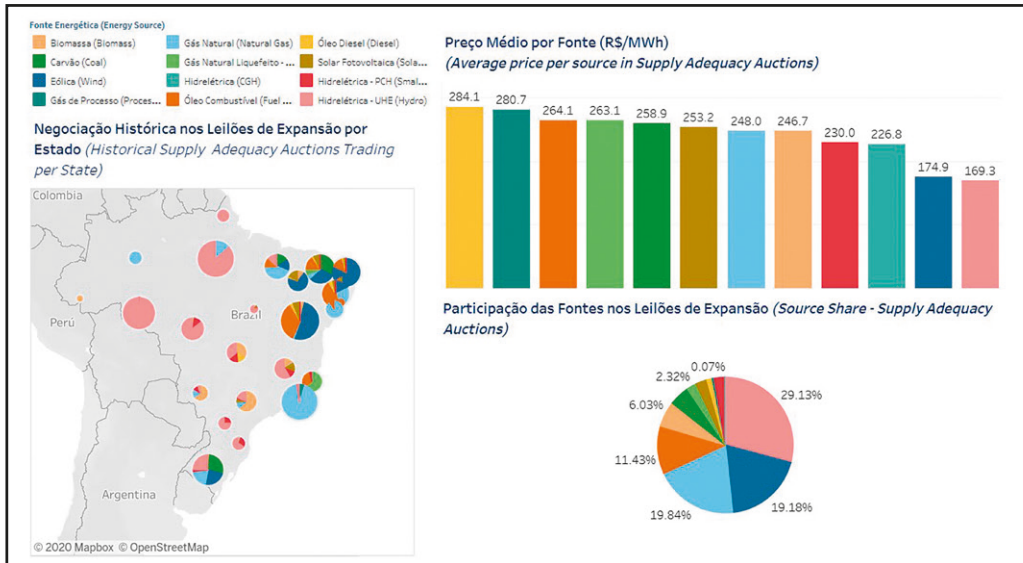


CUSTOS DOS SISTEMAS – GD E CENTRALIZADA

A análise dos custos presentes neste capítulo foi realizada considerando os cenários brasileiro e internacional. Não obstante, o ambiente internacional sedia os principais atores desse setor, quer sejam fabricantes, quer sejam consumidores, e determina na economia globalizada, as bases de mercado válidas, excluindo-se as questões fiscais e tributárias.

O custo da energia produzida pelos sistemas fotovoltaicos tem se reduzido nos últimos anos. O preço médio de energia consolidado dos leilões mostra que o preço da energia solar fotovoltaica é mais abaixo que o preço de algumas fontes convencionais de energia, tais como, óleo diesel, óleo combustível, carvão e gás natural liquefeito (CCEE, 2020). Na Figura 4.1 observa-se o gráfico dos preços médios de energia consolidados divididos por fonte e sua distribuição geográfica.

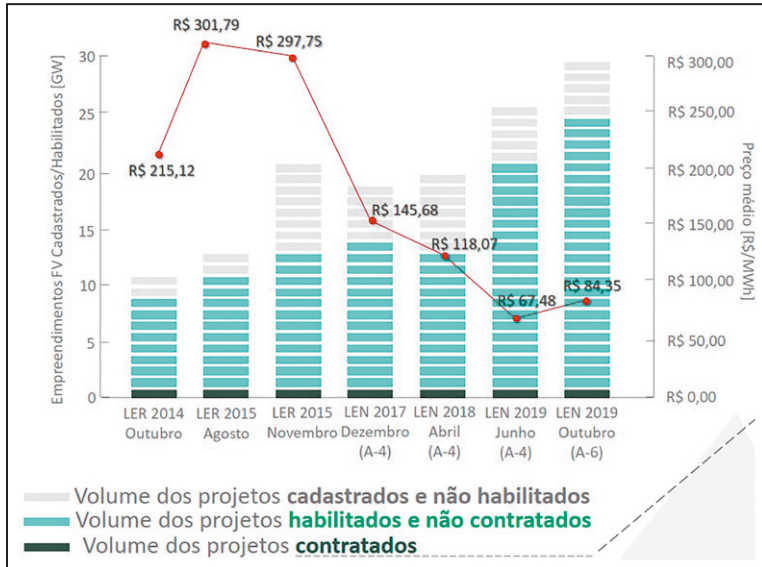
Figura 4.1 Preço médio da energia por fonte (CCEE, 2020)



Apesar de que o preço da energia proveniente de outras fontes é mais baixo no consolidado, o qual se deve ao fato de contabilizar o preço da energia a partir dos valores dos leilões anteriores, o preço médio da energia dos dois últimos leilões é muito mais baixo que o consolidado, como é possível observar na Figura 4.2. O preço médio consolidado é 253 R\$/MWh, enquanto o preço médio do último leilão foi 84,35 R\$/MWh. Além do anterior, segundo informações da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), nos dois últimos leilões (A-4 e A-6 de 2019) o preço médio de energia solar foi mais baixo que o preço da energia eólica, como indicado na Figura 4.3.

Cabe ressaltar, no entanto, que é possível que haja alguma distorção no preço em situações específicas, onde, por exemplo, empreendimentos podem estar associados a uma planta produtora de módulos, fazendo com que o preço de venda no leilão seja uma componente de um empreendimento que transcende a construção da usina solar em si. Outras condições comerciais, envolvendo incentivos e mercado de painéis, a nível mundial, também podem levar a distorções nos preços de leilões de energia solar.

Figura 4.2 Preço médio da energia fotovoltaica contratada nos leilões (Greener, 2020)



A Tabela 4.1 apresenta as potências dos projetos eólicos contratados nos leilões desde o ano 2014. Observando os valores da tabela e a Figura 4.2 percebe-se que a quantidade de projetos contratados em cada leilão é muito inferior comparado com os projetos cadastrados e habilitados; na melhor situação os projetos contratados representam apenas um 10 % dos projetos cadastrados.

Tabela 4.1 Potência dos projetos contratados por leilão desde 2014 (Greener, 2020)

Leilão	Potência dos projetos contratados (MW)
A-3 2014	744,9
A-2 2015	833,8
A-3 2015	929,3
A-4 2017	574,0
A-4 2018	806,4
A-4 2019	203,7
A-6 2019	530,0

Figura 4.3 Resultados leilões A-4 e A-6 de 2019 (EPE, 2019)

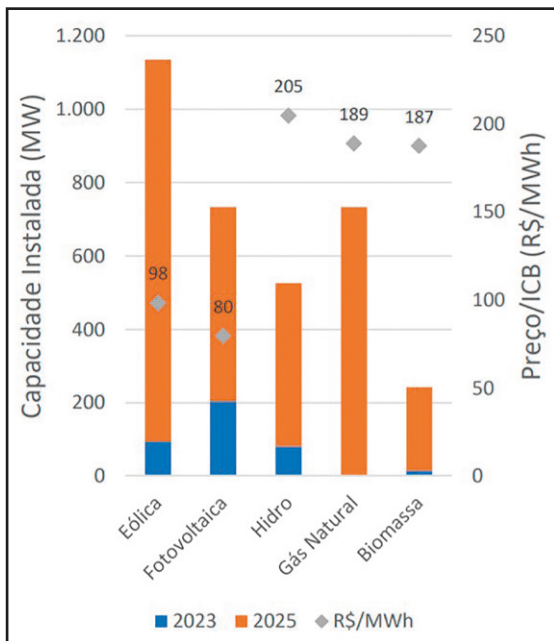


Figura 4.4 Peso relativo dos custos no orçamento total dos projetos (valores médios) (EPE, 2020)

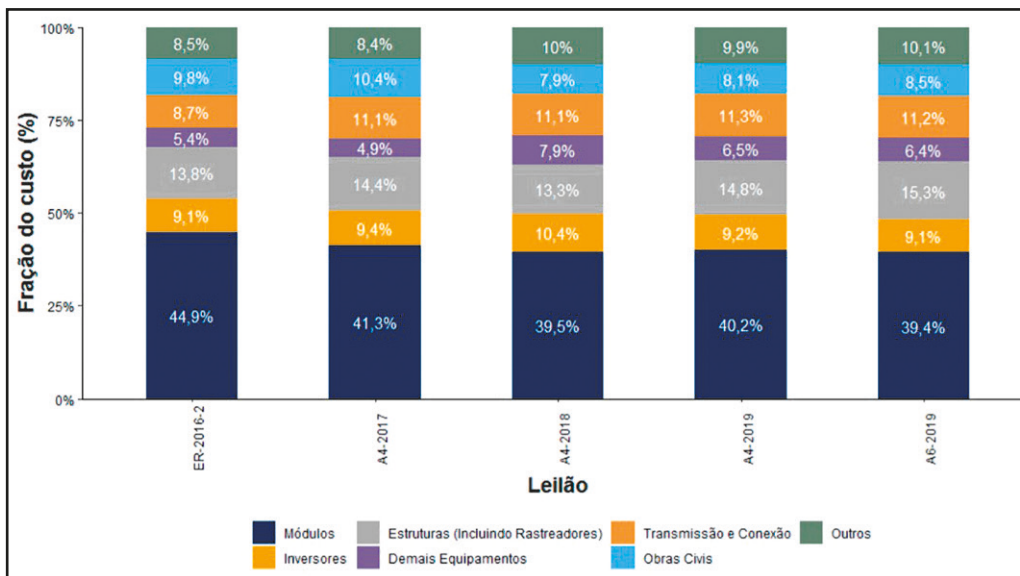
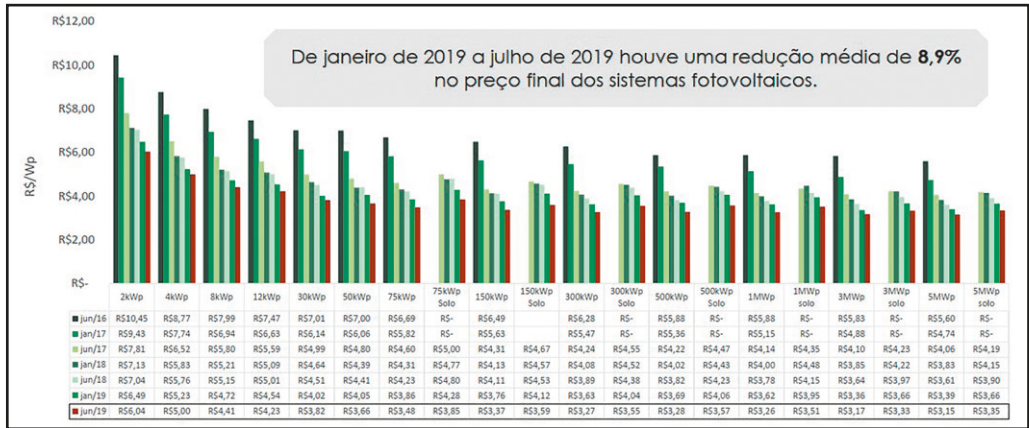


Figura 4.5 Preços de sistemas fotovoltaicos para o cliente final (Greener, 2019)



O interesse das fontes renováveis como alternativa às convencionais a combustível fóssil, motivou governos introduzirem incentivos nesse sentido, em particular, para as fotovoltaicas.

