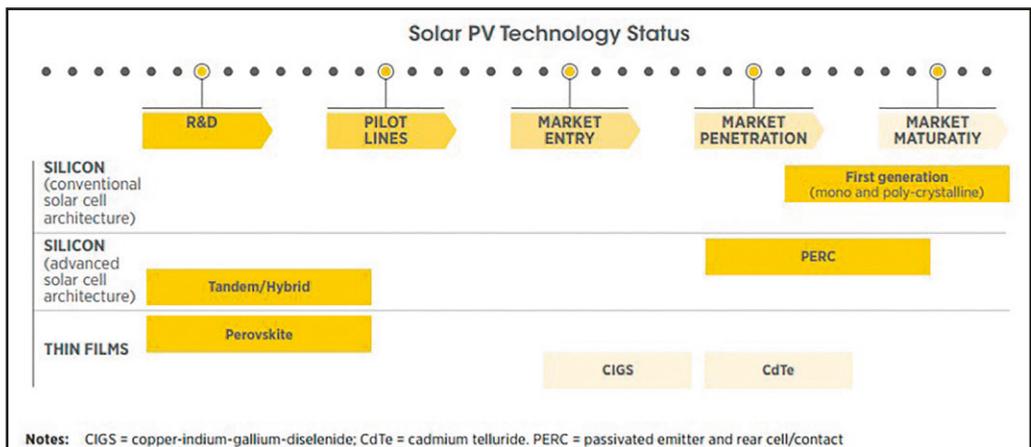


## PRODUÇÃO DE ENERGIA

### 2.1 EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS

A Figura 2.1 mostra o estado atual das diferentes tecnologias fotovoltaicas.

Figura 2.1 Estado atual das diferentes tecnologias fotovoltaicas (IRENA, 2019)



### 2.1.1 Silício - Primeira geração

Observa-se que o silício na sua arquitetura convencional é a tecnologia de maior maturidade e segundo pesquisas do instituto Fraunhofer em 2017 detinham 95 % da produção fotovoltaica mundial (ISE, 2019). Os módulos FV têm melhorado substancialmente sua eficiência e potência ao longo dos anos. A eficiência média de um painel fotovoltaico multicristalino era de 13,2 % e 14,7 % para painéis monocristalinos, desde então, aumentou constantemente, chegando a 17 % e 18 %, respectivamente (IRENA, 2019).

### 2.1.2 Arquitetura avançada do Silício

Dentro da arquitetura avançada do silício encontram-se os módulos de tecnologia PERC (*Passivated Emitter Rear Cell/Contact*) e os de células híbridas ou em tandem.

#### PERC

PERC em português significa “Emissor Passivado na Célula (ou contato) Traseira”, isto é, possui uma camada adicional de passivação na parte traseira da célula. Esta camada de passivação, além de gerar reflexão no fundo da célula fazendo com que o raio passe mais vezes pelo silício – e assim gere mais energia – também reduz a velocidade de recombinação dos elétrons, fazendo com que a célula se torne mais eficiente que uma célula padrão. Assim, os módulos PERC são mais eficientes e têm menos perdas a altas temperaturas (Greener, 2019).

A PERC começou recentemente a entrar na arena comercial, mas rapidamente se tornou o novo padrão da indústria para células monocristalinas. Vários fatores facilitaram esse progresso notável, incluindo a grande mudança do mercado para células monocristalinas, a melhoria da confiabilidade e a produtividade das ferramentas de produção, o que conseqüentemente melhorou a qualidade da passivação dos filmes e o momento real em P&D criado pelo grande número de fabricantes atualmente ativos na produção de PERC (IRENA, 2019).

#### Células tandem

As células tandem são um conjunto de células individuais, uma em cima da outra, onde cada uma converte seletivamente uma faixa específica de luz em energia elétrica, deixando a luz restante ser absorvida e convertida em

eletricidade na célula abaixo. Existem vários tipos de células em tandem que podem ser agrupadas, dependendo principalmente dos materiais utilizados (por exemplo, orgânicos, inorgânicos, híbridos), bem como do tipo de conexão usada. A abordagem de células tandem foi usada para fabricar as células solares mais eficientes do mundo, que podem converter 46 % da luz solar em eletricidade. Porém, esses dispositivos usam materiais e processos de fabricação muito caros, e ainda não conseguem entrar no mercado (Cherradi, 2019).

### 2.1.3 Filme Fino (*Thin film*)

A tecnologia de filme fino (do inglês *thin film*) é frequentemente chamada de tecnologia solar FV de segunda geração. Os materiais semicondutores usados para produzir células de filme fino têm apenas alguns micrômetros de espessura (IRENA, 2016). Essas tecnologias geralmente incluem duas famílias principais: 1) filme fino à base de silício (silício amorfo [a-Si] e micromorfo [a-Si / c-Si]) e 2) não baseado em silício (perovskitas, telureto de cádmio [CdTe] e cobre-índio-gálio-diselenida [CIGS]). Essas tecnologias podem ser mais baratas de produzir, pois estão sendo implementadas em escala comercial, mas historicamente apresentam níveis mais baixos de eficiência (IRENA, 2019). No final de 2017 esta tecnologia contava apenas com 5 % do mercado FV mundial (ISE, 2019).

#### Perovskita

O primeiro dispositivo de perovskita desenvolvido em 2009 tinha uma eficiência de 3,8 %; porém, graças à facilidade de fabricação dos cristais em 2018 atingiu 24,2 % de eficiência em laboratórios dos Estados Unidos e da Coreia do Sul, um resultado próximo do recorde em laboratório do silício (26,7 %). Apesar desse registro, isto foi alcançado apenas em pequenas amostras e a tecnologia ainda tem alguns desafios a frente antes de atingir a maturidade no mercado. Alguns destes desafios são a durabilidade e reprodução de células grandes com alta eficiência. Se essas barreiras puderem ser superadas, as células de perovskitas têm o potencial de alterar a dinâmica e a economia da energia solar, porque são mais baratas de produzir do que as células solares e podem ser produzidas a temperaturas relativamente baixas, diferentemente do silício (IRENA, 2019).

## Células de seleneto de índio e gálio e cobre (*CIGS - Copper indium gallium selenide cells*)

As células CIGS alcançaram altos níveis de eficiência (23,4 %) comparáveis ao silício cristalino comercial (ISE, 2019). No entanto, a fabricação de células CIGS pode ser difícil devido à raridade do índio, bem como à estequiometria complexa e as várias fases para produzi-las, restringindo a produção em larga escala no curto prazo (Cherradi, 2019).

## Telureto de cádmio (*CdTe*)

As células de telureto de cádmio atingiram uma eficiência de 21 %, muito semelhante ao CIGS, e são caracterizadas por boa absorção e baixas perdas de energia. As células solares CdTe são produzidas através de processos de baixa temperatura, o que torna sua produção muito flexível e acessível. No final de 2017, o CdTe possuía a maior participação de mercado de todas as tecnologias de filmes finos (ISE, 2019).

## 2.2 TECNOLOGIA AVANÇADA DE MÓDULOS

O surgimento de novas arquiteturas de células permitiu níveis mais altos de eficiência. Um dos principais fatores dessa mudança foi o surgimento das células PERC e sua compatibilidade com outras inovações, como as células cortadas pela metade (*half cut cells*). Olhando para o futuro, a mudança tecnológica mais importante do mercado está relacionada às células e módulos bifaciais, impulsionada pela crescente adoção de arquitetura avançada de células e pelo foco nos níveis de produção do sistema.

### 2.2.1 Células bifaciais

As células solares bifaciais estão em desenvolvimento há décadas e seu processo de fabricação pode ser considerado um dos mais avançados para módulos solares atualmente. As células bifaciais são capazes de gerar eletricidade não apenas da luz solar recebida em sua frente, mas também da luz solar refletida recebida no lado oposto da célula. Atualmente a China é o maior fabricante de, e o maior mercado final para módulos bifaciais. A demanda mundial também aumentou, com países como Estados Unidos, Brasil e Reino Unido aumentando o uso de módulos bifaciais para usinas fotovoltaicas em

escala de concessionária. Com base na atual tendência do mercado, os módulos bifaciais estão estendendo seu alcance geográfico da Europa e do Japão para os mercados emergentes e em todo o mundo (ISE, 2019). Apesar do crescimento e das vantagens das células bifaciais, a tecnologia ainda tem alguns obstáculos a serem superados, como a falta de um padrão internacional de teste, nenhum terreno comum para etiquetagem ou preço de energia e problemas de simulação e de rentabilidade.

Um tipo de módulo bifacial é o módulo vidro-vidro. Estes são painéis solares com células solares dispostas entre dois painéis de vidro. Eles geralmente são aplicados a sistemas de escala de utilidade e fornecem uma solução de trabalho pesado para ambientes agressivos (por exemplo, altas temperaturas, alta umidade) porque são menos sensíveis à penetração de umidade. A tecnologia já está em desenvolvimento há décadas, mas seu alto custo e peso têm sido uma barreira no seu desenvolvimento.

### **2.2.2 Meias células**

As meias células envolvem o corte deliberado de uma célula totalmente processada pela metade com máquinas a laser muito avançadas. As meias células estão sendo adotadas rapidamente, graças ao fato de que, do ponto de vista da fabricação, são necessárias apenas pequenas alterações para incluir as máquinas a laser. As meias células melhoram o desempenho e a durabilidade do módulo e podem fornecer um aumento instantâneo de energia de 5 a 6 W. Graças à integração do PERC, a tecnologia de corte ao meio obteve eficiências de até 18 % e potências de até 300 W (ISE, 2019).

### **2.2.3 Barramentos múltiplos**

As células solares de silício são metalizadas com tiras finas impressas na frente e na traseira de uma célula solar; estes são chamados barramentos e têm o objetivo de conduzir a corrente elétrica (DC) gerada pela célula. As células mais antigas geralmente tinham dois barramentos; no entanto, o setor avançou em direção a maior eficiência e os barramentos aumentaram para três (ou mais) na maioria das células solares. O aumento do número de barramentos tem várias vantagens: primeiro, o alto potencial de economia de custos devido à redução no consumo de metal na metalização de fachadas; segundo, as perdas de resistência em série são reduzidas empregando fios finos em vez de fita comum; e terceiro,

otimizar a largura dos barramentos leva a um aumento adicional na eficiência. Um número maior de barramentos leva a maior eficiência do módulo devido à redução das perdas de resistência interna; isso se deve à menor distância entre os barramentos (ISE, 2019).

