DO PARANÁ. **Ferramenta Interativa**. Disponível em: <https://atlassolarparana.com/>. Acesso em: 19 set. 2021.
- [36] TIEPOLO, G.M.; PEREIRA E.B.; URBANETZ JR, J.; PEREIRA, S.V.; GONÇALVES, A.R.; LIMA, F.J.L. de.; COSTA, R. S.; ALVES, A.R. **Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná**. 1a Edição. Curitiba: UTFPR, 2017.
- [37] Taiwan Trade. **Células solar flexível de filme fino** Disponível em: <https://pt.taiwantrade.com/product/c%C3%A9lulas-solar-flex%C3%ADvel-de-filme-fino-357361.html#>. Acesso em 23 set. 2021.
- [38] Quetzal Ingeniería. **¿Qué son las celdas solares orgánicas (OPVs)?** Disponível em: <https://www.quetzalingeneria.es/que-son-las-celdas-solares-organicas-opvs/>. Acesso em: 23 set. 2021.
- [39] ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 10899 - Energia Solar Fotovoltaica – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2006.
- [40] LÜDKE, M.C. **A rota metalúrgica do silício: da extração do quartzo à obtenção do silício de grau fotovoltaico**. 2018. 77 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – UFSC, Araranguá-SC, 2018.

- [41] PORTAL SOLAR. **Painéis Solares Integrados à Construção – BIPV**. Disponível em: <http://www.portalsolar.com.br/paineis-solares-integrados-a-construcao---bipv.html>. Acesso em: 10 jun 2017.
- [42] BRUSCHI D.L.; MOEHLECKE, A.; ZANESCO, I.; COSTA, R.C. Desenvolvimento de células solares em silício tipo n com emissor formado por Boro. **Revista Matéria**, v. 16, n. 3, pp. 775 – 787, 2011.
- [43] **YINGLI SOLAR**. Disponível em: <http://www.yinglisolar.com/br/products/manufacturing/>. Acesso em: 19 jun. 2017.
- [44] PEREIRA, L.M.N. **Produção e caracterização de silício policristalino e sua aplicação a TFTs** 2008. 254 f. Tese (Doutorado em Engenharia dos Materiais - Faculdade de Ciências e Tecnologia) – Universidade Nova de Lisboa, 2008.
- [45] MESSENGER, Roger A.; VENTRE, Jerry. **Photovoltaic Systems Engineering**. New York: CRC Press, 2010.
- [46] GREGORY, Catherine. **Solar Energy for Beginners: The Complete Guide to Solar Power Systems, Panels & Cells**. Kindle Edition: Loco Media, 2015.
- [47] PV Magazine. **New PV facade design in Sweden**. Disponível em: https://www.pv-magazine.com/2021/08/17/new-pv-facade-design-in-sweden/?utm_source=dvtr.it&utm_medium=linkedin. Acesso em: 15 set. 2021.
- [48] INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia). **Portaria nº 004, de 04 de janeiro de 2011**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001652.pdf>. Acesso em junho 2017.
- [49] PV Magazine. **Swiss scientists achieve 21.4% efficiency for flexible CIGS solar cell**. Disponível em: <https://www.pv-magazine.com/2021/09/07/swiss-scientists-achieve-21-4-efficiency-for-flexible-cigs-solar-cell/>. Acesso em: 23 set 2021.
- [50] MANRIQUE, A.K.R. **Diretrizes para a sustentabilidade de uma minirrede de sistemas solares fotovoltaicos em uma região isolada da Colômbia**. 2015. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal de Paraná. Curitiba, 2015.
- [51] **INBALANCE-ENERGY. Batteryless Solar photovoltaic (PV) systems**. Disponível em: http://www.inbalance-energy.co.uk/articles/types_of_solar_photovoltaic_pv_system.htm. Acesso em: 1 jun. 2017.
- [52] Capítulo 3: Controle da corrosão. **Notas de aula**. Disponível em: <https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840747/216/ApostilaDPMparte2.pdf>. Acesso em: 25 set. 2021.
- [53] **BENNING**. Disponível em: <http://www.benning.de/telecomunicacoes.html>. Acesso em: 5 junho 2017.
- [54] FARIA, N. de A. **Ferramenta de auxílio para o dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica e Isolados**. 2017. 98 f. Monografia de Especialização em Energias Renováveis - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