Recentemente, a pressão de fatores políticos, ambientais, de mercado, de escala e de tecnologia, imprimiu diminuição no custo da energia fotovoltaica, que iniciou sua participação na produção de energia elétrica, com significativo crescimento da capacidade instalada e a consequente redução dos custos.

A análise econômica conduzida neste capítulo é realizada da perspectiva do investidor, seja uma companhia de geração de energia elétrica, um produtor independente, ou um indivíduo ou uma comunidade que deseja investir em fontes fotovoltaicas de pequeno porte, não obstante as centrais de médio e grande porte também sejam abordadas. Por outro lado, essa análise exclui o impacto de incentivos ou subsídios governamentais, bem como as vantagens da emissão evitada de CO₂ e demais mitigações de impactos ambientais propiciados por fontes renováveis. Também não foi considerado o esgotamento das fontes de extração dos combustíveis fósseis.

Um sistema fotovoltaico é visto neste texto como sendo composto pelo custo de implantação, individualizando seus principais componentes, e de operação/manutenção.

Sistemas com conexão à rede pública e sistemas isolados, bem como a questão da armazenagem de energia também são tratados na análise de custos dos sistemas fotovoltaicos.

Vale ressaltar que o mercado de sistemas fotovoltaicos tem atravessado situações turbulentas nos últimos anos, com desequilíbrios na oferta e na

demanda, motivados tanto por fatores exógenos como subsídios de governo para incentivar o uso, como avanços tecnológicos e variações significativas na escala de produção. Esse quadro impõe um grande desafio na análise de custos desses sistemas, que tem apresentado inflexões e descontinuidades motivadas por esses fatores.

É importante notar ainda, que os preços dos sistemas variam significativamente com a região e o país onde é instalado, tanto pela possibilidade local de produção de parte da instalação como incentivos ou impostos em vigência. Por exemplo, a Alemanha, que apresenta um dos mercados fotovoltaicos mais competitivos, baseou-se em um grande mercado doméstico e de um longo histórico de incentivos estáveis e de longo prazo. A Figura 4.6 apresenta as fronteiras da análise e uma visão da formação do preço final da energia produzida por um sistema fotovoltaico a serem considerados. Note que, atendendo a nomenclatura usual na literatura internacional, o custo da energia produzida por um determinado sistema fotovoltaico é designado por “LCOE”, em inglês, *Levelized Cost of Energy* – que leva em conta o valor presente do custo do investimento e dos custos operacionais e de manutenção. É definido por:

$$LCOE = \frac{C_{Inv} + C_{Oper} + C_{Man}}{E_{Prod}} \quad (4)$$

Onde:

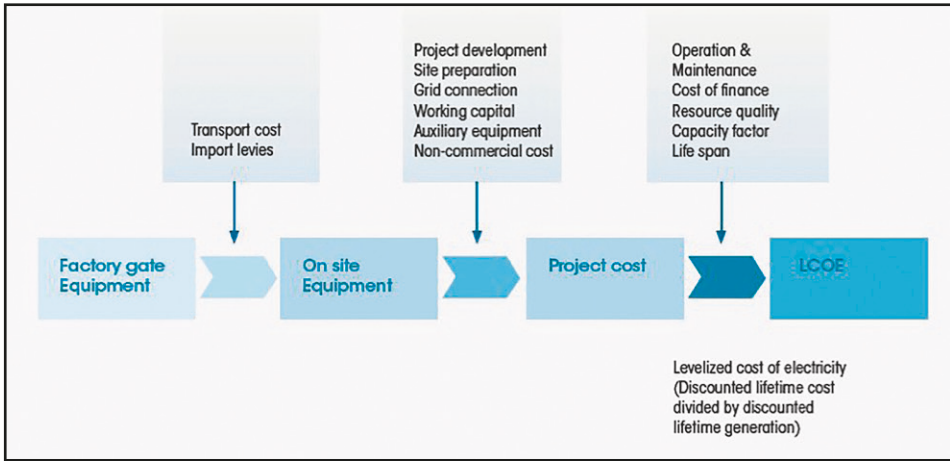
C_{Inv} : Custo presente total do investimento;

C_{Oper} : Soma dos custos operacionais, em valor presente;

C_{Man} : Soma dos dispêndios com manutenção, em valor presente;

E_{Prod} : Energia total produzida em kWh.

Figura 4.6 Indicadores do custo da geração de energia elétrica através de centrais fotovoltaicas (IRENA)



O LCOE das fontes renováveis, solares e eólicas, varia em função da tecnologia utilizada que determina o desempenho/rendimento, do país, do projeto e nos custos de capital, embora, por simplicidade de análise, se desconsidere neste texto, as diferenças regionais. Vale ressaltar que o baixo custo de operação e manutenção realça a importância do custo de investimento e do de capital (WACC).

Em tudo quanto se segue a análise baseia-se em dados obtidos junto a organizações consolidadas tais como a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, por sua sigla em inglês), o Laboratório de Energias Renováveis dos Estados Unidos (NREL), *SolarPower Europe* e o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DoE). Os dados obtidos destas instituições provêm de uma variedade de fontes, tais como, revistas técnicas e associações industriais.

4.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS – SISTEMAS E COMPONENTES

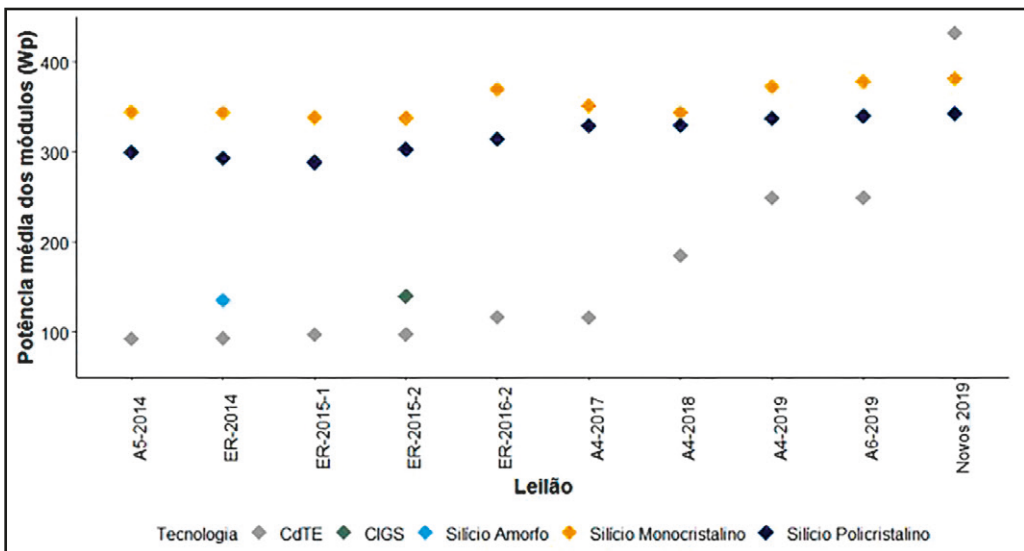
Atualmente a tecnologia que domina o mercado é a do silício com cerca de 95 % da potência total instalada, com participação de 62,36 % do silício policristalino, e do silício monocristalino ocupando 33,03 %. A porcentagem restante do mercado se distribui pelas células a filme fino, sendo que o CdTe ocupa cerca de 2,36 %, o a-Si 0,3 % e o CI(G)S 1,95 % (ISE, 2019).

Independentemente das dimensões da instalação e do escopo ao qual se destinam, os sistemas de geração fotovoltaica se comportam como uma “ilha de potência”, composta de painéis, que são conjuntos de células de silício cristalino ou de filme fino, na qual ocorre a transformação da energia radiante em

energia elétrica e de um sistema complementar que permite sua transferência ao usuário final.

A conversão da energia solar em elétrica ocorre nos painéis solares, em corrente contínua, cuja potência fornecida varia, usualmente, de 100 a 400 W em cada painel, atualmente com aplicações mais frequentes de painéis de 300 a 400 W, basta ver a potência média dos módulos nos últimos leilões (Figura 4.7). Os painéis são compostos da associação em paralelo de tiras de células ligadas em série.

Figura 4.7 Potência média dos módulos por tecnologia para cada leilão desde 2014 (EPE, 2020)



Um painel ou um conjunto de painéis é associado a um inversor, que converte a corrente contínua em alternada e em geral também otimiza a operação, buscando o ponto de maior transferência de potência conforme seja a temperatura e o nível de irradiação recebida. Em raros casos que o inversor não apresenta essa funcionalidade, é necessário que se inclua no circuito um dispositivo “otimizador” que busque esse ponto de trabalho.

Cabos, disjuntores e quadros de distribuição são utilizados para conectar os painéis constituindo a parte elétrica do sistema fotovoltaico de produção de energia. Em alguns casos, geralmente de instalações de médio ou grande porte, é necessária a aplicação de transformador para compatibilizar a tensão de saída dos inversores com a tensão da rede pública.

O suporte mecânico dos painéis é composto de estruturas, em geral de alumínio, nas quais os painéis são fixados com inclinação e orientação adequada para receber a irradiação solar. Há sistemas de suporte que acompanham automaticamente o movimento do sol durante o dia (“tracking”), maximizando a captação de irradiação.