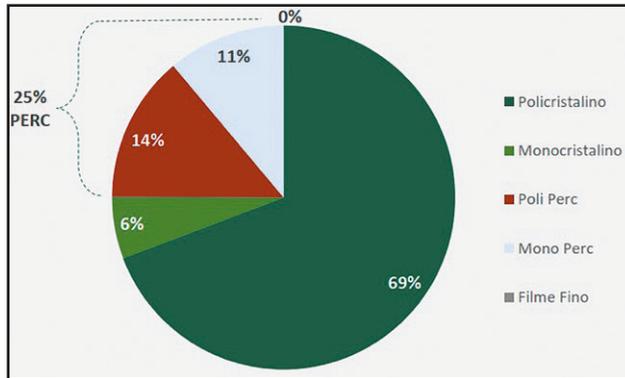
## **2.2.4 Telhas solares**

As telhas solares são um tipo de solução de energia solar em que os painéis solares são projetados para se parecerem com materiais de cobertura convencionais, além de produzir eletricidade. As telhas solares têm várias vantagens. Primeiro, uma vantagem importante é que eles eliminam a necessidade de fita, conectando células como telhas. Segundo, e relacionado à remoção da fita, a estética do módulo é aprimorada, pois os painéis são coloridos de maneira homogênea. Terceiro, ao contrário de uma célula padrão, as células dos módulos de telha têm barramentos em extremidades opostas e as células são cortadas em várias tiras, o que reduz a corrente e, conseqüentemente, a carga nos dedos (dedos metálicos super finos, perpendiculares ao barramento, coletando a corrente contínua e entregando-a aos barramentos). Isso também permite uma redução no número de dedos, bem como em sua espessura, o que diminui o sombreamento e melhora a potência de saída da célula (ISE, 2019).

## **2.3 DISTRIBUIÇÃO DAS TECNOLOGIAS NO MERCADO BRASILEIRO**

Segundo pesquisa de Greener, no segundo trimestre de 2019 os 25 % do total de potência importada de módulos fotovoltaicos foi da tecnologia PERC. No primeiro trimestre a potência importada desta tecnologia foi 13 % (Greener, 2019). Na Figura 2.2 observa-se a distribuição por tipo de tecnologia dos módulos fotovoltaicos que foram importados no segundo trimestre de 2019.

Figura 2.2 Distribuição por tipo de tecnologia de módulos fotovoltaicos importada no segundo trimestre de 2019 (Greener, 2019)



## 2.4 APLICAÇÕES E ARQUITETURAS

A natureza modular dos sistemas fotovoltaicos permite aplicações numa faixa muito ampla de potências. Assim, há aplicações desde poucos mW em calculadoras digitais científicas, de alguns kW, para o suprimento de energia em áreas urbanas ou isoladas, até dezenas de MW nas grandes centrais fotovoltaicas.

O custo dos sistemas fotovoltaicos tem diminuído nos últimos anos, isto tem influenciado no aumento de instalações ao redor do mundo. No caso específico dos módulos fotovoltaicos os custos diminuíram rapidamente entre 2010 e 2013 e a partir daí continuaram diminuindo em uma proporção mais baixa (IRENA, 2019). Na Figura 2.3 podem ser observados os preços médios de módulos fotovoltaicos na Europa por tecnologias desde janeiro de 2010 até julho de 2018. Cabe ressaltar que os preços de todos os módulos disponíveis em 2018 estão abaixo dos 0,5 USD/W. A Figura 2.4 mostra os preços médios anuais de módulos FV em diferentes países entre 2013 e 2018. Observa-se uma diminuição do preço em todos os mercados, sendo a França o país onde os preços dos módulos mais diminuíram (64 %) e a África do Sul é o país onde menos diminuiu o preço, apenas 16 % e o valor está acima dos 0,5 USD/W, ao igual que no Japão e no Canadá.

Na Figura 2.5 se mostram os custos totais de instalação de sistemas FV em escala de usinas junto com suas médias globais para o período 2010-2018. Os custos médios caíram 74 % entre 2010 e 2018 e de forma geral os custos tendem a convergir em torno à média como se observa na figura, a diferença entre o 5º e o 95º percentil tem diminuído com o passar dos anos.

A Figura 2.6 ilustra as tendências de custo total de instalação de sistemas fotovoltaicos, conforme a escala de usina, em diferentes países entre 2010 e 2018. O país no qual mais se diminuiu o custo de instalação foi a Índia, com uma redução de 84 %, além disso é o país com os menores custos de instalação (793 USD/kW), como é possível observar na Figura 2.7, onde apresentam-se de forma detalhada os custos totais de instalação, conforme a escala de usina dos países do G20.

A Figura 2.8 e a Figura 2.9 mostram respectivamente média ponderada global do custo nivelado de energia (LCOE do inglês *Levelized Cost of Energy*) para usinas fotovoltaicas desde 2010 até 2018 e a tendência da média ponderada do LCOE em vários países no mesmo período. A média ponderada global para 2018 foi de 0,09 USD/kWh, 77 % menos que os 0,37 USD/kWh de 2010.

Figura 2.3 Preços médios mensais dos módulos fotovoltaicos na Europa por tecnologia e fabricante do módulo de janeiro de 2010 a julho de 2018 (IRENA, 2019)

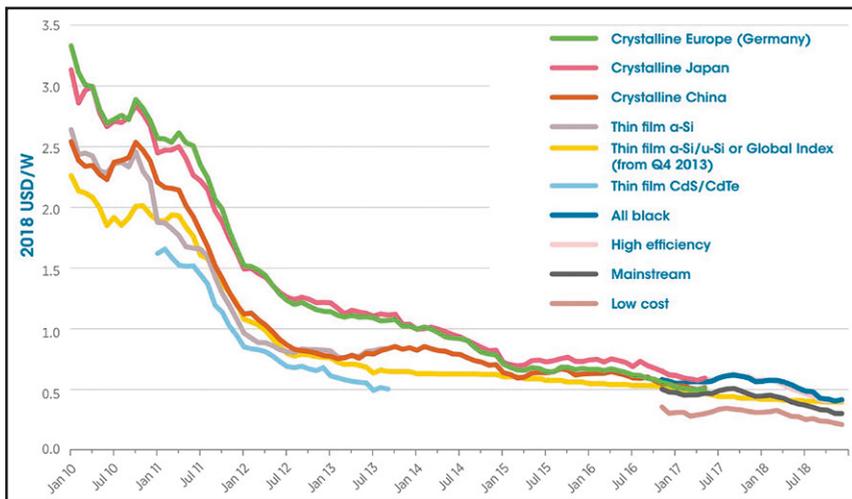


Figura 2.4 Preços médios anuais de módulos FV por mercado entre 2013 e 2018 (IRENA, 2019)

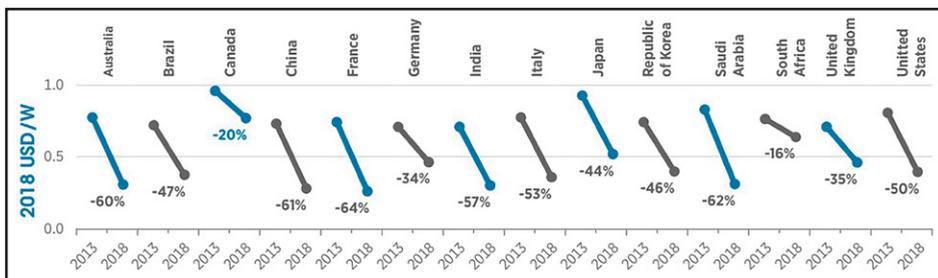


Figura 2.5 Custo total de instalação para projetos de energia solar fotovoltaica em escala de usina e média global, 2010–2018 (IRENA, 2019)

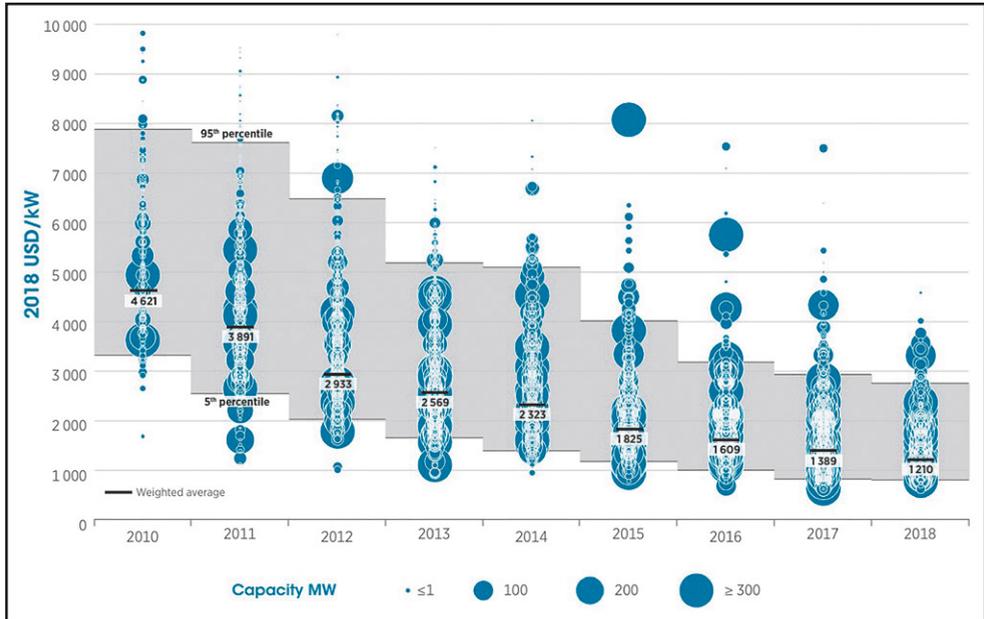


Figura 2.6 Tendências de custo total de instalação de energia solar fotovoltaica em escala em países selecionados, 2010–2018 (IRENA, 2019)

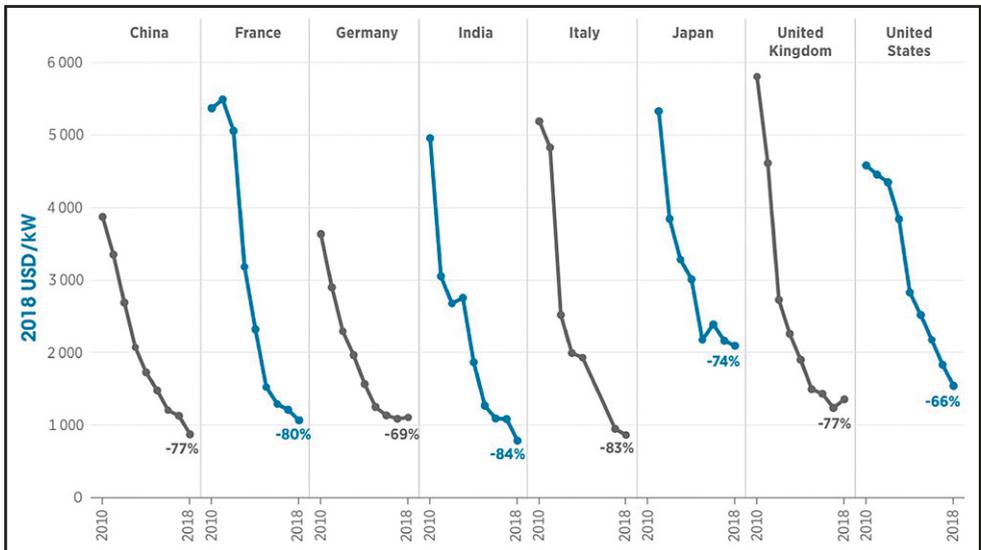


Figura 2.7 Repartição detalhada dos custos totais de energia solar fotovoltaica em escala de usina nos países do G20, 2018 (IRENA, 2019)