- [55] R.K. AKIKUR A,N, R.SAIDUR A,B, H.W.PING A, K.R.ULLAH Comparative study of stand-alone and hybrid solar energy systems suitable for off-grid rural electrification: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n.27, p.738–752, 2013.
- [56] ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA). **Resolução Normativa nº 83 de 20 de setembro de 2004**. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 2 mai. 2016.
- [57] ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA). **Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 2 mai. 2016.
- [58] ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Módulo 3**. 2017 Disponível em: https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/PRODIST-M%C3%B3dulo3_Revis%C3%A3o7/ebfa9546-09c2-4fe5-a5a2-ac8430cbca99. Acesso em: 30 nov. 2020.
- [59] URBANETZ JR, J.; CHINVELSKI, T.; SIMÃO, C.A.; MAKISHI, L.M. Primeiro sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica homologado pela COPEL. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, V, 2014, Recife. **Anais do V Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Recife, 31 a 3 de abril de 2014.
- [60] CASAGRANDE JR, E.F.; KOBISKI, B.V.; GÓIS, J.A.; AGUDELO, L.P.P. Practical Strategy for Sustainable Development in Education: The Green Office's Case of the Federal University of Technology of Paraná, Curitiba, Brazil. **World Symposium on Sustainable Development at Universities (WSSD-U-2012)**, 5 – 6 June 2012, Rio de Janeiro.
- [61] CAMPOS, H.M. **Geração distribuída de energia solar fotovoltaica na matriz elétrica de Curitiba e região: um estudo de caso**. 2015. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UTPFR, Curitiba-PR, 2015.
- [62] IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). **IEEE-519 STD**. Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. Nova York, 1992.
- [63] IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). **IEEE-929**. Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems. Nova York, 2000.
- [64] IEC (International Electrotechnical Commission). **IEC 62116**: Test procedure of islanding prevention measure for utility interconnected photovoltaic inverters. Suíça, 2008.
- [65] ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **NBR 62116**: Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Rio de Janeiro, 2012.
- [66] BOXWELL, M. **Solar Electricity Handbook - 2015 Edition: A simple, practical guide to solar energy - designing and installing solar PV systems**. Kindle Edition: Greenstream Publishing, 2015.
- [67] ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **NBR 5410**: Instalações elétricas de Baixa Tensão. Março, 2005.

[68] ANEEL. (Agência Nacional De Energia Elétrica). **REN 687**. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2017.

[69] ANEEL. (Agência Nacional De Energia Elétrica). **Outorgas e Registros de Geração**. 2021a. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiZjM4NjM0OWYtN2lwZS00YjViLTl1MjltN2E5MzBkN2ZlMzVkliwidCl6JjQwZDZmOWI4LWVjYtYtNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 23 jul. 2021a.

[70] ANEEL. (Agência Nacional De Energia Elétrica). **Sistema de Informações de Geração da ANEEL – SIGA**. 2021b. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjc4OGYyYjQ0YWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCl6JjQwZDZmOWI4LWVjYtYtNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 26 jun. 2021.

[71] RÜTHER, R. Um investimento = múltiplas funções: Desenvolvimento e Avaliação Técnica, Regulatória e Econômica de Sistemas de Armazenamento de Energia Aplicados a Sistemas de Geração Centralizada e Distribuída. In: **Workshop Minirredes de Geração e Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica** - 27 junho 2017. IEE/USP.

[72] CONFAZ (Conselho Nacional de Política Fazendária). **Convênio ICMS 16, de 22 de abril de 2015**. Disponível em <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/convenio-icms/2015/convenio-icms-16-15>. Acesso em: 10 jun. 2017.