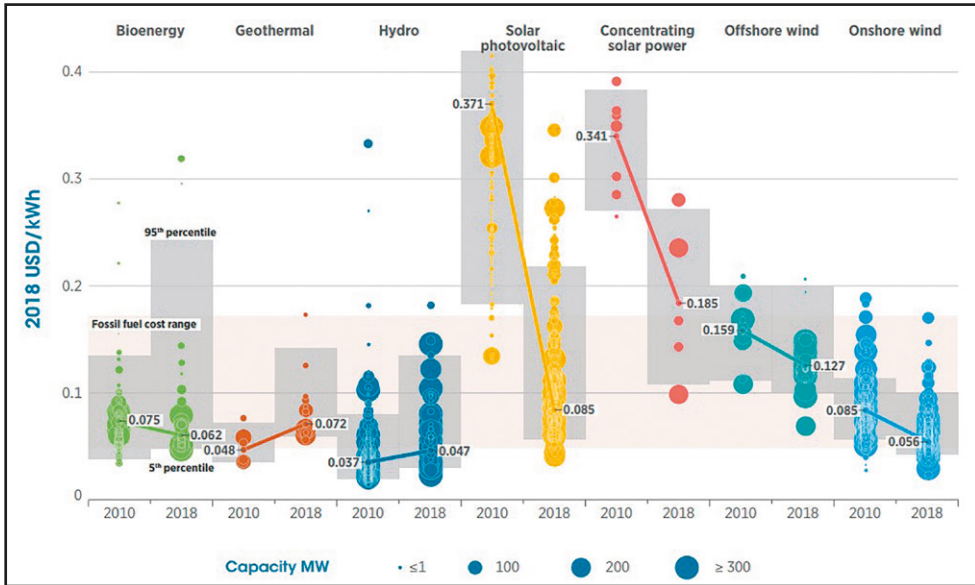
Uma vantagem relevante dos sistemas fotovoltaicos em relação a outras modalidades de geração é a composição em módulos e a simplicidade da instalação, que não tem máquinas rotativas e equipamentos complexos, frequentemente presentes em centrais geradoras. Em sistemas deste tipo a economia de escala é significativa, seja em função da demanda total de potência, seja do porte da instalação fotovoltaica. De fato, sendo os painéis componentes modulares que independem do porte da instalação resulta que o aumento da potência instalada da unidade geradora leva a um aumento da produção industrial de painéis e de consequência à redução de seu custo unitário. Por outro lado, o aumento do porte da instalação leva a uma diminuição do custo unitário de produção pela menor incidência das partes comuns.

4.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS – CUSTOS E DESEMPENHO

Nas últimas décadas a tecnologia fotovoltaica teve desenvolvimento notável, impulsionada pela valorização da energia de fontes renováveis e limpas, pela volatilidade dos preços dos combustíveis, pela pressão do aumento da oferta de energia, bem como pelo aumento do preço da energia e pela confiabilidade que oferece, dentre outros fatores.

Acompanhando essa evolução, o custo da energia produzida por fonte fotovoltaica apresentou forte redução de custo. Há poucos anos o seu valor, era cerca de 4 a 5 vezes o das usinas termoelétricas a combustíveis fósseis. Com o aumento do preço dos combustíveis fósseis e com a redução contínua dos preços dos módulos fotovoltaicos, o custo de fornecimento de energia pela rede convencional a unidades residenciais possivelmente se igualará aos custos de produção de energia por painéis fotovoltaicos. Segundo dados da IRENA em 2018 o custo da energia de usinas solares fotovoltaicas já estava na mesma faixa de custo da energia produzida por combustíveis fósseis, como pode se observar na Figura 4.8 (IRENA, 2019).

Figura 4.8 LCOE global de tecnologias de geração renováveis a nível de usina, 2010-2018 (IRENA, 2019)



A Figura 4.9 e a Figura 4.10 ilustram a evolução da potência instalada de fotovoltaicas e eólicas no mundo desde 2008 até 2018. Observa-se que apesar de que em 2010 a diferença entre a capacidade instalada das duas fontes era grande, com a capacidade eólica tendo 198 GW e a fotovoltaica 40 GW, no final de 2018 essa diferença se reduziu significativamente sendo de 86 GW apenas.

Figura 4.9 Evolução da capacidade solar fotovoltaica no mundo, 2008-2018 (REN21, 2019)

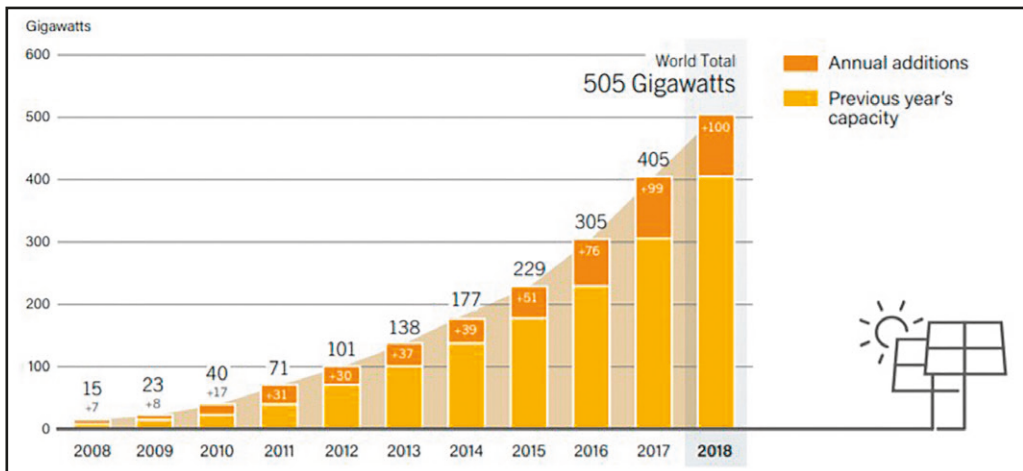
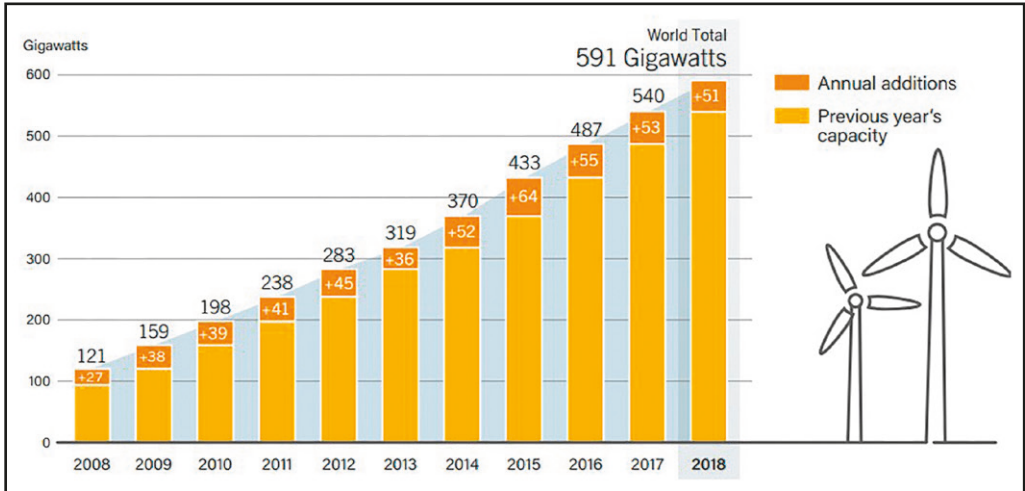
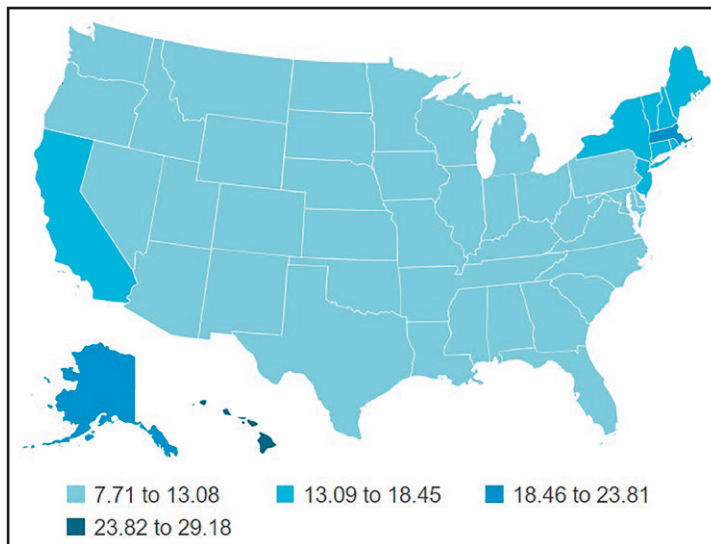


Figura 4.10 Evolução da capacidade eólica no mundo, 2008-2018 (REN21, 2019)



A Figura 4.11 apresenta os custos médios de eletricidade por estado nos Estados Unidos; Louisiana apresenta o menor preço (7,71 centavos de USD/kWh) e Havaí o maior (29,18 centavos de USD/kWh). O LCOE de uma usina fotovoltaica (Figura 4.8) se encaixa entre os valores mais baixos de eletricidade dos Estados Unidos, podendo ser interpretado que atualmente esta fonte de energia é uma das mais econômicas.

Figura 4.11 Custos médios da energia elétrica nos EUA para pequenos consumidores em centavos de USD/kWh, dados de 2018 (EIA, 2019)



4.2.1 Estrutura do custo da instalação de sistemas fotovoltaicos

Os parâmetros fundamentais para o estabelecimento do custo da energia elétrica produzida por um sistema fotovoltaico são:

- Investimento para instalação;
- Taxa de desconto (custo de capital);
- Custos de operação e manutenção;
- Nível de irradiação solar;
- Rendimento das células solares.

O custo do investimento é composto por duas parcelas: a primeira, referente aos painéis fotovoltaicos e a segunda ao custo complementar, que se refere ao restante dos componentes e serviços, incluindo a preparação da área que irá receber os painéis solares. Essa parcela de custo complementar é usualmente denominada, internacionalmente, *Balance of System* – BoS.

O custo dos painéis compõe-se, fundamentalmente, do custo da matéria-prima e de fabricação das células e do custo da matéria-prima e de montagem dos painéis.

O custo complementar, BoS, engloba o custo de preparação do sítio, o custo das estruturas de suporte; o custo da instalação elétrica compreendendo os cabos, transformador (se for o caso) e mão de obra para a execução da instalação; o custo das baterias ou outro dispositivo quando se tratar de instalação com acumulação e finalmente do processo administrativo referente à habilitação da instalação, financiamento, alvarás, e autorização da conexão com a rede de transmissão.

A título de ilustração, a Figura 4.12 e a Figura 4.13 apresentam as parcelas dos custos para quatro sistemas fotovoltaicos: um residencial, um comercial, e duas usinas de 100 MW, uma com módulos fixos e a outra com seguidor solar de um eixo. Os gráficos baseiam-se em pesquisas realizadas pelo NREL e mostram a evolução dos custos desde o ano 2008 até o 2018.