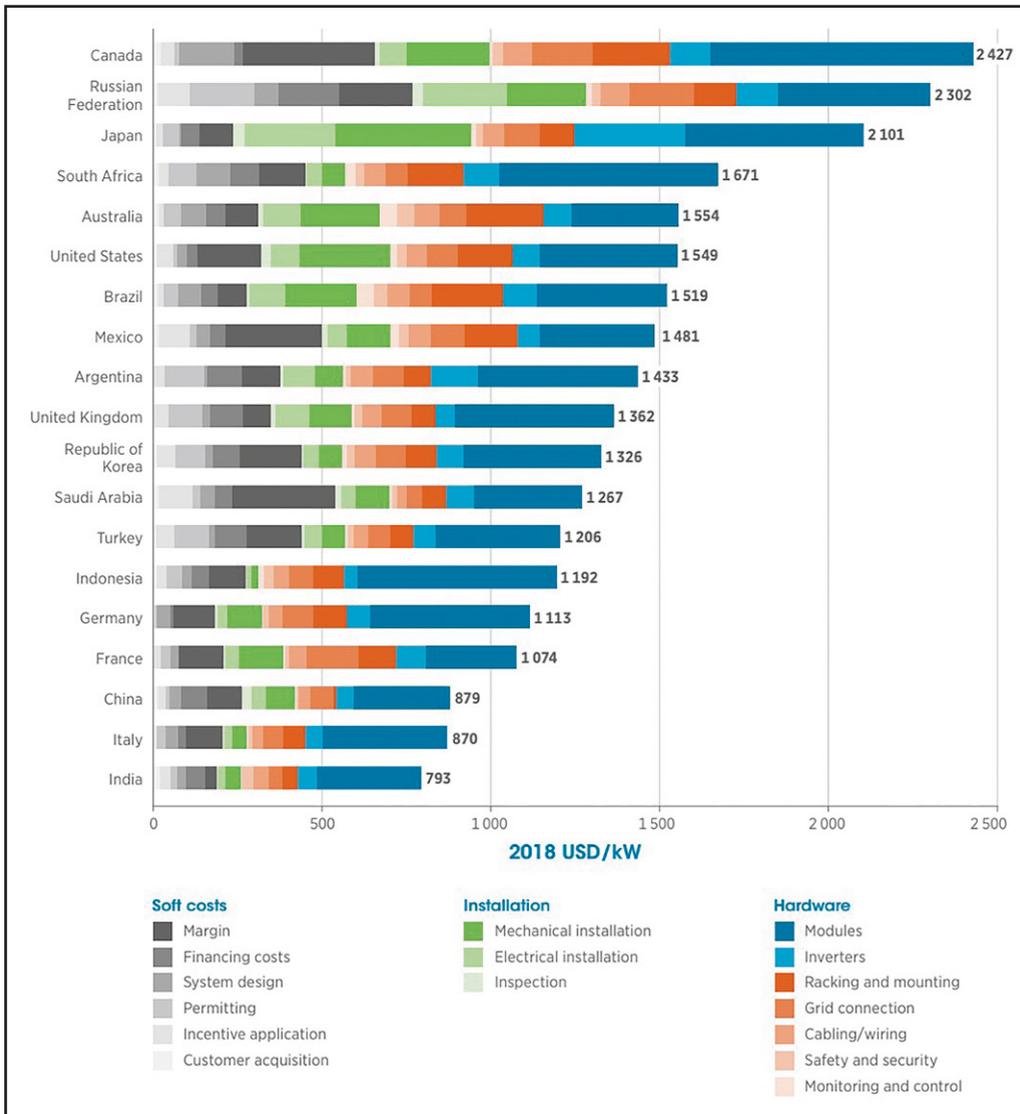


Figura 2.8 LCOE de projetos fotovoltaicos solares em escala de usina e média ponderada global, 2010–2018 (IRENA, 2019)

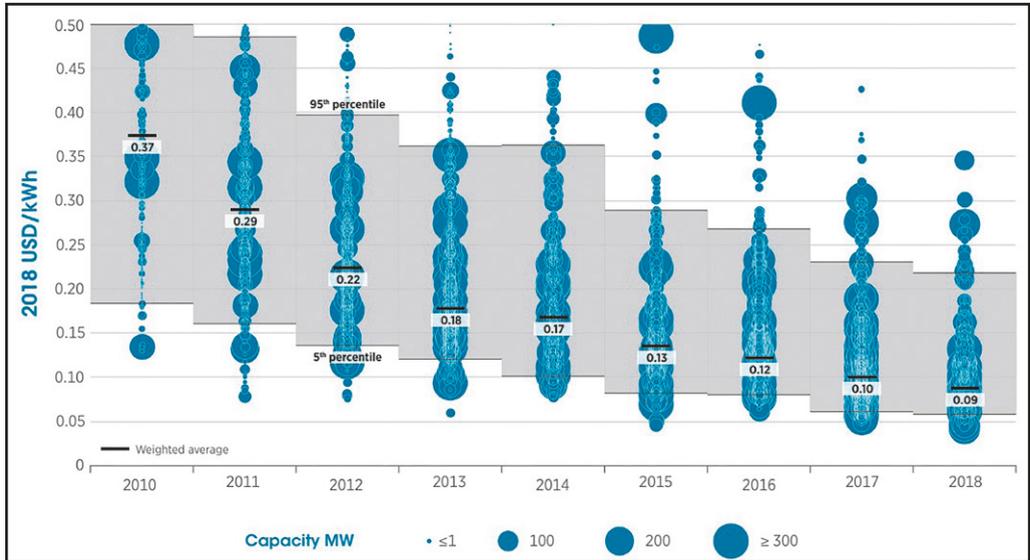
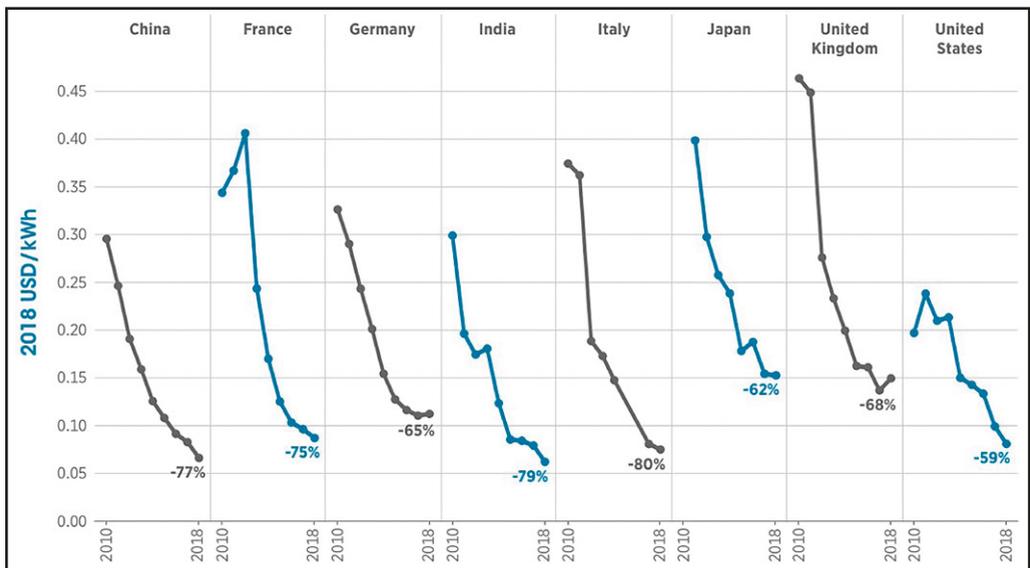


Figura 2.9 Tendências médias ponderadas de LCOE de energia solar fotovoltaica em escala de usina em países selecionados, 2010-2018 (IRENA, 2019)



No início do século XXI um quarto da população mundial não tinha acesso à energia elétrica e foi, nessa área, que a tecnologia fotovoltaica apresentou grande avanço tendo conseguido suprir milhões de pequenos consumidores residenciais situados em regiões afastadas da rede pública de energia elétrica. Ainda, nas grandes cargas de zonas industriais, essa modalidade de produção de energia atendeu demandas que não poderiam o ser pela rede pública, destacando-se aplicações no Japão, na Alemanha e na Califórnia.

É oportuno dividir as instalações fotovoltaicas em duas grandes famílias:

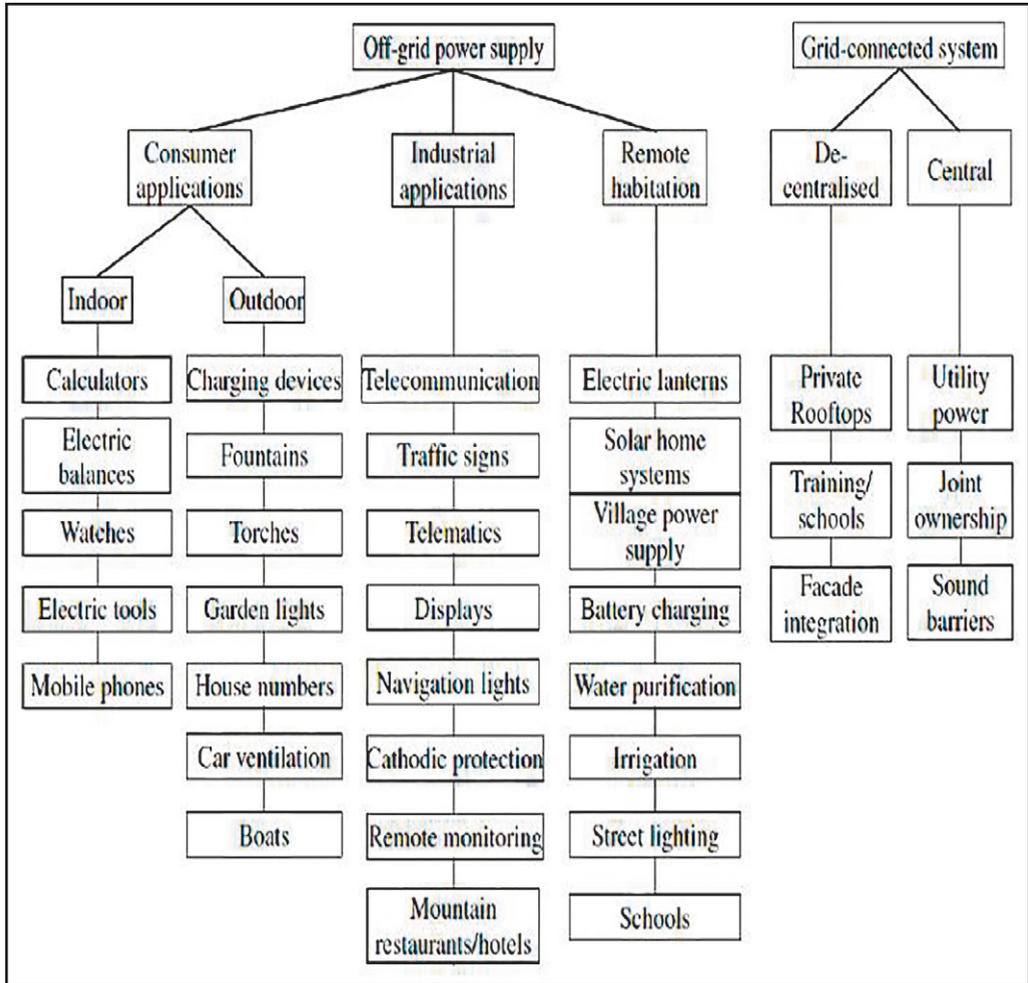
***Instalações isoladas:*** trata-se de instalações que não se conectam a redes públicas de distribuição de energia. Neste caso a energia produzida é absorvida localmente (“*stand-alone*”);

***Instalações conectadas à rede:*** trata-se de instalações que se conectam a uma rede de distribuição pública (“*grid-connect*”).