[73] COPEL (Companhia Paranaense de Energia). **Normas Técnicas Copel**. NTC 905200: Acesso De Micro E Minigeração Distribuída Ao Sistema Da Copel (Com Compensação De Energia). Curitiba, 2021. Disponível em: [https://www.copel.com/hpcopel/root/ntcarquivos.nsf/E00A539C1F08DF2003257F69004DF8BC/\\$FILE/NTC%20905200%20Acesso%20de%20Micro%20e%20Minigera%C3%A7%C3%A3o%20Distribu%C3%ADda.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/root/ntcarquivos.nsf/E00A539C1F08DF2003257F69004DF8BC/$FILE/NTC%20905200%20Acesso%20de%20Micro%20e%20Minigera%C3%A7%C3%A3o%20Distribu%C3%ADda.pdf). Acesso em: 25 set. 2021.

SOBRE OS AUTORES

JULIANA D'ANGELA MARIANO é Professora Adjunta na NYIT – Vancouver e UNINTER. Doutora em Engenharia Civil pela UTFPR (2021) sob orientação do Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior; Mestra em Engenharia Civil pela UTFPR (2017), sob orientação do Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior; Graduada em Tecnologia em Eletrotécnica pela UTFPR (2010), sob orientação da Profa. Dra. Maria de Fátima Ribeiro Raia, e Técnica em Eletrotécnica (2007) pela UTFPR. É pesquisadora pela UTFPR no Grupo de Pesquisa em Energia Solar e Sistemas Fotovoltaicos (LABENS) e no Instituto Lactec. É professora no curso no programa de Master of Energy Management (MEM), no College of Engineering & Computing Sciences, na New York Institute of Technology (NYIT) em Vancouver - Canadá lecionando a disciplina de Tecnologias Avançadas de Baterias e Células Combustíveis (ENGY 745) e UNINTER no Brasil. Lecionou aulas no curso de pós-graduação em Energias Renováveis modo EaD (Educação à distância) na UNINTER, nas disciplinas de Fundamentos da Energia Solar e Sistemas Fotovoltaicos. Orientou e avaliou diversas monografias do curso de especialização em Energias Renováveis e Eficiência Energética da UTFPR - campus Curitiba. Atuou como pesquisadora voluntária no projeto de pesquisa para determinação do potencial de radiação solar e fotovoltaico no estado do Paraná, parceria entre ITAIPU / PTI / INPE / UTFPR. Atua regularmente como revisora (reviewer) para os seguintes periódicos: IET Renewable Power Generation e IEEE PES Transmission & Distribution Latin America. Tem experiência com projetos elétricos prediais, comerciais e industriais e de subestações. As principais áreas de atuação são: Energia Solar Fotovoltaica, Sistemas de Armazenamento de Energia, Energias Renováveis, Sustentabilidade e Educação Ambiental.

JAIR URBANETZ JUNIOR é Professor Titular na UTFPR. Doutor na área de Sistemas Fotovoltaicos pela UFSC (2010), sob orientação do Prof. PhD. Ricardo Rütther; Mestre em Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico pela UFSC (2002), sob orientação do Prof. PhD. Ivo Barbi; Especialista em Gerência da Engenharia de Manutenção pela UTFPR (1999), sob orientação da Profa. Dra. Andréa Lucia Costa; Graduado em Engenharia Industrial Elétrica pela UTFPR (1995) e Técnico em Eletrônica pela UTFPR (1986). É professor no Departamento de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná em Curitiba, desde 1996, onde atua nos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação. Também é Coordenador do Curso de Pós Graduação a nível de Especialização em Energias Renováveis e Professor no Programa de Pós Graduação em Sistemas de Energia (PPGSE) a nível de Mestrado, e no Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) a nível de Mestrado e Doutorado. É autor do livro ELETRÔNICA APLICADA lançado em 2010 pela Editora BASE, e do ATLAS DE ENERGIA SOLAR DO ESTADO DO PARANÁ, lançado em 2017. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica de Potência e Energia Solar Fotovoltaica. É pesquisador pela UTFPR no Grupo de Pesquisa em Energia Solar e Sistemas Fotovoltaicos, no Grupo de Pesquisa em Eletrônica de Potência e no Grupo de Pesquisa Tecnologia e Meio Ambiente. Pela UFSC é pesquisador no Grupo de Pesquisa Estratégica em Energia Solar. Colabora na coordenação do Laboratório de Energia Solar – LABENS da UTFPR e atua como pesquisador no projeto de pesquisa para determinação do potencial de radiação solar e fotovoltaico no estado do Paraná, parceria entre ITAIPU / PTI / INPE / UTFPR. Revisor dos periódicos Revista SODEBRAS e Revista

Brasileira de Energia.