Figura 4.12 Custos de investimentos para sistemas fotovoltaicos residenciais e comerciais, 2010-2018 (NREL, 2020)

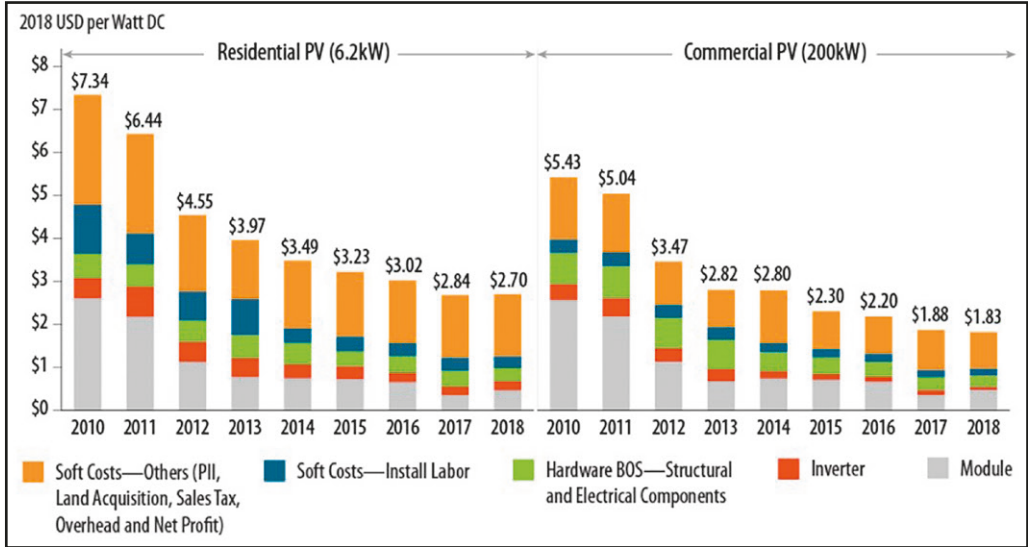
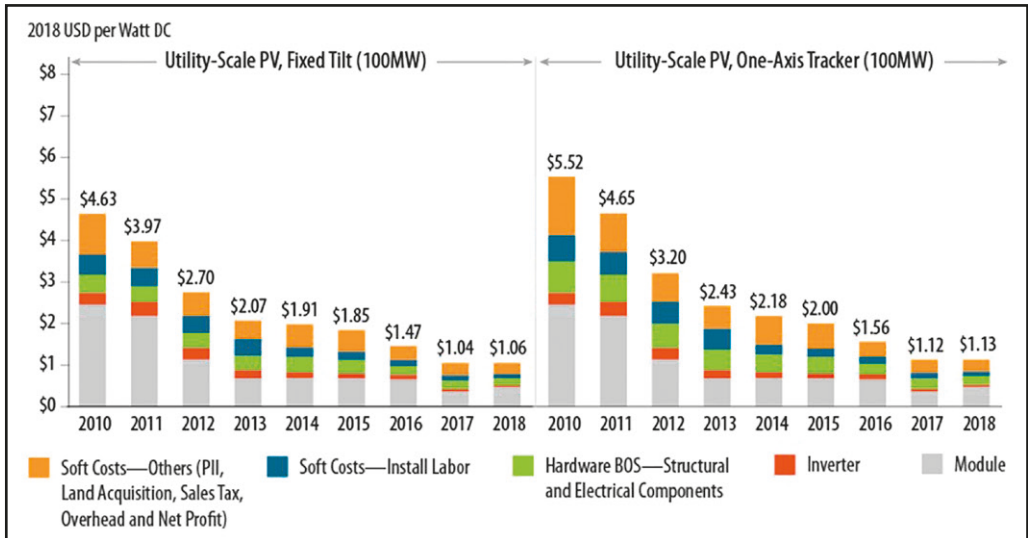


Figura 4.13 Custos de investimentos para usinas fotovoltaicas de 100 MW com módulos fixos e com seguidor solar de um eixo, 2010-2018 (NREL, 2020)



Na Figura 4.14, na Figura 4.15 e na Figura 4.16 observam-se os preços de um sistema fotovoltaico residencial, comercial e industrial respectivamente no Brasil. O preço está dividido entre o preço do kit (módulos, inversores, estrutura e acessórios) e o custo de integração. Assumindo que um dólar de 2018 equivale

a 3,8 reais, nos três casos brasileiros apresentados o custo do investimento é menor que o custo dos Estados Unidos.

Figura 4.14 Preços de um sistema fotovoltaico residencial de 4 kWp (Greener, 2019)

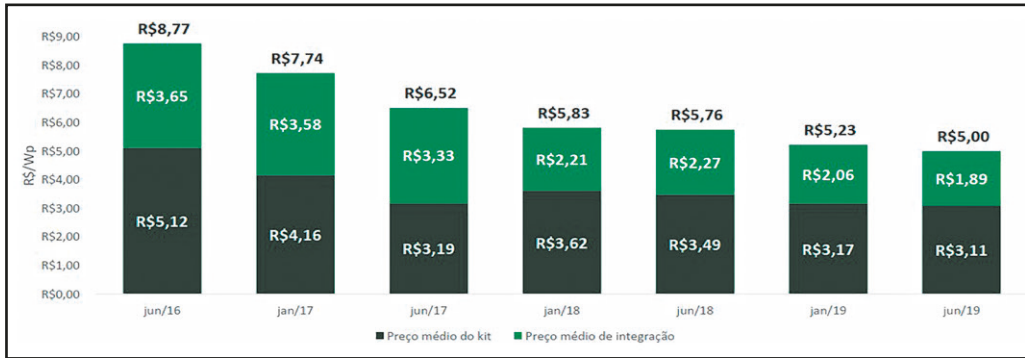


Figura 4.15 Preços de um sistema fotovoltaico comercial de 50 kWp (Greener, 2019)

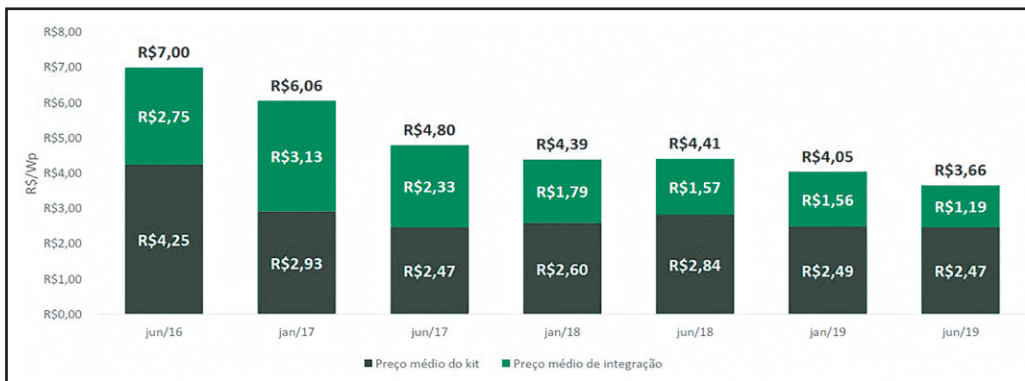
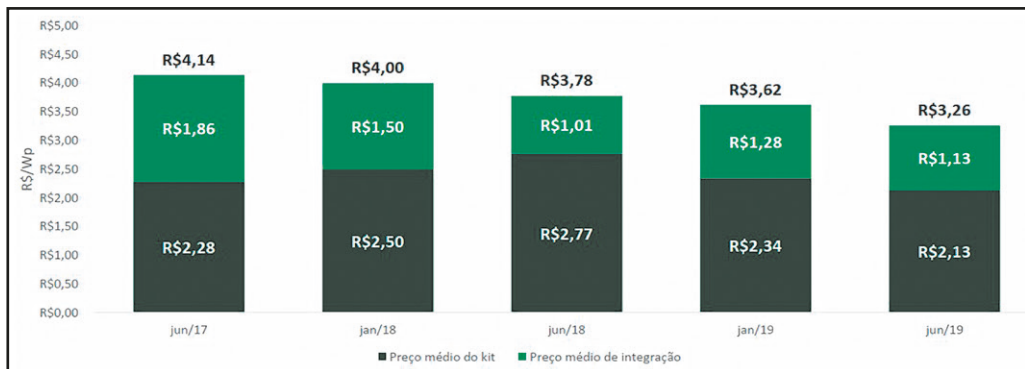


Figura 4.16 Preços de um sistema fotovoltaico industrial de 1 MWp (Greener, 2019)



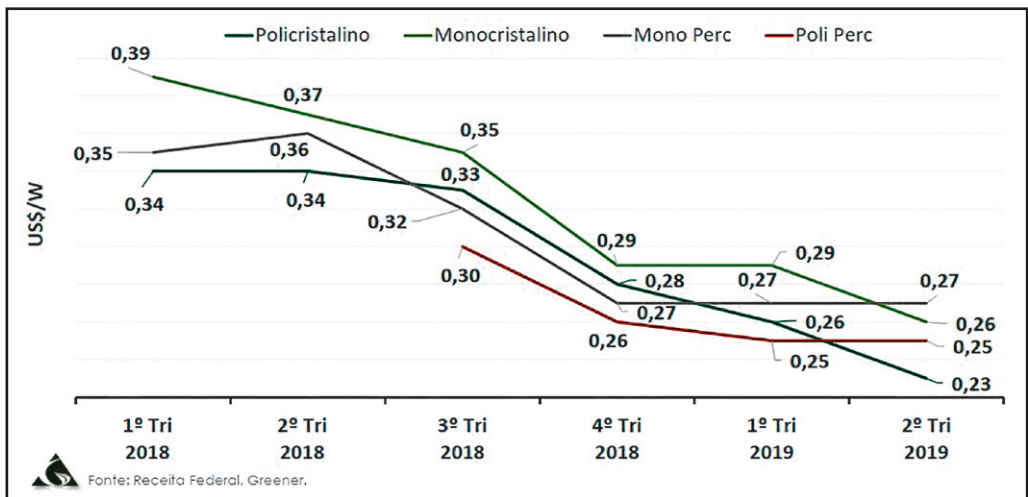
O desenvolvimento tecnológico e a economia de escala permitiram aos fabricantes de células de silício cristalino e de filme fino obter reduções sensíveis no custo e a tendência é que essas reduções se acentuem por processos de automação de processos, redução das perdas de matéria-prima, redução do custo da mão de obra e à economia de escala.

Por outro lado, a possibilidade de redução do custo do BoS é associada a condições locais de disponibilidade de mão de obra, e menor do que a dos painéis, por envolver serviços e materiais consolidados.

Custo dos módulos

Uma evolução do preço dos painéis por tecnologia está apresentada na Figura 4.17 em USD/W que é o custo por potência que o painel produz. Nota-se uma tendência constante de diminuição do preço, exceto nos módulos de tecnologia PERC.

Figura 4.17 Preço de módulos fotovoltaicos por tecnologia nos últimos anos¹ (Greener, 2019)



É importante ressaltar que o mercado fotovoltaico tem apresentado crescimento muito rápido e elevada especialização que induz significativas incertezas na estimativa de projeções de custos.

¹ Preço dos módulos no país de origem. Valores informados na data de chegada ao Brasil (Greener, 2019).