Enquanto os sistemas isolados são somente de pequeno porte, as instalações interligadas com a rede pública podem apresentar qualquer quantidade de potência, podendo ser uma micro usina de alguns poucos kW, instalada em uma unidade residencial, até uma grande usina, com dezenas ou mesmo centenas de MW, conectada ao sistema de distribuição ou mesmo ao de transmissão.

Na Figura 2.10 apresenta-se uma visão do conjunto de aplicações das instalações fotovoltaicas para as duas áreas definidas.

Figura 2.10 Áreas de aplicação para os sistemas fotovoltaicos.  
 Fonte: (Institute for Energy and Transport (Joint Research Centre), 2009)



### Sistemas fotovoltaicos isolados

Uma instalação fotovoltaica para produzir energia elétrica é constituída essencialmente do seguinte:

- Conjunto de painéis fotovoltaicos interligados, também definido por campo fotovoltaico, que absorve a luz solar e a converte em energia elétrica;
- Equipamentos eletrônicos destinados à estabilização, conversão e adequação da energia transferida à rede ou aos usuários;

- Suporte mecânico para a fixação dos painéis com orientação geograficamente adequada;
- Opcionalmente, sistema mecânico automático para permitir a orientação contínua dos painéis em relação ao sol para operar com a máxima incidência da luz solar direta;
- Sistema de acumulação da energia e gerenciador de carga.

Este tipo de sistema, por não estar conectado a uma rede de distribuição, não pode prescindir de um sistema de acumulação da energia elétrica de modo a garantir o suprimento durante a noite, em dias chuvosos e em dias de irradiação insuficiente.

Na Figura 2.11 apresenta-se uma instalação para o suprimento de um veleiro, que é um caso típico de sistema fotovoltaico isolado.

Figura 2.11 Exemplo de pequena instalação contando com dois painéis



O conjunto dos painéis solares utilizados na instalação é designado, usualmente, por campo fotovoltaico. Para as instalações isoladas, o campo fotovoltaico é otimizado para um valor específico da tensão em corrente contínua, por exemplo: de 12 ou 24 V. Conforme o inversor utilizado, os painéis solares devem ser associados em série ou paralelo para compatibilizar a tensão da associação com a do inversor.

O gerenciador de regulador de carga é um dispositivo eletrônico que tem, fundamentalmente, as funções de conectar e desconectar as baterias do acumulador para otimizar o armazenamento e o atendimento da demanda em períodos onde a produção de energia pelo campo solar é superior ou inferior à demandada pela carga, ou em situações de carga plena na bateria ou ainda se a bateria estiver fora de serviço por falha.

O acumulador é constituído de baterias ou elementos especificamente projetados para suportar ciclos repetitivos de carga – descarga. Nas instalações em que se exige continuidade de serviço mesmo em condições extremas, as baterias de uso automobilístico não são adequadas porque suportam um número pequeno de ciclos de carga – descarga, e exigem atenção para evitar que o eventual vazamento do eletrólito, que é uma solução alcalina altamente corrosiva, cause danos. Nas baterias projetadas para estas aplicações, em geral, o eletrólito líquido é substituído por um gel especial.

## Sistemas solares habitacionais

Um sistema solar habitacional – Solar Home System, SHS – está composto por painéis solares e baterias com um regulador de carga e, na hipótese de se necessitar de corrente alternada, de um inversor. Atualmente, há centenas de milhões de sistemas solares habitacionais instalados ao redor do mundo, atendendo consumidores isolados.

## Sistemas híbridos

Os sistemas isolados que suprem edifícios, usualmente, dispõem de um sistema de acumulação e de uma fonte alternativa de energia constituída por conjunto motor diesel-alternador. Estes sistemas são conhecidos como *sistemas híbridos*.

Devido às descontinuidades da irradiação solar ao longo do ano, os sistemas híbridos são vantajosos, pois garantem o fornecimento continuado de energia sem que haja necessidade de grandes instalações de armazenamento. É usual integrar painéis solares com motogeradores a diesel e, eventualmente, também com baterias. Durante a noite ou em dias sem intensidade solar suficiente, a demanda é suprida pela energia armazenada nas baterias e quando essa energia se esgota, o grupo diesel entra em operação. É comum haver um sistema de gestão do despacho das várias fontes geradoras que integram um sistema híbrido, que

por vezes apresentam diversos tipos de geradores como solar, eólico e diesel, para otimizar a oferta conforme os requisitos da carga.

## **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede**

Esta família de sistemas refere-se àqueles consumidores que já estando conectados à rede pública de energia elétrica se valem da instalação fotovoltaica para consumo próprio, injetando o excedente na rede. A instalação fotovoltaica deve ter sua tensão convertida em alternada, compatível e sincronizada com a da rede, de modo a injetar a energia excedente.

Os componentes principais de uma instalação fotovoltaica conectada a uma rede em corrente alternada são:

- Campo fotovoltaico constituído por painéis solares convenientemente orientados para otimizar o rendimento da captação da irradiação solar;
- Inversor, que é um equipamento eletrônico que converte a corrente contínua produzida pelos painéis solares em corrente alternada com tensão compatível com a da rede pública;
- Conjunto de proteção e controle a ser definido em consonância às exigências locais. Este componente pode estar integrado ao inversor;
- Cabos de conexão entre o inversor e a rede com isolamento adequada às radiações ultravioleta e à temperatura.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede podem, ainda, ser subclassificados em

- Micro ou Minissistemas fotovoltaicos conectados à rede;
- Grandes sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

que serão objeto de detalhamento nos itens subsequentes.

## **Micro ou Minissistemas fotovoltaicos conectados à rede**

Estes sistemas cobrem uma faixa de potência reduzida sendo, usualmente, instalados no telhado de edificações, em pontos de ônibus, estacionamentos de edifícios comerciais, ou mesmo integrados à fachada da edificação.

No caso geral, face à pequena potência que dispõem e à capacidade de armazenamento ou absorção da rede pública, esses sistemas não contam com acumulação de energia. Assim, nos dias de sol a unidade habitacional tem sua demanda suprida pelos painéis solares e a energia excedente é injetada na rede, evidentemente, quando a demanda supera a produção dos painéis solares o suprimento é feito pela rede pública, como ocorre, durante a noite ou nos dias sem sol.

## Grandes sistemas fotovoltaicos conectados à rede

Os sistemas desta classe alcançam potência instalada da ordem de 1 MW ou mais e são conectados diretamente à rede de média ou alta tensão. O esquema principal é constituído pelo campo fotovoltaico e pelo inversor.

Normalmente estas centrais elétricas fotovoltaicas são instaladas onde há disponibilidade de área, por exemplo em regiões rurais ou em grandes galpões.

Nesta classe destacam-se ainda, os sistemas fotovoltaicos arquitetonicamente integrados onde o campo fotovoltaico funciona como parte do próprio edifício. Dentre as principais técnicas de integração são:

- Substituição das telhas da cobertura por um revestimento apto a receber a sobreposição do campo fotovoltaico;
- Utilização de tecnologias adequadas à integração, como os filmes finos;
- Utilização de painéis solares estruturais que integram a função de fechamento de fachada.

## Valores nominais dos sistemas fotovoltaicos

As principais características técnicas de uma instalação fotovoltaica são:

- **Potência nominal**, que é a soma das potências nominais de cada um dos painéis solares que compõe o campo fotovoltaico e é medida em Wp (watts pico) ou em algum dos seus múltiplos (kWp, MWp etc.);
- **Superfície ocupada**, que é a soma das áreas ocupadas pelo campo solar, e demais instalações associadas, como inversor, casa de comando, corredores para manutenção e montagem, além da área dedicada a evitar áreas de

sombra sobre os painéis etc. A área ocupada por uma instalação fotovoltaica é, via de regra, maior que aquela ocupada pelos painéis que a compõem, pois quando a montagem dos painéis é coplanar deve-se adicionar áreas para compensar a existência de cones de sombra produzidos por obstáculos nas cercanias ou no próprio campo, por exemplo: chaminés e antenas de televisão. Quando se trata de superfícies inclinadas, na qual os painéis são montados de modo não coplanar, deve-se levar em conta a sombra que pode ser produzida por aqueles em posição mais alta sobre os de posição mais baixa. Neste último caso a superfície necessária é cerca de 2,5 vezes maior que a do caso coplanar;

- **Área específica típica**, a cada tecnologia utilizada há uma área específica associada. Assim, para a tecnologia utilizando silício cristalino essa área é cerca de  $8 \text{ m}^2/\text{kW}$ , quando os painéis estão ortogonais aos raios solares, sendo maior esse valor à medida que os painéis se distanciam dessa direção. Para a tecnologia de silício amorfo a área específica é mais de  $20 \text{ m}^2/\text{kW}$  e para a tecnologia de CIS a área é  $9 \text{ m}^2/\text{kW}$ . Nas instalações em terreno plano ou sobre um telhado plano é prática corrente distribuir, geometricamente, o campo em diversas filas que são oportunamente sobre-elevadas na direção do sol de modo a garantir a máxima irradiação incidente sobre os painéis;
- **Energia produzida** é função da exposição da instalação ao sol, sendo quanto maior quanto for a captação de irradiação. A irradiação solar é função da heliofania, parâmetro meteorológico que mede a duração média da incidência solar em uma localidade ou zona específica; é medida em horas ou em porcentagem. Assim, a heliofania é máxima com determinados ângulos, medidos em relação ao plano horizontal no solo. A captação pode ser maximizada se houver um sistema para acompanhamento do deslocamento do sol, isto é, com variação contínua da posição do painel de modo a receber os raios de luz solar sempre perpendicularmente ao plano do painel.

Em ambas as configurações, instalação isolada ou conectada, o único componente exposto ao sol é o campo fotovoltaico. Os demais componentes, regulador de carga, inversor, baterias de acumulação, são instalados em locais convenientes abrigados das intempéries.

## 2.5 TECNOLOGIA E EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS

### 2.5.1 Tecnologias de conversão

A utilização da energia solar se baseia em métodos de captação da energia térmica ou luminosa disponível no espectro solar e na sua transformação em outras formas de energia.

Atualmente conta-se com as seguintes tecnologias para conversão da energia solar em outra forma de energia:

#### **Solar passivo**

A tecnologia solar passivo é aplicada especificamente na construção civil, constituindo-se em métodos e soluções arquitetônicas que visam desfrutar da insolação recebida por uma edificação para reduzir suas necessidades energéticas, destacando-se a importância da inércia térmica dos materiais utilizados e o uso da energia luminosa para produzir o aclaramento adequado dos interiores durante o período do dia.

#### **Solar térmico**

Num sistema solar térmico, dispõe-se de coletores solares que usam a energia térmica do sol para produzir água quente que é armazenada para utilização em instalações hidráulicas em aplicações residenciais, comerciais ou industriais.