DANKA FARIAS DE OLIVEIRA - Responsável pela arte e ilustração do livro, é graduanda em Design - Bacharel (UTFPR). Trabalha com ilustração e produz para publicações tanto digitais quanto impressas, geralmente relacionadas a seus interesses, como cultura, sustentabilidade e moda.

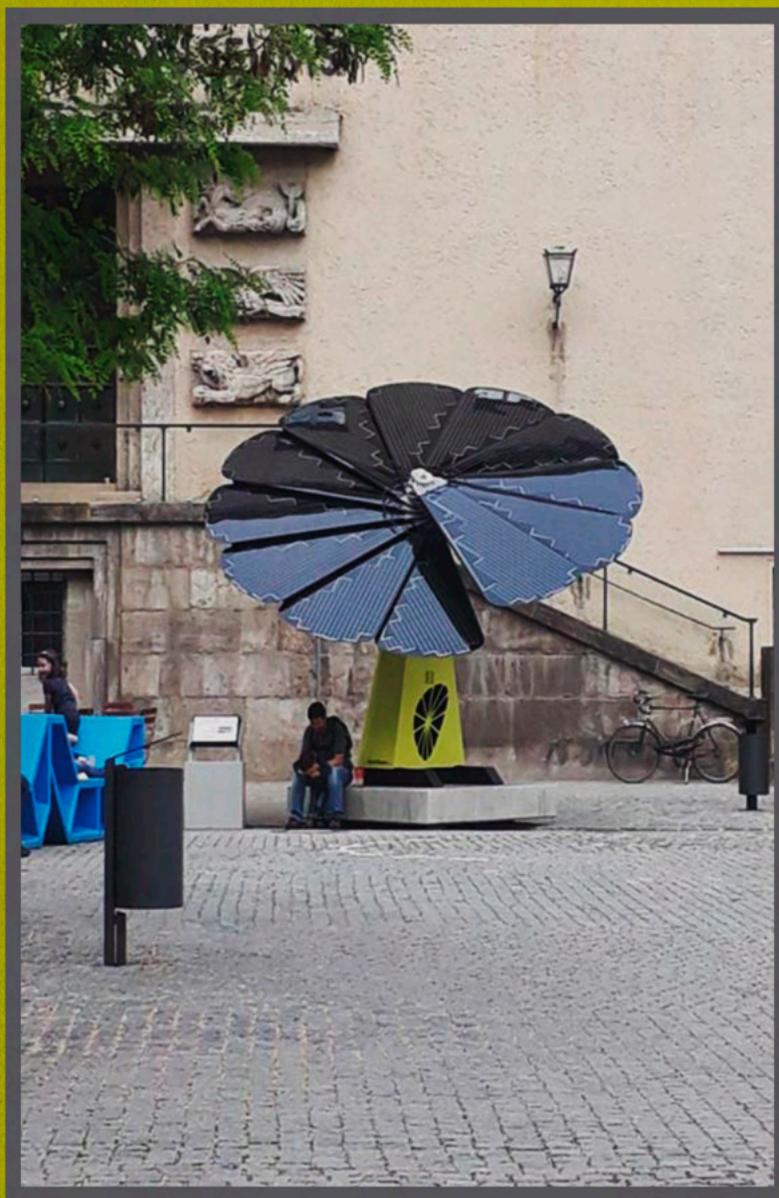
Energia Solar Fotovoltaica: Princípios fundamentais



🌐 www.atenaeditora.com.br
✉ contato@atenaeditora.com.br
📷 @atenaeditora
📘 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Atena
Editora
Ano 2022

Energia Solar Fotovoltaica: Princípios fundamentais



🌐 www.atenaeditora.com.br
✉ contato@atenaeditora.com.br
📷 @atenaeditora
📘 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Atena
Editora
Ano 2022