No capítulo 2, a Figura 2.19 ilustra as eficiências e potências de alguns módulos comercializados atualmente, classificados segundo o tipo de tecnologia.

É interessante observar que, segundo (REN21, 2019), o preço dos módulos FV foi reduzido 29 % aproximadamente em 2018, tendo um preço médio global de 22,4 ¢/W.

A Figura 4.18 contém os preços médios mensais de diferentes tecnologias de módulos FV desde o início de 2010 até o final de 2018. Observa-se uma importante redução nos preços de módulos cristalinos, em 2010 com preços acima de 2,5 USD/W a 0,5 USD/W aproximadamente em 2017. A Figura 4.19 ilustra a produção mundial de células/módulos fotovoltaicos desde 2005 até 2019, mostrando a China na liderança e uma produção mundial de mais de 120 GW em 2019.

Figura 4.18 Média mensal de preços para módulos fotovoltaicos por tecnologia e fabricante, 2010-2018 (IRENA, 2019)

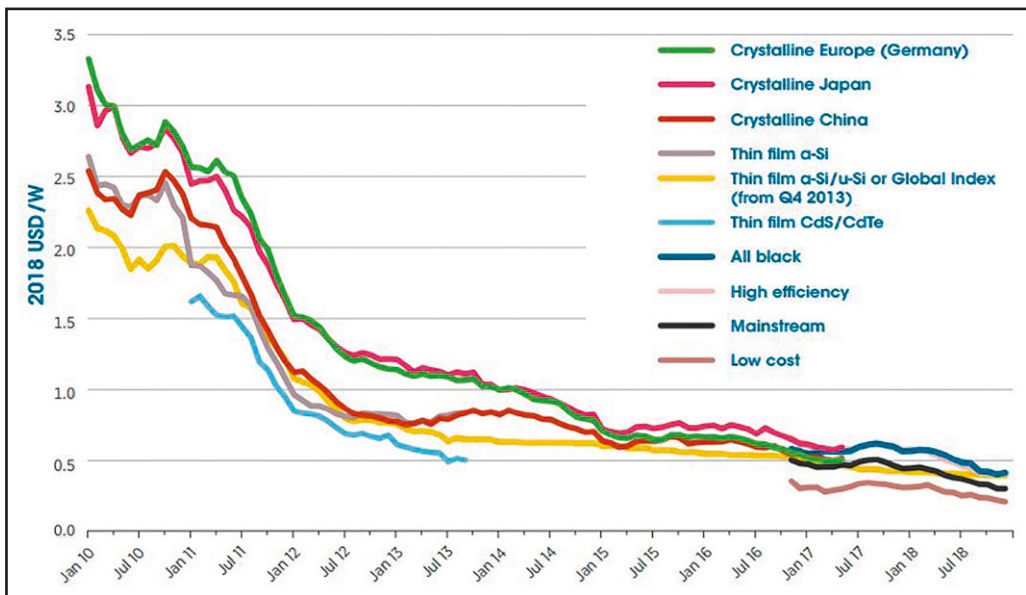
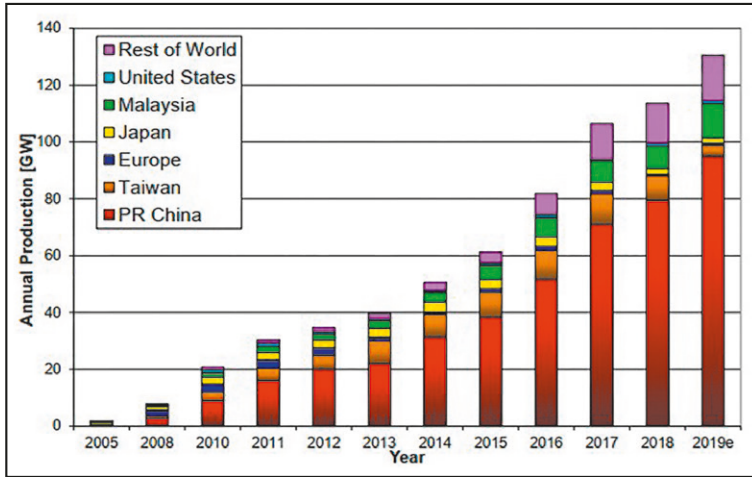


Figura 4.19 Produção mundial de células/módulos fotovoltaicos de 2005 a 2019 (estimativa)



Custo do inversor

O inversor é um componente eletrônico fundamental no sistema fotovoltaico. Ao início de 2018 seu custo era da ordem de 0,06 a 0,45 USD/Wac dependendo do tipo de sistema a ser instalado (Fu, Feldman, & Margolis, U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2018, 2018). Na Tabela 4.2 são mostrados os preços de vários tipos de inversores para aplicações residenciais, comerciais e industriais, assim como a conversão de preço de USD/Wac a USD/Wdc. Os preços e a conversão foram obtidos do *U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2018* do NREL.

Tabela 4.2 Preços de inversores (Fu, Feldman, & Margolis, U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2018, 2018)

Tipo de inversor	Setor	USD/Wac	DC-AC	USD/Wdc
String inverter monofásico	Residencial	0,14	1,15	0,12
Microinversor	Residencial	0,45	1,15	0,39
Otimizador de potência DC – String inverter	Residencial	0,20	1,15	0,18
String inverter Trifásico	Comercial	0,09	1,15	0,08
Inversor central	Industrial (módulos fixos)	0,06	1,36 (sobredimensionado)	0,04
Inversor central	Industrial (seguidor de 1 eixo)	0,06	1,30 (sobredimensionado)	0,05

Custo complementar – *Balance of System (BoS)* e Custos “*soft*”

O custo do BoS, compreende os custos dos componentes estruturais e elétricos da instalação, enquanto os custos *soft* referem-se aos custos dos serviços de instalação, impostos, licenças, aquisição de terras (quando necessário) e lucro dos instaladores. A seguir são relacionados de forma mais específica estes custos:

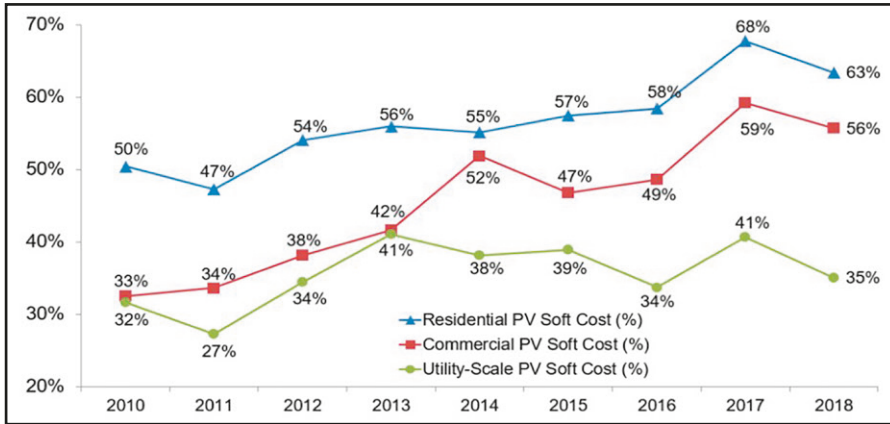
- Estrutura de sustentação mecânica dos módulos, opcionalmente com sistema de acompanhamento do movimento do sol (“tracking”);
- Componentes elétricos para conexão e operação;
- Serviços de preparação da área;
- Serviços de instalação e montagem;
- Equipamentos e instalações para armazenamento de energia, se for o caso;
- Projeto e gerenciamento da obra inclusive despesas para a obtenção de licenças e comissionamento.

A fixação das estruturas varia conforme o local onde o sistema será instalado, havendo soluções específicas para instalações de sistemas residenciais e comerciais.

A preparação da área para a instalação representa uma parcela importante do custo dos sistemas fotovoltaicos, porém é variável conforme a região e o país de instalação.

Os custos *soft* que envolvem o projeto e o gerenciamento da obra de instalação e licenças são usualmente incluídos nos preços de instalação nos sistemas de pequeno porte, residenciais ou comerciais. Como pode ser observado na Figura 4.20, esse valor, no início de 2018, representava 35 % para sistemas industriais, 56 % para sistemas comerciais e 63 % do custo total do sistema fotovoltaico nos Estados Unidos, segundo (Fu, Feldman, & Margolis, U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2018, 2018).

Figura 4.20 Variação dos custos *soft* de sistemas FV no período 2010-2018 (Fu, Feldman, & Margolis, U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2018, 2018)



Armazenamento de energia associado

Os sistemas de armazenamento de energia podem ser encontrados com diferentes tecnologias, todas com alto custo, e que ainda estão em desenvolvimento. Dentre essas, destacam-se a utilização de capacitores, vantajosa para armazenamento de curto prazo, as baterias chumbo ácido, mais econômicas, porém, com restrições nos ciclos de operação e exigência de cuidados no descarte, as baterias de íons de lítio e sulfeto de sódio, que alcançam alta capacidade, da ordem de milhares de kW.

Atualmente a tecnologia com maior uso é a de íons de lítio. A Figura 4.21 ilustra os custos de um sistema de armazenamento composto por baterias de íons de lítio, os custos são expressos em dólares de 2018 e mostra-se os custos para durações desde 0,5 h até 4 h para a mesma capacidade do sistema ($60 \text{ MW}_{\text{DC}}$). Na Figura 4.22 observa-se o comparativo de custos de um sistema fotovoltaico de 100 MW com seguidor de um eixo acoplado com um sistema de armazenamento com baterias de íons de lítio de 60 MW e duração de 4 h. A figura mostra três casos. O primeiro ilustra os custos do sistema FV e do sistema de armazenamento por separado, o segundo o custo dos sistemas acoplados e instalados no mesmo local com conexão DC e AC e o terceiro caso mostra o custo dos sistemas acoplados, porém, instalados em locais diferentes. Observa-se que o sistema com o custo mais baixo é aquele que acopla os sistemas com conexão DC e apresenta uma redução no custo de aproximadamente 1 % com respeito ao sistema com conexão AC. Ao instalar os sistemas em locais separados o custo incrementa-se em 8,6 % (com respeito ao sistema com o custo mais baixo).