Estudos desenvolvidos demonstraram que o retorno do investimento energético para sistemas deste tipo se dá em alguns meses, período muito menor do que a vida útil dessas instalações.

#### **Solar termodinâmica**

A tecnologia solar termodinâmica, por sua vez, dispõe de coletores solares que se valem da energia térmica do sol para produzir fluido a alta temperatura, utilizado em processos termodinâmicos “clássicos”.

Os raios solares são concentrados através de um espelho parabólico sobre um fluido, no interior de um captor cilíndrico, que atinge temperatura muito alta. Esse fluido é conduzido a um trocador de calor que produz vapor, que por sua vez, aciona uma turbina acoplada a um alternador que produz energia elétrica.

Ao invés do sistema de espelho parabólico, os raios solares podem ser concentrados sobre um tubo receptor através de espelhos sincronizados com o movimento do sol buscando a irradiação máxima. Trata-se de uma tecnologia que não está

isenta de problemas de projeto tais como a movimentação dos espelhos em direção ao sol e de sua limpeza visto que se vale tão somente da radiação solar direta.

Atualmente o custo do kWh produzido com esta tecnologia é superior ao das fontes energéticas clássicas com combustível fóssil, entretanto espera-se que esse custo possa se tornar competitivo se esses dispositivos forem produzidos em larga escala.

Em todos os outros casos a energia solar é convertida em energia térmica com a produção de calor a baixa temperatura, menor que 100 °C, a média temperatura, na faixa entre 100 e 250 °C ou, finalmente, a alta temperatura, na faixa de 250 a 1000 °C.

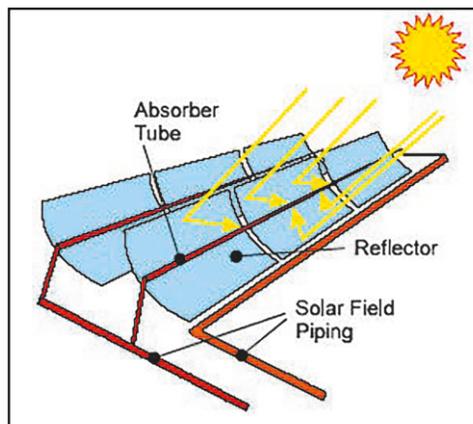
A produção de calor a baixa temperatura destina-se a instalações de uso doméstico e ocorre, principalmente, através de coletores que podem ser revestidos de vidros ou através de coletores constituídos por tubulação a vácuo, para minimizar as perdas, quando a temperatura supera 60 °C.

Grande potencial ainda pouco explorado é representado pela produção de vapor à média temperatura, de até 250 °C. Tal energia calorífica poderia ser utilizada em instalações industriais, inclusive para alimentar máquinas de absorção para o resfriamento.

Por fim a energia térmica a alta temperatura é a utilizada para a produção de energia elétrica por meio de quatro tecnologias desenvolvidas:

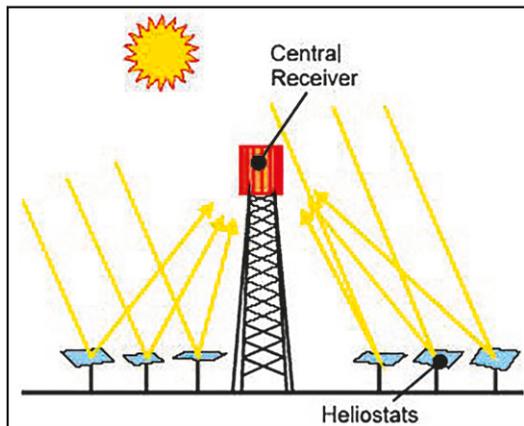
- Sistemas a espelhos parabólicos lineares – “*Parabolic trough*” – que se caracterizam por concentrar a energia solar através de sistema de espelhos parabólicos sobre tubos que correm pelo seu interior, ilustrado na Figura 2.12;

Figura 2.12 Espelhos parabólicos lineares. Fonte: (Consoli, 2012)



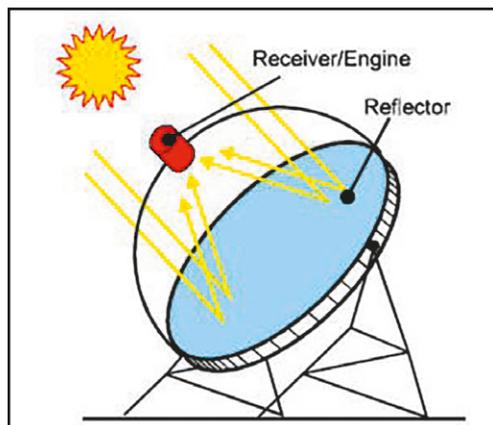
- Sistemas a torre central – “*Tower Power*” – que utiliza um conjunto de espelhos que se orientam em relação ao sol – heliostatos – de modo a captarem a máxima radiação solar. A energia captada é refletida para um receptor no topo de uma torre. Um fluido para a transferência de calor, que é aquecido no receptor, permite, por meio de um trocador de calor, gerar vapor de água para o acionamento da turbina, conforme mostrado na Figura 2.13;

Figura 2.13 Sistemas a torre central. Fonte: (Consoli, 2012)



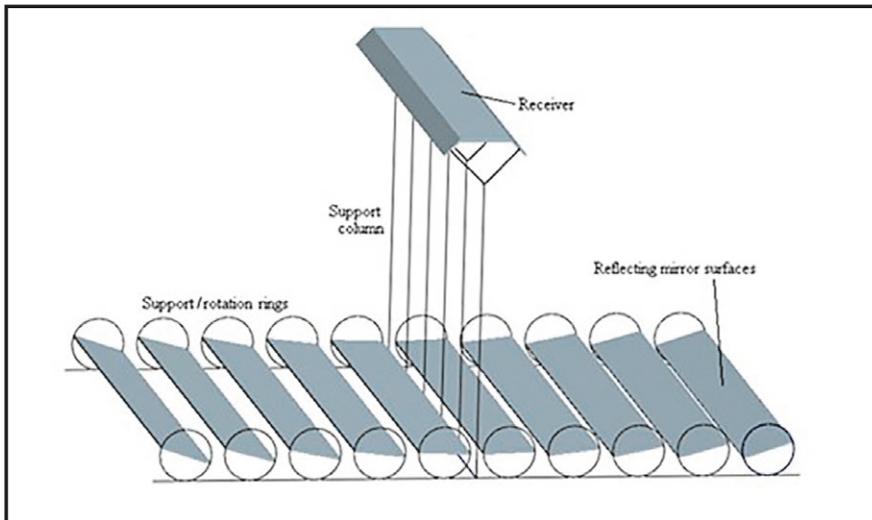
- Sistemas a espelhos parabólicos – “*Parabolics Dish System*” – Esta tecnologia conta com espelhos parabólicos na forma de pratos que concentram a energia no ponto focal onde está localizado o receptor que, usualmente, utiliza o gás Hélio como fluido vetor. Uma estrutura de suporte permite a rotação dos espelhos de modo a mantê-los orientados para o sol, Figura 2.14;

Figura 2.14 Sistema a espelho parabólico. Fonte: (Consoli, 2012)



- Sistemas a espelhos de Fresnel – consiste na substituição dos espelhos convexos do sistema a espelhos parabólicos lineares, por espelhos planos segmentados, conforme ilustra a Figura 2.15.

Figura 2.15 Sistema a espelhos de Fresnel. Fonte: (W, 1961)



Essas tecnologias designadas, genericamente, por usinas a concentração solar, Concentrated Solar Plant – CSP, diferenciam-se pelo grau de desenvolvimento alcançado, pelo rendimento, pelos custos e perspectivas futuras.

Existe ainda outra aplicação da concentração solar, a concentração fotovoltaica (CPV por suas siglas em inglês) que combina o uso de lentes para concentrar a radiação com o princípio fotovoltaico (explicado a seguir). Esta tecnologia já vem se desenvolvendo há alguns anos, porém, não tem sido implementada amplamente como a fotovoltaica. Na Figura 2.16 se mostra um sistema de concentração fotovoltaico.

Figura 2.16 Exemplo de sistemas de concentração fotovoltaica usando lentes Fresnel para concentrar a luz solar (Philipps, Bett, Horowitz, & Kurtz, 2015)



## Solar fotovoltaica

A tecnologia solar fotovoltaica permite a conversão direta da radiação solar em eletricidade, se valendo do efeito fotovoltaico.

Essa tecnologia vem tendo grande aumento em aplicações, desde calculadoras digitais e relógios até produção de energia elétrica em residências e em centrais de médio e grande porte. Tem-se observado que o custo de produção de células fotovoltaicas tem diminuído e o rendimento energético aumentado. Por outro lado, a aplicação de fontes fotovoltaicas tem tido significativos aportes de subsídios públicos para a produção de energia elétrica em vários países do mundo, o que tem incentivado a utilização de fontes renováveis.

A tecnologia mais comum na confecção de células utiliza “wafer” (chapas justapostas) de pequena espessura, constituídas de materiais semicondutores, tal como o silício. Essas células funcionam como se fossem baterias de corrente contínua e são interligadas em combinações série/paralelo formando um módulo. Os módulos são interligados, constituindo os painéis, que produzem energia em corrente contínua que, em geral, é transformada em corrente alternada, pela utilização de um inversor.

O desenvolvimento da tecnologia, o crescimento do mercado e os mecanismos de incentivo governamental têm permitido que a produção de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos tenha se tornado uma alternativa viável para aplicações residenciais e comerciais e surge, ainda, como alternativa para geração de energia em larga escala.

## 2.5.2 Comparação entre as tecnologias termodinâmica e fotovoltaica

Para a comparação entre as tecnologias termodinâmica e fotovoltaica utilizam-se os parâmetros a seguir:

### Natureza e rendimento do processo de conversão

Nas células fotovoltaicas há a conversão direta da energia solar em elétrica, ao passo que nas usinas a concentração solar, a energia solar é convertida em térmica, que por sua vez é convertida em energia elétrica. Assim, o rendimento da conversão da energia solar em elétrica, nestas usinas, tende a ser menor do que das de conversão direta, nas fotovoltaicas.

Nas usinas, a concentração solar o rendimento está vinculada ao limite imposto pelas leis da termodinâmica e, portanto, ao ciclo de Carnot. Considerando uma instalação termodinâmica com espelhos parabólicos lineares, que é a mais difundida atualmente, e fluido vetor com sais fundidos aquecem o vapor até uma temperatura próxima a 550 °C (823 K) e ainda, assumindo-se uma temperatura de 30 °C (300 K) no condensador, resulta rendimento de aproximadamente 66 % para uma máquina teórica de Carnot. Por outro lado, lembrando que um sistema real, operando nessas condições de temperatura, apresenta rendimento da ordem de 70 % da máquina de Carnot, o rendimento resultante é de aproximadamente 46 %. Tal valor está muito próximo do alcançado da turbina a vapor da instalação [2.1], de 40 a 41 %. O rendimento global do sistema é ainda menor, pois que, é o resultado dos produtos dos rendimentos parciais das diversas fases do processo, partindo da captação da energia solar até sua transformação em energia térmica. Esse resultado alcançado acima deriva diretamente das etapas subsequentes de conversão, das quais a menos eficiente é o da turbina a vapor.