Figura 4.21 Custos de um sistema de armazenamento com baterias de íons de lítio com aplicação industrial para duração de 0,5 a 4 h (60 MW_{DC}) (Fu, Remo, & Margolis, 2018 U.S. Utility-Scale PhotovoltaicsPlus-Energy Storage System Costs Benchmark, 2018)

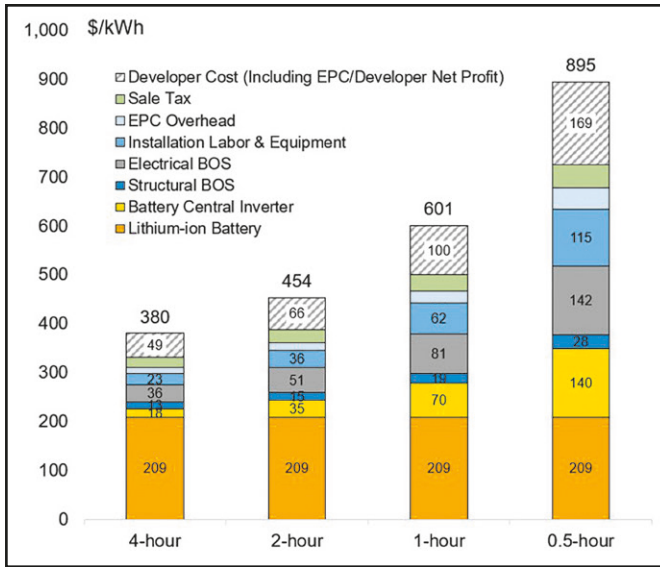
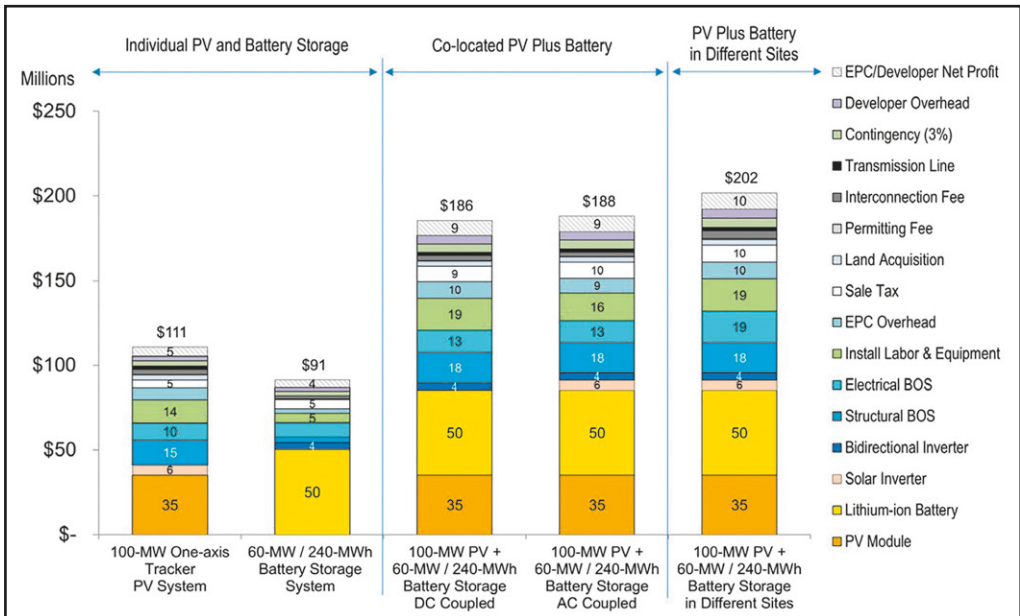


Figura 4.22 Comparativos de custo para sistemas fotovoltaicos com armazenamento (duração de 4 horas) em diferentes locais e no mesmo local (caso acoplado a DC e acoplado a AC) (Fu, Remo, & Margolis, 2018 U.S. Utility-Scale PhotovoltaicsPlus-Energy Storage System Costs Benchmark, 2018)

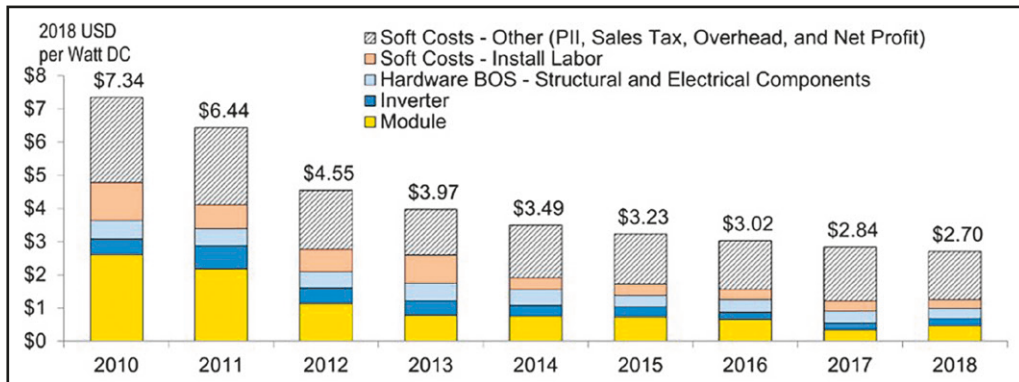


Para exemplificar a restrição econômica da utilização de armazenamento, observa-se que um sistema fotovoltaico de 1 kW_p, em ambiente com boas condições de insolação, pode fornecer cerca de 1500 kWh/ano, ou cerca de 4 kWh/dia. Supondo que metade dessa energia seja necessária no período noturno, o sistema de armazenamento deverá ter capacidade para armazenar 2 kWh de energia útil, que correspondem a baterias com capacidade de armazenamento de 10 kWh para que sua vida útil seja otimizada, o que corresponde a um custo de armazenamento de aproximadamente de US\$1.500,00 (150 US\$/kWh). Considerando que o custo do sistema de geração seja US\$3.000,00 o armazenamento, que é equivalente aos 50 % do custo total do sistema, eleva o custo total a US\$ 4.500,00. O anterior foi apenas um exemplo, pois como mostrado na Figura 4.21 o custo da bateria ao início de 2018 era de 209 USD/kWh para um sistema de 60 MW_{DC} (Fu, Remo, & Margolis, 2018 U.S. Utility-Scale PhotovoltaicsPlus-Energy Storage System Costs Benchmark, 2018).

Os sistemas híbridos geração-armazenamento representam uma solução interessante para instalações fotovoltaicas desconectadas da rede pública, podendo ainda haver um sistema de alimentação de retaguarda por meio de gerador diesel elétrico.

A Figura 4.23 ilustra a estrutura de custos para sistemas residenciais nos Estados Unidos, no período 2010-2018. Estes custos foram determinados em um estudo do NREL e têm como premissas o uso de sistemas instalados no teto das residências e capacidade instalada de 6,2 kW. Segundo o estudo alguns dos fatores que produziram a redução de custos foram a maior eficiência dos módulos, a redução nos preços do BoS, os custos mais baixos da cadeia de suprimento, a diminuição no inventário de módulos de custo mais alto e o menor custo de licenciamento, entre outros (Fu, Feldman, & Margolis, U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2018, 2018).

Figura 4.23 Estrutura de custos para sistemas fotovoltaicos residenciais nos Estados Unidos, 2010-2018. Inflação ajustada (Fu, Feldman, & Margolis, U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2018, 2018)

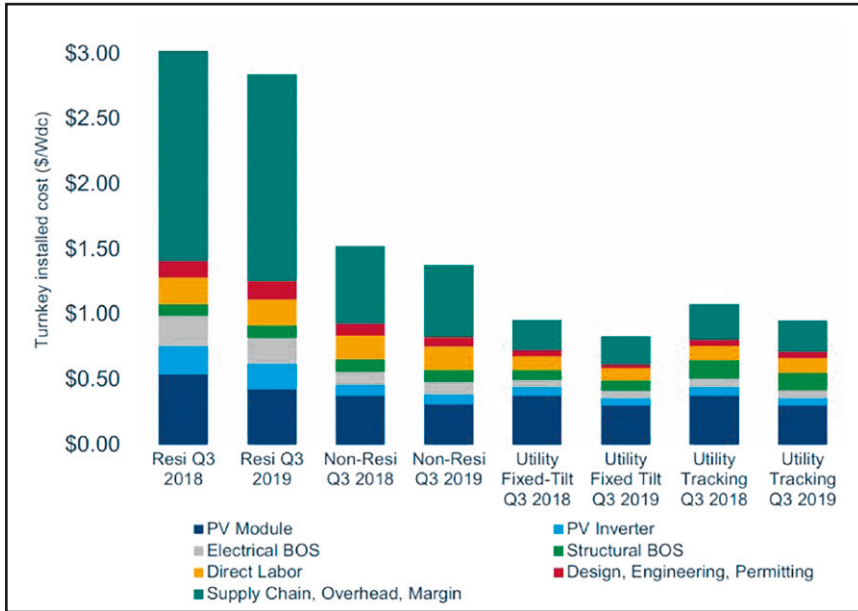


O custo dos sistemas fotovoltaicos

O custo total de um sistema fotovoltaico é composto pelas parcelas referentes ao custo dos módulos, do inversor, do BoS e dos custos *soft*, sendo função da tecnologia utilizada, do local (solo ou telhado), especificações técnicas e evidentemente, do porte.

Nos terceiro trimestre de 2019 o custo médio de um sistema FV, no mercado estadunidense, esteve entre 0,83 a 2,84 US\$/W_{DC} para instalações de sistemas conectados à rede dependendo da aplicação, como mostrado na Figura 4.24. Segundo o relatório da Associação de Indústrias de Energia Solar dos Estados Unidos (SEIA, por sua sigla em inglês) os custos dos segmentos de mercado residencial, não residencial, industrial com módulos fixos e industrial com seguidor de um eixo reduziram-se 6,0 %, 9,4 %, 13,1 % e 11,6 % respectivamente de 2018 para 2019 (SEIA, 2019).

Figura 4.24 Custo médio de um sistema fotovoltaico por segmento de mercado nos Estados Unidos (SEIA, 2019)



Para a análise dos custos, os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em quatro grupos conforme a destinação da energia produzida:

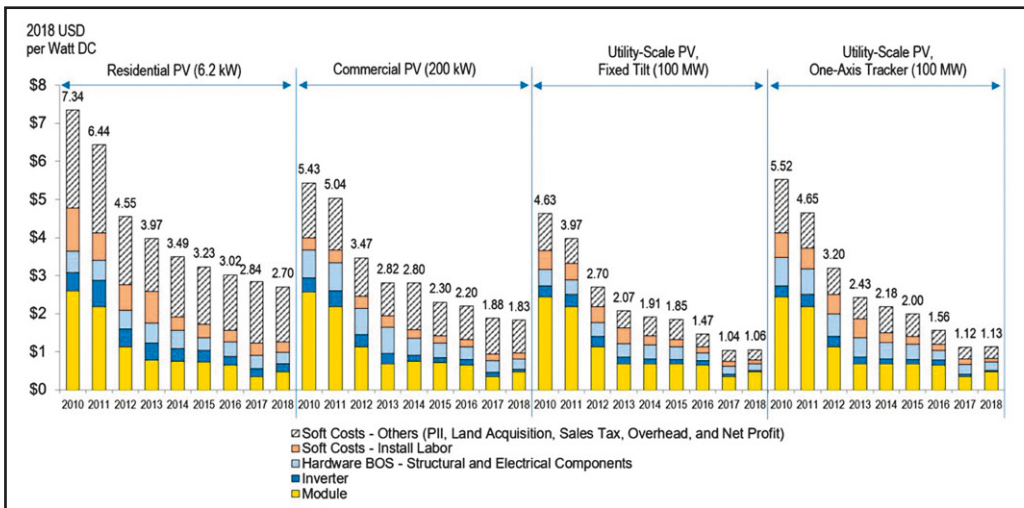
- Pequenos sistemas fotovoltaicos residenciais ou comerciais (menores que 20 kW);
- Sistemas residenciais ou comerciais de porte médio (de 20 kW a 1 MW);
- Sistemas fotovoltaicos de porte maior de 1 MW;
- Sistemas isolados da rede pública.

Os sistemas isolados são aplicados para o suprimento que iluminarão unidades consumidoras em locais remotos não servidos pela rede pública. As aplicações com sistemas desconexos da rede dominaram o mercado na década de 1990, quando políticas de incentivos ao uso da energia fotovoltaica foram lançadas por vários países, motivando o grande crescimento de instalações conectadas à rede pública.

Nos últimos anos as instalações de grande porte, fixadas ao solo, têm tido grande desenvolvimento, quer pelas mudanças ocorridas nos sistemas de incentivo ao seu uso, quer pela redução de seus custos.

O custo total de um sistema fotovoltaico conectado à rede é composto por painéis fotovoltaicos, inversor, estrutura de suporte/montagem, cabeamento e projeto e instalação, cujas participações, estão apresentadas na Figura 4.25.

Figura 4.25 Comparativa de custos de sistemas fotovoltaicos nos Estados Unidos, 2010-2018 (Fu, Feldman, & Margolis, U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2018, 2018)

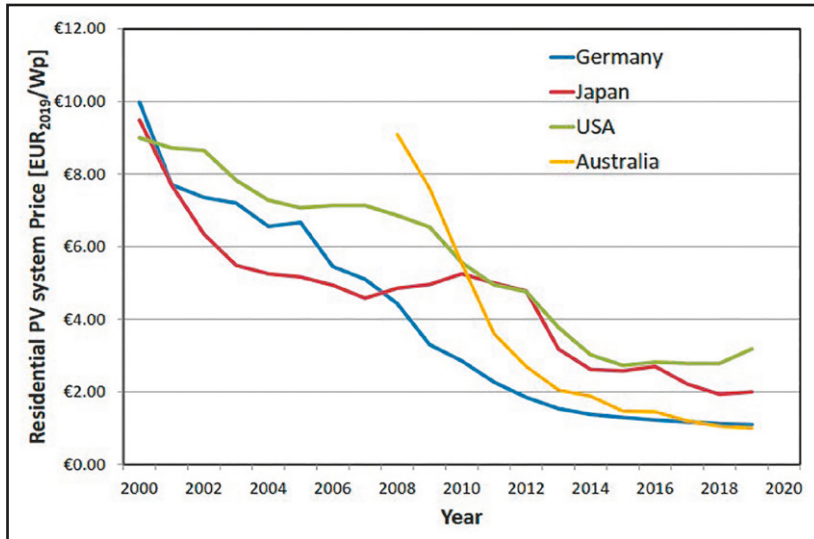


Custo dos sistemas fotovoltaicos residenciais

Os custos de sistemas fotovoltaicos residenciais apresentam significativas diferenças conforme o país em que é aplicado, sobretudo pelas políticas de incentivos vigentes.

A Figura 4.26 ilustra a variação do custo de sistemas fotovoltaicos, em função do país onde foi instalado, no período 2000-2019, observando-se que um sistema residencial na Alemanha e na Austrália custa aproximadamente 1,0 €/Wp, enquanto no Japão alcança 2,0 €/Wp e nos Estados Unidos acima de 3 €/Wp.

Figura 4.26 Evolução dos preços de sistemas fotovoltaicos residenciais em vários países (Jäger-Waldau, 2019)



Custo dos sistemas fotovoltaicos de grande porte

Os sistemas fotovoltaicos de grande porte, cuja potência instalada é maior do que 1 MW, geralmente operam conectados à rede e seu custo depende, além da tecnologia fotovoltaica, do local de instalação e da presença de sistema de acompanhamento do movimento do sol (“*tracking*”).

A Figura 4.27 ilustra o custo de sistemas fotovoltaicos de grande porte em vários países do mundo em 2018 e a Figura 4.28 mostra o custo médio destes sistemas em mercados competitivos.

Figura 4.27 Custos de sistemas fotovoltaicos para centrais elétricas em vários países do mundo (Wang, Global utility-scale solar PV systems cost by key country 2018, 2019)

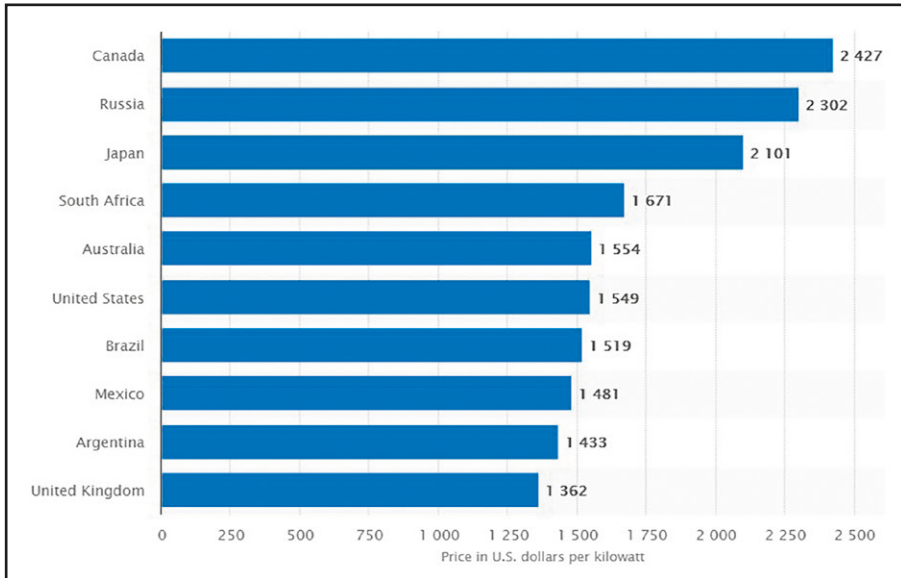
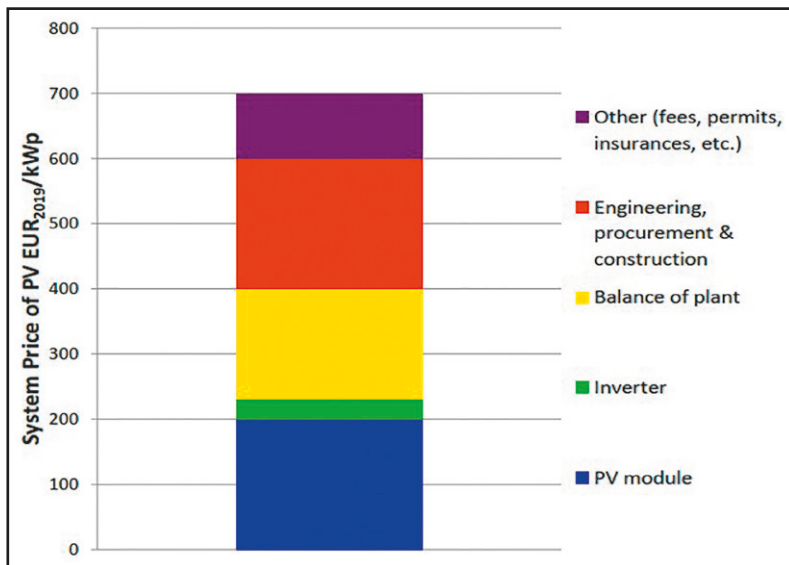


Figura 4.28 Estrutura de custos médios de sistemas FV para centrais elétricas (Jäger-Waldau, 2019)



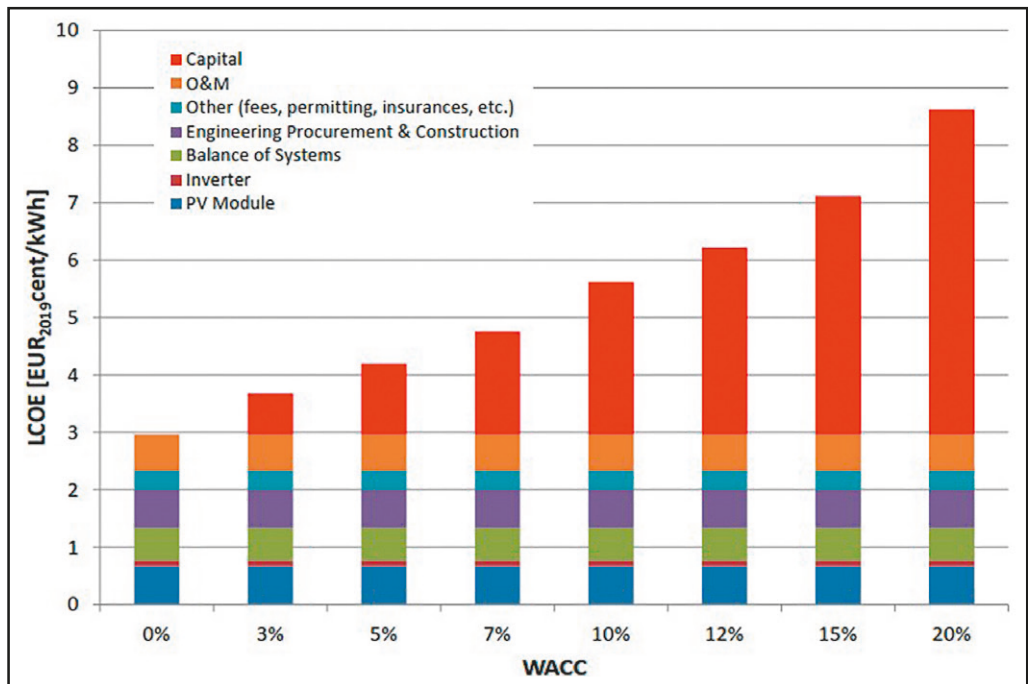
Os sistemas fotovoltaicos de grande porte, apresentaram um custo médio de 0,7 €/Wp.