Assim, a tecnologia a espelhos parabólicos lineares alcança um rendimento global de cerca de 16 a 17 %. Rendimento um pouco maior é obtido com a tecnologia que utiliza torre central que, tem perspectiva de melhora de rendimento, visto que campos solares permitem relações de concentração maiores, de cerca de 1.000 Sol, onde 1 Sol é definido como uma irradiação de 1.000 W/m<sup>2</sup>.

Estão sendo estudadas alternativas de emprego de fluido vetor a ar comprimido que permite a realização de ciclos supercríticos em que o rendimento aumenta até valores próximos a 22 a 23 %.

Atualmente os maiores rendimentos são alcançados com o sistema a discos parabólicos que alcançam valores próximos a 25 %. Entretanto esse sistema

conta apenas com unidades piloto, prevendo-se que a fase industrial se desenvolvesse em seguida.

Enquanto o limite teórico do rendimento com a tecnologia CSP é determinado pelas leis da termodinâmica e pelo ciclo de Carnot, o da tecnologia fotovoltaica é estabelecido pela natureza eletromagnética da radiação incidente e dos fenômenos de interação da luz – fótons – com o material semicondutor utilizado, como por exemplo, o silício.

Foi demonstrado por Shockley e Queisser, que no caso de uma fonte a junção simples, o rendimento da conversão de uma célula fotovoltaica é de 40,7 % [2.2]. Esse limite é superável utilizando-se células a multijunções, as quais apresentam custos e dificuldades tecnológicas que ainda não foram superadas. Os valores de rendimentos alcançados nos sistemas reais, mesmo os de melhor desempenho, estão ainda bastante afastados dos limites teóricos, encontrando-se rendimentos de cerca de 16 % nas instalações que utilizam células de silício policristalino e de 20 % para as de silício monocristalino. As tecnologias a filme fino caracterizam-se por rendimentos ainda menores, de cerca de 7 %. Finalmente, os sistemas com células CIS – abreviação de semicondutor construído com cobre índio e selênio – apresentam rendimentos da ordem de 16 %.

O rendimento das células no campo é ainda menor em função das diferenças nas condições de ensaio na linha de produção e nas condições operativas. Enfim, o rendimento do módulo, constituído pelas células e do sistema completo, é sempre menor que o individual das células, uma vez que há perdas desde a célula até o ponto de entrega da energia no sistema elétrico.

### **Faixas de potências utilizáveis**

A estrutura modular da tecnologia fotovoltaica permite aplicações com potências desde poucos mW em calculadoras digitais e relógios, até valores de várias dezenas ou mesmo centenas de MW em grandes instalações.

Para as instalações que utilizam a tecnologia CSP são raras aquelas com potência elétrica inferior alguns MW. São exceções as instalações com espelhos parabólicos, que apresentam potência elétrica da ordem de dezenas de kW.

A Tabela 2.1 apresenta os rendimentos mínimos, máximos e médios de alguns módulos fotovoltaicos disponíveis no mercado.

Tabela 2.1 – Rendimentos de módulos solares comerciais (Energysage, 2020)

<b>Fabricante</b>	<b>Eficiência mín.</b>	<b>Eficiência máx.</b>	<b>Eficiência média</b>
Peimar Group	16.60%	19.36%	17.84%
Canadian Solar	15.88%	19.91%	17.88%
REC Group	15.20%	21.70%	18.11%
Risen	16.30%	19.60%	18.12%
LONGi Solar	17.40%	19.30%	18.33%
Hanwha Q CELLS	17.10%	19.60%	18.44%
CertainTeed Solar	15.40%	19.90%	18.46%
Hyundai	16.20%	19.40%	18.46%
Mission Solar Energy	18.05%	18.95%	18.55%
Silfab	17.80%	20.00%	18.93%
Solartech Universal	19.00%	19.90%	19.45%
Panasonic	19.10%	20.30%	19.65%
Solaria	19.40%	20.50%	19.76%
LG	18.40%	21.70%	19.80%
SunPower	16.50%	22.80%	20.70%

Na Figura 2.17 apresenta-se os rendimentos teóricos máximos dos tipos mais importantes de células e na Figura 2.18 os rendimentos atuais de alguns dos módulos comerciais de diferentes tecnologias até o ano de 2020, na Figura 2.19 mostram-se também eficiências e potências de alguns módulos comerciais.

Figura 2.17 Evolução do rendimento de conversão para vários tipos de células solares (NREL, 2019)

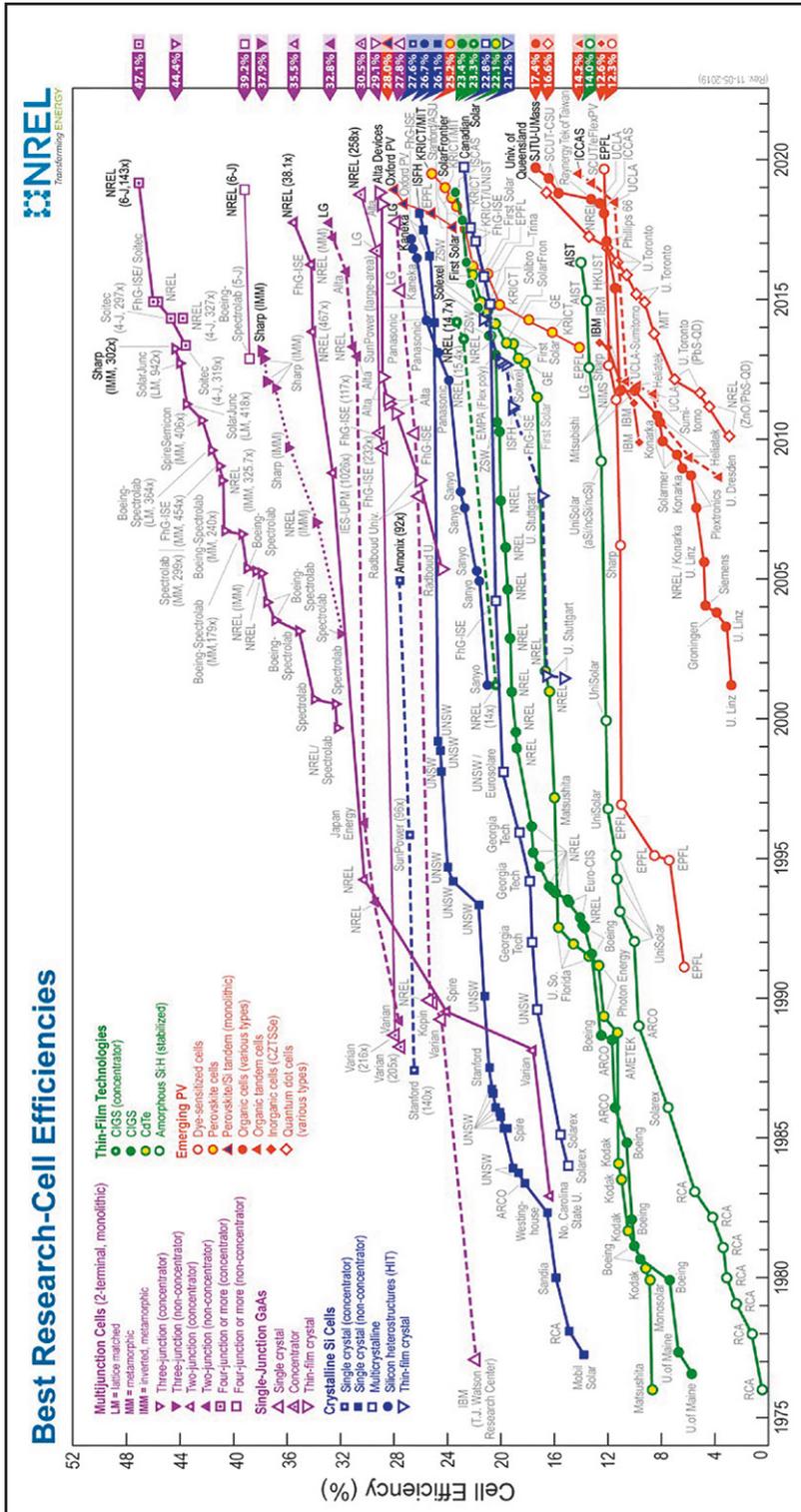


Figura 2.18 Evolução do rendimento de diferentes tecnologias de módulos solares (NREL, 2019)

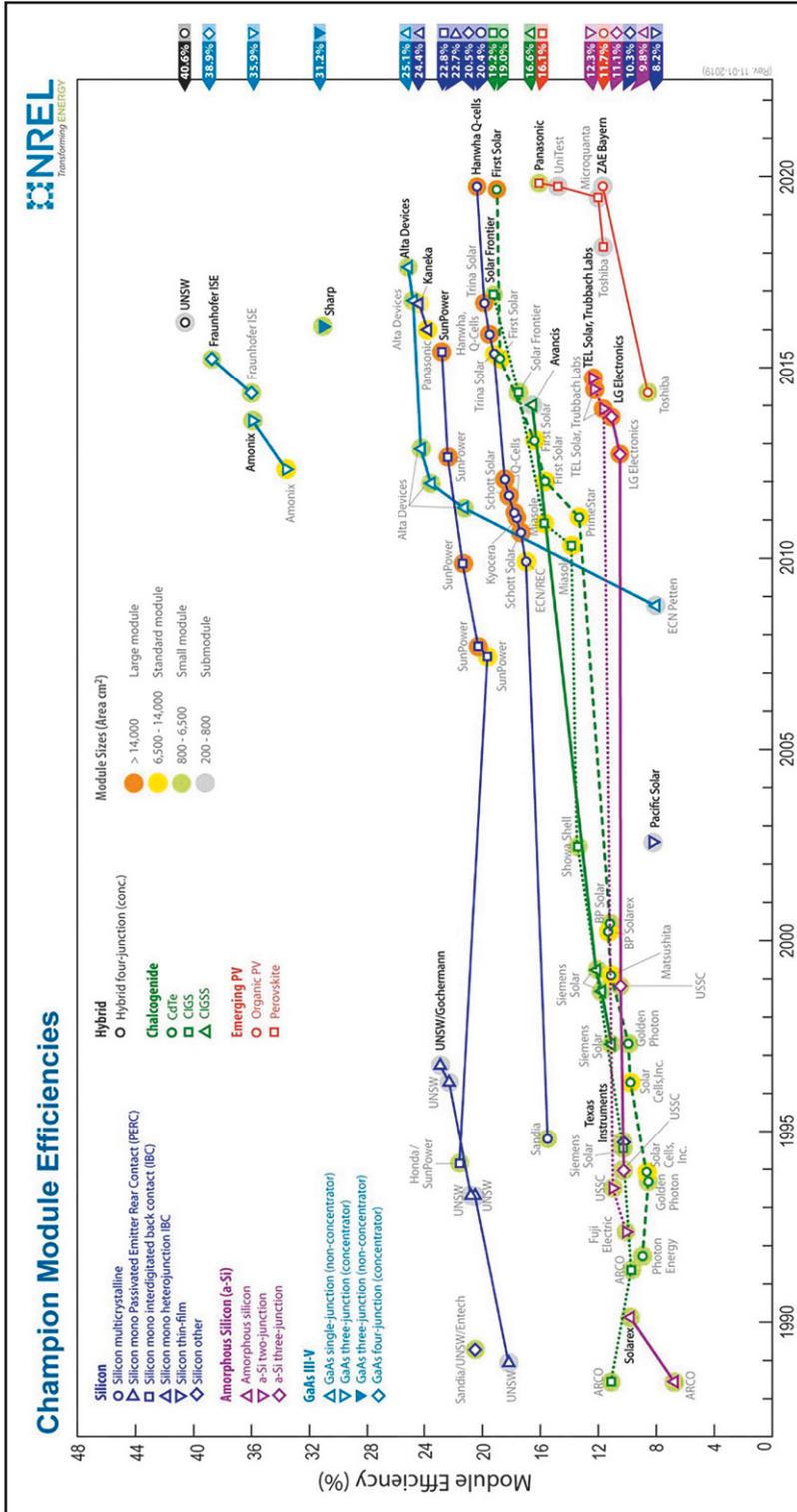
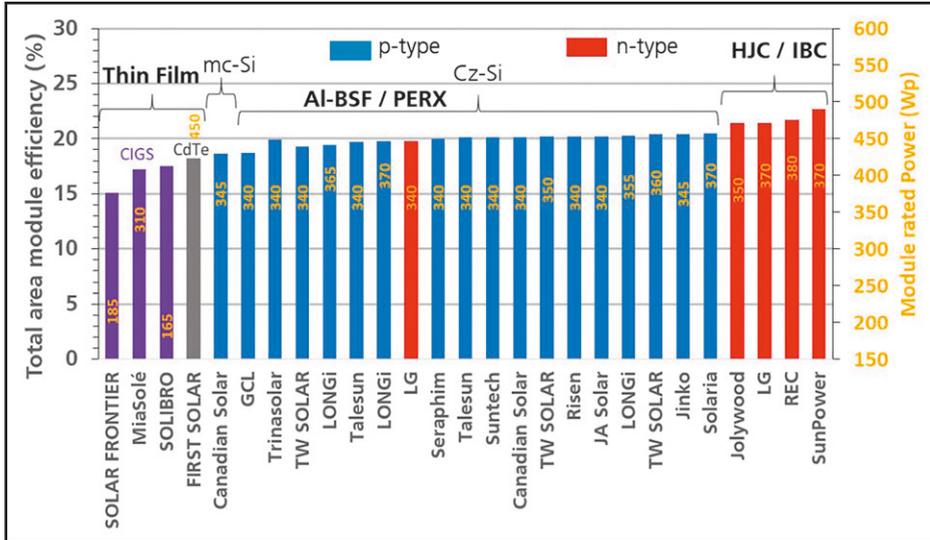


Figura 2.19 Eficiências e potências atuais de alguns módulos comerciais (ISE, 2019)



A Figura 2.20 mostra a distribuição da produção fotovoltaica anual por tecnologia desde o ano 2000 até o 2018. E a Figura 2.21 apresenta a porcentagem de produção por tecnologia até 2017.

Figura 2.20 Produção anual fotovoltaica por tecnologia no mundo (ISE, 2019)

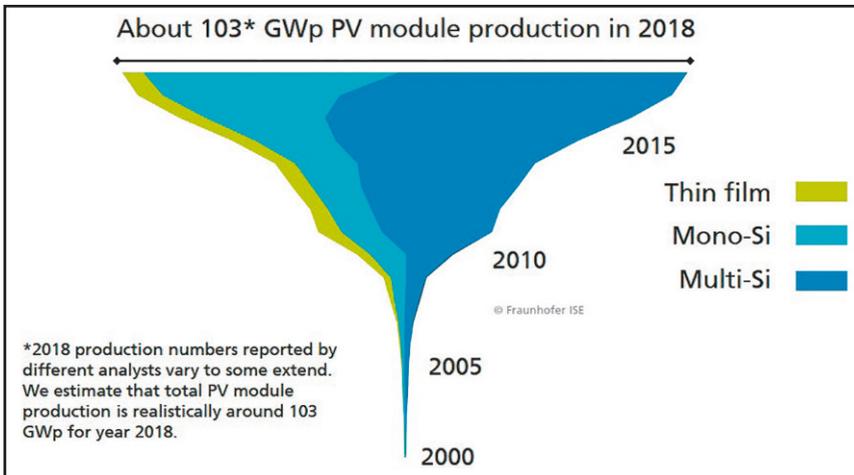
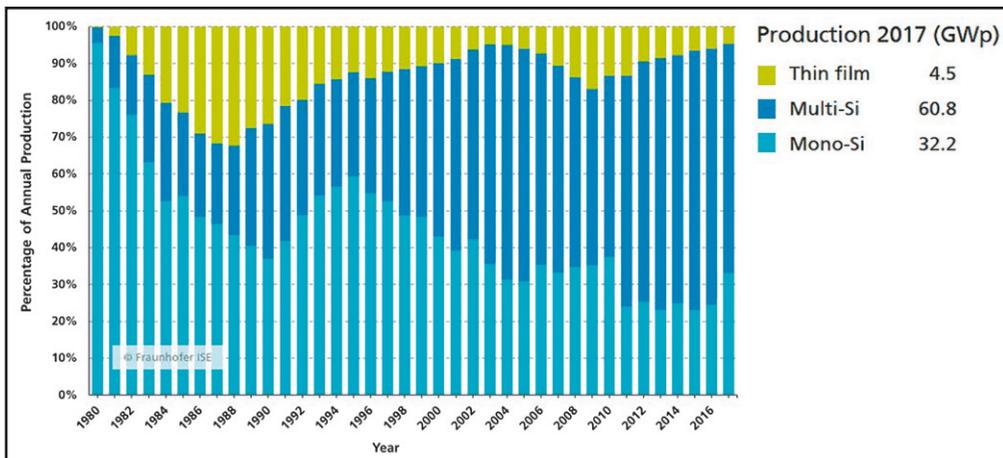


Figura 2.21 Percentagem de produção anual mundial fotovoltaica por tecnologia (ISE, 2019)

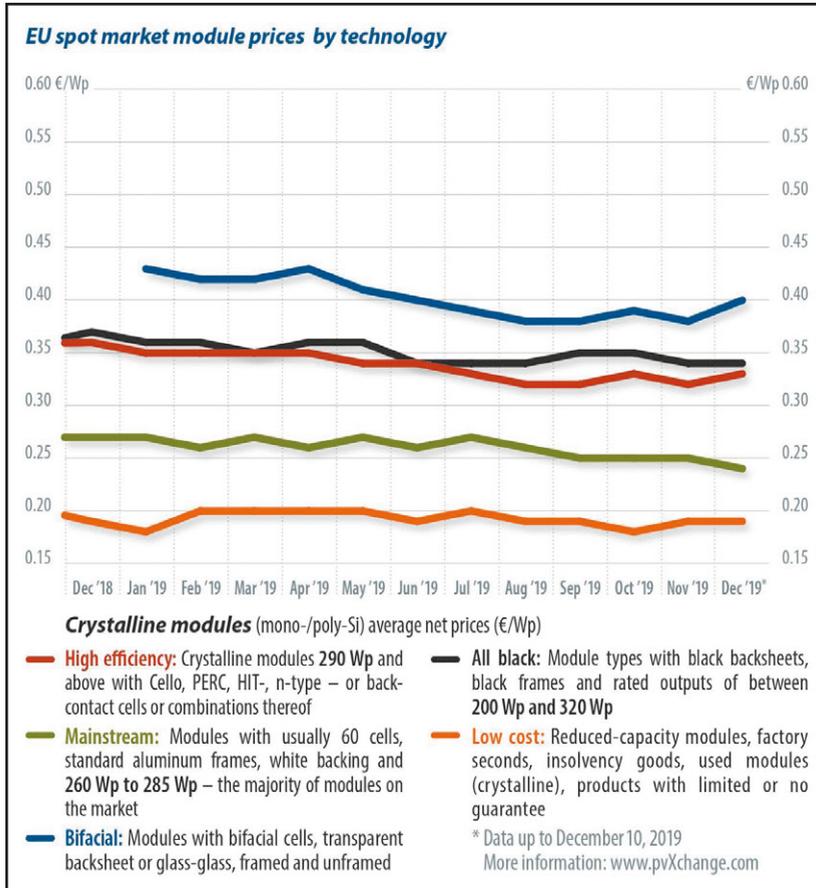


### Relação rendimento – custo

A Figura 2.22 apresenta o seguimento de preço dos módulos para diferentes tecnologias ao longo de 2019. O módulo de maior preço é o bifacial, no entanto, de alta eficiência (30 % aproximadamente (Banerjee, 2019)).

Deve-se notar que, no caso geral, aos módulos de custo menor está associado a um rendimento menor, logo devem ser realizados ulteriores estudos econômicos levando em conta que a área necessária para o painel de baixo rendimento é maior do que a para um painel de maior rendimento e, além disso, a mão de obra de montagem e o sistema de cabeamento também são maiores. Esses aumentos de custo podem compensar o custo dos painéis de maior rendimento.

Figura 2.22 Seguimento do preço de módulos FV por tecnologia na Europa para o ano de 2019 (PV magazine, 2020)



## Coeficiente de temperatura

Um elemento de suma importância em relação ao desempenho é a relação entre o coeficiente de temperatura e a potência. Com o aumento da temperatura da célula, o rendimento cai e a potência gerada diminui. O coeficiente de temperatura é definido como a diminuição percentual de potência gerada para cada grau de aumento da temperatura em relação à temperatura nominal, de placa. Por exemplo, em Singapura com o sol a pico, a temperatura das células pode superar 70 °C, entretanto, os valores nominais do módulo são definidos a 25 °C. Assim, a perda de potência a 70 °C é dada pelo produto do aumento da temperatura, (70 – 25), pelo coeficiente de temperatura.

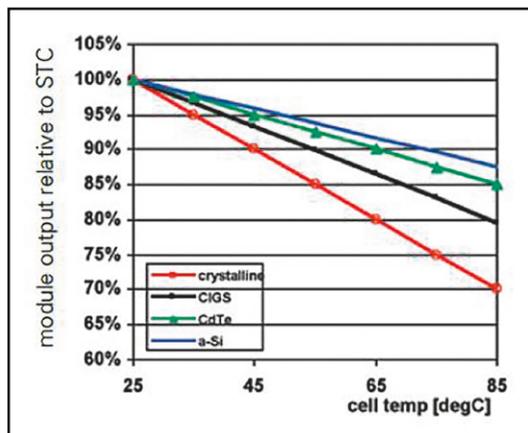
A maior parte das tecnologias a filme fino apresenta valor absoluto do coeficiente de temperatura mais baixo que o das tecnologias cristalinas, ou seja, com o aumento da temperatura a redução de potência daquelas células é muito menor que a destas. Assim, em geral, as tecnologias a filme fino geram, por ano, de 5 a 10 % de energia elétrica a mais, em igualdade de condições. Em geral, os dados de placa de um módulo fotovoltaico fornecido pelo fabricante incluem o coeficiente de temperatura.

Na Tabela 2.2 e na Figura 2.23 estão apresentados alguns coeficientes de temperatura e o efeito produzido sobre a potência gerada pelo módulo.

Tabela 2.2 – Coeficientes de temperatura (Energy Market Authority)

Tecnologia	Coeficiente de temperatura (% / °C)
Silício cristalino	- 0,4 a - 0,5
CIGS	- 0,32 a - 0,36
CdTe	- 0,25
a-Si	- 0,21

Figura 2.23 Efeito do coeficiente de temperatura negativo na potência fornecida pelo módulo (Energy Market Authority)



### 2.5.3 Distribuição das tecnologias no mercado

Atualmente a tecnologia que domina o mercado é a do silício com cerca de 95 % da potência total instalada, com participação de 62,36 % do silício policristalino, e do silício monocristalino ocupando 33,03 %. A porcentagem restante do mercado se distribui pelas células a filme fino, sendo que o CdTe ocupa cerca de 2,36 %, o a-Si 0,3 % e o CI(G)S 1,95 %.

## **2.5.4 Comparação entre tecnologias**

A Tabela 2.3, a Tabela 2.4 e a Tabela 2.5 apresentam uma comparação das diferentes tecnologias quanto às suas vantagens, desvantagens, barreiras existentes para a entrada no mercado, previsões futuras, construção entre outras.

Tabela 2.3 – Comparação entre as tecnologias

Tecnologia	SILÍCIO CRISTALINO		FILME FINO						CONCENTRAÇÃO				
	(créditos: Sharp)	<i>Monocristalino c-Si</i> ou <i>sc-Si</i>	<i>Policristalino mc-Si</i> ou <i>pc-Si</i>	(créditos: sikkod.com)	<i>Silício amorfo a-Si</i>	<i>Cádmio Telluride CdTe</i>	<i>Cobre e Índio Selênio CIS e CIGS</i>	<i>Multi junção GaAs / CIS a-Si / <math>\mu</math>c-Si</i>	<i>Orgânicas OPV</i>	<i>Dye-sensitized DSSC</i>	(créditos: SolFocus)	<i>Baixa</i>	<i>Alta</i>
<b>Descrição geral</b>	Utiliza-se unicamente o silício em forma cristalina. Eficiências mais altas. Fornecedor Si sujeito a ciclos de boom e quedas; historicamente altos, os preços do Si caíram recentemente por causa da baixa demanda e sobreprodução. Pureza: 99,999999% mono e 99,99999% poli.			Os materiais semicondutores usados são vários, também acopladores junção ou em estados de agregação. De qualquer forma são dispostos na formação de um filme fino. Baixa eficiência, mas painéis mais leves e mais fortes, permitem aplicações mais versáteis. Os custos são inicialmente elevados mas continuam descendo. Precisam apenas do 1% do material necessário para as células cristalinas.								Com semicondutores cristalinos	Com multi junção GaInP/GaAs/Ge com eficiência >30%
<b>Vantagens</b>	Rendimento elevado. Estável. Tecnologia confiável.	Rendimento alto. Confiável.		Alta eficiência. Baixo custo de fabricação. Capta um espectro mais amplo.	Rendimento bom. Baixo custo de fabricação. Boas perspectivas.	Altíssimas eficiências [Gallio Arsenuro]	Processos de construção usuais e com baixo custo. Leves e flexíveis.	Altíssimas eficiências [Gallio Arsenuro]	Materiais com baixo custo. Fáceis a ser realizados.				Altíssimas eficiências. Baixa extensão.
<b>Desvantagens</b>	Custo de fabricação. Elevado consumo de material e energia	Sensibilidade às impurezas		Toxicidade Cd. Custo dos materiais	Baixo rendimento. Degradação das prestações.	Custos elevados [Gallio Arsenuro]	Instabilidade. Baixa eficiência.	Deteriorar-se das prestações. Risco congelamento.					Seguidores. Complexidade. Custos ainda elevados. Necessidade de resfriamento.
<b>Barreiras no ingresso no mercado</b>	Fortes obstáculos ao ingresso. Elevados capitais iniciais das plantas de produção. A produção usa muita energia; muitas plantas são acionadas por hidroelétricas.			Produção e desenvolvimento em pequena escala precisam de capitais menos importantes. Os capitais tornam mais importantes com o crescer do fornecimento. Obstáculos ao ingresso devidos à não padronização dos processos de produção (excluindo OPV).									Custos não competitivos. Poucos produtores.
<b>Fornecedores</b>	Multiplicidade de produtores, muitos em comum com a indústria dos semicondutores. Multiplicidade dos produtores também em cada no da cadeia de produção. Nós da cadeia padronizada.			Os fornecedores são empresas químicas que produzem materiais FV de filme fino, como a-Si e CdTe. O fornecimento dos materiais para estes componentes encontra-se menos volátil daquele do Si policristalino. As cadeias de produção não são padronizadas e os produtores são relativamente poucos.									Poucos
<b>Competição</b>	Dez empresas têm acerto do 90% do mercado. Os construtores de wafers e células estão também se expandindo na fabricação do Si. Competição altíssima em cada no da cadeia.			Existem muitas startups que produzem filme fino, e estão competindo principalmente sobre a eficiência de conversão e sobre o custo. A competitividade com os produtos Silício permanece baixa.									Interessante para sistemas especiais.
<b>Outlook</b>	A tecnologia continuara dominando os mercados pelo menos até outros 5-10 anos.			As tecnologias de filme fino constituem ainda um desafio para uma célula solar com alta eficiência e baixo custo. A indústria está evoluindo rapidamente, com operadores que variam a partir de grandes agregados como Sharp até startup e laboratórios universitários.									
<b>Construção</b>	Células obtidas por wafer cortados por um bloco de Si, crescido como único cristal.	Células obtidas por wafer cortados por um cristal de silício com mais faixas.		O filme fino é obtido diretamente depositando uma ou mais camadas finas (filmes finos) de material FV (semicondutor) em cima de um substrato (normalmente vidro).									Por meio de espelhos parabólicos, a luz é focalizada em uma pequena área, assim precisando de menos material semicondutor. Estes aparelhos podem então suportar semicondutores com altas prestações.

Tabela 2.4 – Comparação entre as tecnologias

Tecnologia	SILÍCIO CRISTALINO		FILME FINO					CONCENTRAÇÃO				
	(créditos: Sharp)	(créditos: siko.com)	Silício amorfo a-Si	Cádmio Telluride CdTe	Cobre e Índio Selênio CIS e CIGS	Multi junção GaAs/ CIS a-Si/ $\mu$ c-Si	Orgânicas OPV	Dye-sensitized DSSC	Baixa	Alta		
Aspecto	Monocristalino c-Si / sc-Si	Policristalino mc-Si / pc-Si	Filme fino, cor uniforme e varia.							Painéis com células multi-junção com espelho concentrador.		
Formabilidade	Tendente ao uniforme, azul.	Tendente ao não-uniforme, variações do azul, aparência granulosa.	Sim (usando telas de plástico), podem ser dobrados.							Não		
Escolha painéis	Não, apenas plano	Apenas dois tipos	Muitos tipos diferentes.							Para colocações livres, necessidade de seguimento.		
Impacto ambiental da produção	Baixo	Baixo	Baixo	Lixo industrial na mineração do Cd. Altamente tóxico. Reciclagem necessária.	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo			
Peso	Médio	Alto	Baixo							Elevado		
Material FV necessário		8 g/W	0,22 g/W							Com fatores de concentração de 500, é necessário aproximadamente 900 vezes menos material		
<b>CUSTO MÓDULOS</b>												
Ryno (Jan11)	2,07 \$/W	1,95 \$/W	1,37 \$/W									
IRENA (Dez11)	<1,4 \$/W		-0,8 \$/W	0,9 \$/W	0,9 \$/W							
IANUS (Jun12)		0,8 – 0,6 \$/W	0,8 – 0,6 \$/W	0,6 \$/W								
<b>QUOTAS MERCADO %</b>												
2009	83	3	1	13								
2010	87	2	2	9								
Comercialização	Madura. Produção larga escala.		Inicial. Produção pequena escala.		Inicial. Produção média escala.		Inicial. Produção pequena escala.		Pesquisa e desenvolvimento	Produção pequena escala		
Potência máx módulo Wp	320	320	300	120	120	120	135 (a-Si/ $\mu$ c-Si)	120 – 432				
Área mín. módulo m <sup>2</sup>	2	1,4 – 2,5	1,4	0,72	0,6 - 1	1,4						
Relação média m <sup>2</sup> /kW	7	8	15	11	10	3,24						
Potência (máx para 1 ha)	1,4 MW	1,25 MW	0,7 MW	0,9 MW							1 MW	3,09 MW
Prestações	Altas	Médias	Médias	Altas							Elevadas	

Tabela 2.5 – Comparação entre as tecnologias

Tecnologia	SILÍCIO CRISTALINO		FILME FINO						CONCENTRAÇÃO				
	(créditos: Sharp)	<i>Monocristalino c-Si</i> ou <i>sc-Si</i>	<i>Policristalino mc-Si</i> ou <i>pc-Si</i>	Silício amorfo a-Si	Cádmio Telluride CdTe	Cobre e Índio Selênio CIS e CIGS	Multi junção GaAs / CIS a-Si / $\mu$ c-Si	Orgânicas OPV	Dye-sensitized DSSC	Baixa	Alta		
RENDIMENTO DA CÉLULA %													
<i>Máximo teórico</i>	30	27	30	29 (CIGS)	68	88							
<i>Em pesquisa (std condition)</i>	24,7-27,6	21	12,2	16 – 17,3	20 (20,3 CIGS)	13,2 (a-Si) – 40 (GaAs)	8,3 – 11,1	11,1 – 12,5	43,5 (grupo III-V multi junção)				
<i>Em produção (std condition)</i>	15-21	11-18	7 – 10	10 – 13	12 – 15	38 – 39 (GaAs)	8,3	8,8	36 – 41				
RENDIMENTO DO MÓDULO %													
<i>Médio (std condition)</i>	12,5 – 15	11 – 14	5 – 8	8 – 12	10 – 13 (CIGS) 7 – 11 (CIS/CIGS)	9,6 (a-Si / $\mu$ c-Si)	4 – 5	1 – 5	25 – 35				
<i>Em produção</i>	23	16	7 – 10	11,2	12,1		6 – 8		25				
<i>Sensibilidade para T altas</i>	Sim, com diminuição de eficiência												
<i>Coeficiente T</i>	Amplamente imune. Coef. T mais baixos dos cristalinos (boa escolha em climas quentes)												
<i>Luz direta / difusa</i>	A luz direta é preferida, mas também pode ser usada aquela difusa.												
<i>Estabilidade</i>	Muito boa												
<i>Degradação effc.</i>	1% por ano												
<i>Construtores</i>	Sunpower, Solarworld, Isofoton		Hemlock Semiconductor, Waacker Chemie, Renewable Energy Corporation, MEMC, Tokuyama, Mitsubishi, Osaka Titanium		First Solar, Sharp, Solar Frontier, Miasole, Solyndra, Q-Cells, Abound Solar, GE54, SUN-GEN		Unisolar, Sontar AvaSolar, Calyxo		FirstSolar, Nanosolar, GlobalSol, Solibro Spectrolab, EMCORE		G24j, Komarka technologies, Dyesol Ltd, Solaronix SA, McGe, Japan solar	Entech Solar, Isofoton	SolFocus