4.2.2 O custo da energia produzida por fontes fotovoltaicas

Custos na Europa

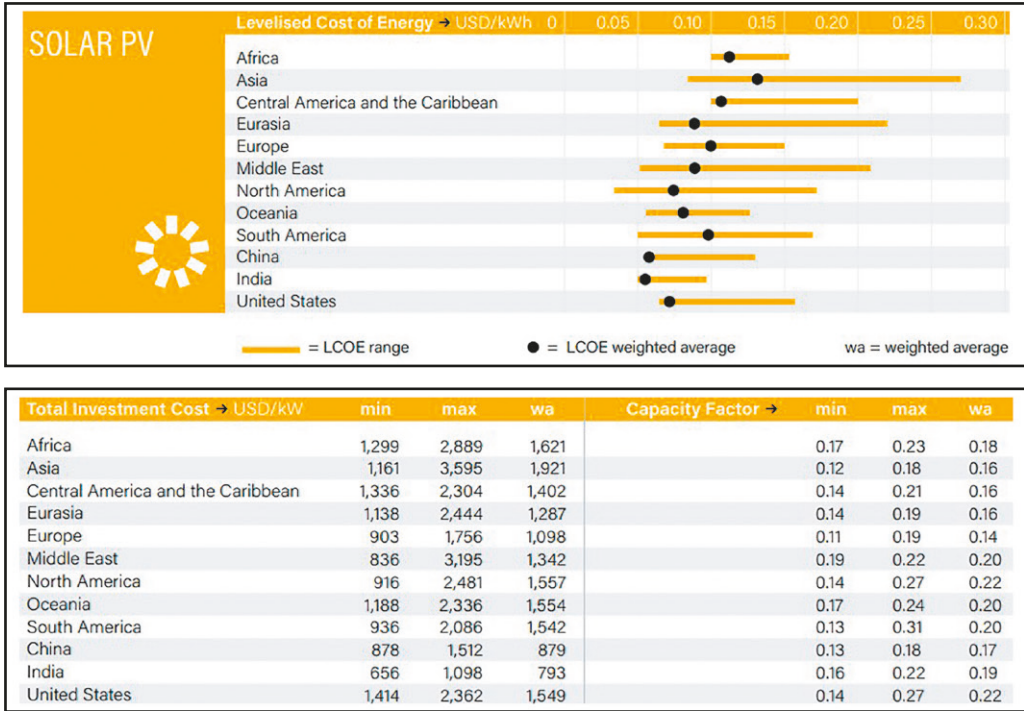
Um dos estudos mais recentes e detalhados sobre o custo da energia produzida por sistemas fotovoltaicos foi realizado pelo serviço de ciência e conhecimento da Comissão Europeia (do inglês: *European Commission's science and knowledge service*) (Jäger-Waldau, 2019). Neste estudo são apresentados diferentes dados do mercado fotovoltaico mundial, custo de eletricidade e fatores que influenciam esse custo.

Figura 4.29 LCOE em função da variação da taxa de desconto (WACC) (Jäger-Waldau, 2019)



Observa-se na Figura 4.30 que o custo da energia produzido por instalações fotovoltaicas do tamanho de usinas, no mundo em 2018 situou-se na faixa de 0,058 a 0,219 USD/kWh e média de 0,085 USD/kWh. A variação deve-se à diferença no nível de irradiação dos locais onde foram instalados os sistemas. Neste caso não foram tidos em conta as diferentes políticas de apoio financeiro para a instalação de sistemas FV (REN21, 2019).

Figura 4.30 LCOE, custo de investimento e fator de capacidade de usinas FV para diferentes regiões do mundo em 2018 (REN21, 2019)



Custos nos Estados Unidos

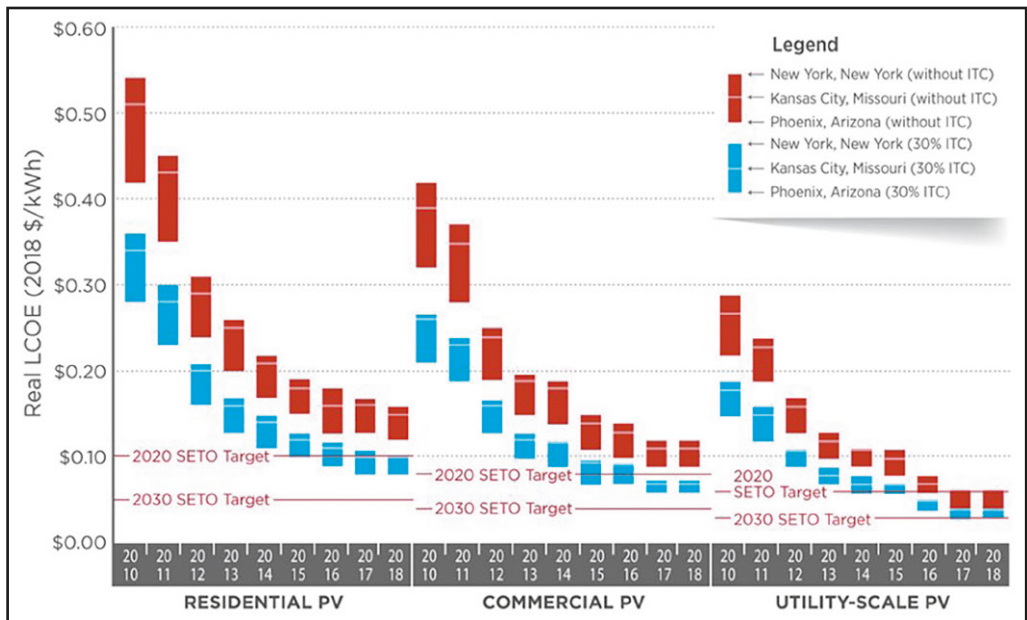
Pesquisa realizada pelo NREL para estimar custos dos sistemas fotovoltaicos e da energia produzida por estes nos Estados Unidos. A Figura 4.31 apresenta os custos da energia elétrica para sistemas fotovoltaicos em tamanho residencial, comercial e de usina, respectivamente, para três cidades dos USA com diferentes disponibilidades do recurso solar, a saber, Phoenix (alta disponibilidade), Kansas City (meia) e New York (baixa). Nos gráficos, são mostrados os valores do LCOE incluindo o valor de 30 % do crédito fiscal federal para investimentos (ITC).

Observa-se que os sistemas FV residenciais e comerciais estão 89 % e 91 % perto de atingir a meta de preços de eletricidade do Escritório de Tecnologias de Energia Solar (SETO, pela sua sigla em inglês) do Departamento de Energia em 2020, e os sistemas do tamanho de usina atingiram a meta 3 anos antes.

De 2010 a 2018, o LCOE fotovoltaico residencial caiu 71 % (6 % entre 2017 e 2018), resultando em um LCOE não subsidiado de 0,12 a 0,16 USD/kWh (0,08 a 0,10 USD/kWh ao incluir o ITC federal). No caso comercial, o LCOE diminuiu

72 % no período analisado (3 % entre 2017 e 2018), o que corresponde a um LCOE de 0,09 a 0,12 USD/kWh quando não subsidiado e de 0,06 a 0,08 USD/kWh quando subsidiado. Para sistemas de grande porte o valor do LCOE está na faixa de 0,04 a 0,06 USD/kWh (ou 0,03 a 0,04 USD/kWh ao incluir o ITC federal). Nesse caso, o LCOE teve uma diminuição entre 80 e 82 % do seu valor entre 2010 e 2018 (de 6 % a 9 % entre 2017 e 2018).

Figura 4.31 Preços da energia elétrica para sistemas FV residenciais, comerciais e do tamanho de usina no período 2010-2018 para três cidades de Estados Unidos (Fu, Feldman, & Margolis, U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2018, 2018)



4.2.3 O potencial para a redução de custos

A redução de custos que vem se verificando com a tecnologia fotovoltaica é devido, principalmente, a melhorias na tecnologia de fabricação e a economia de escala quer nos painéis, quer nas obras complementares, BoS.

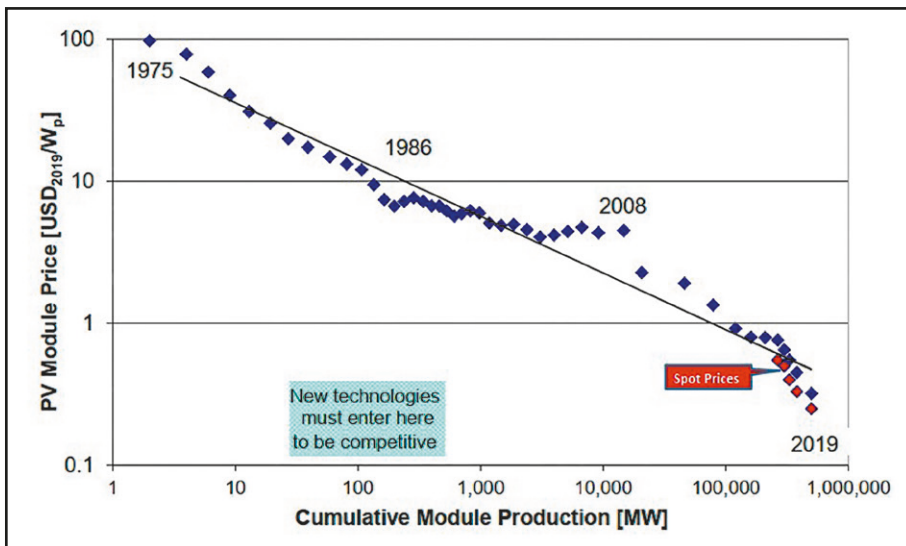
A análise a seguir foca a potencialidade de novas reduções de custo nos painéis e no BoS, considerando os efeitos das melhorias na fabricação e a economia de escala.

A tendência histórica dos preços

Freqüentemente cita-se que a “Lei de Moore” é válida para a tecnologia fotovoltaica, da mesma forma que o é para semicondutores, quando o custo se reduz de 20 % cada vez que a capacidade produtiva acumulada dobra, conforme mostra a Figura 4.32, que apresenta a tendência de preço de módulos fotovoltaicos.

Nota-se que houve uma descontinuidade no nível de capacidade de 4.000 MW, por contingência de matéria-prima. Entre 2008 e o final de 2012, houve uma queda massiva no preço dos módulos de 80 %, e só em 2012 foi de 20 %, isto criou sérios problemas financeiros para muitos fabricantes e levou ao fechamento de um número significativo de empresas. Esta queda dos preços foi consequência das grandes sobre capacidades, como resultado de investimentos muito ambiciosos entre 2005 e 2011. Entre 2013 e 2015, a diminuição de preço foi relativamente moderada antes de acelerar novamente no final de 2015. Ao mesmo tempo, a volatilidade dos preços spot do módulo aumentou significativamente.

Figura 4.32 Variação da taxa de aprendizado em função da capacidade instalada (Jäger-Waldau, 2019)



O desenvolvimento tecnológico

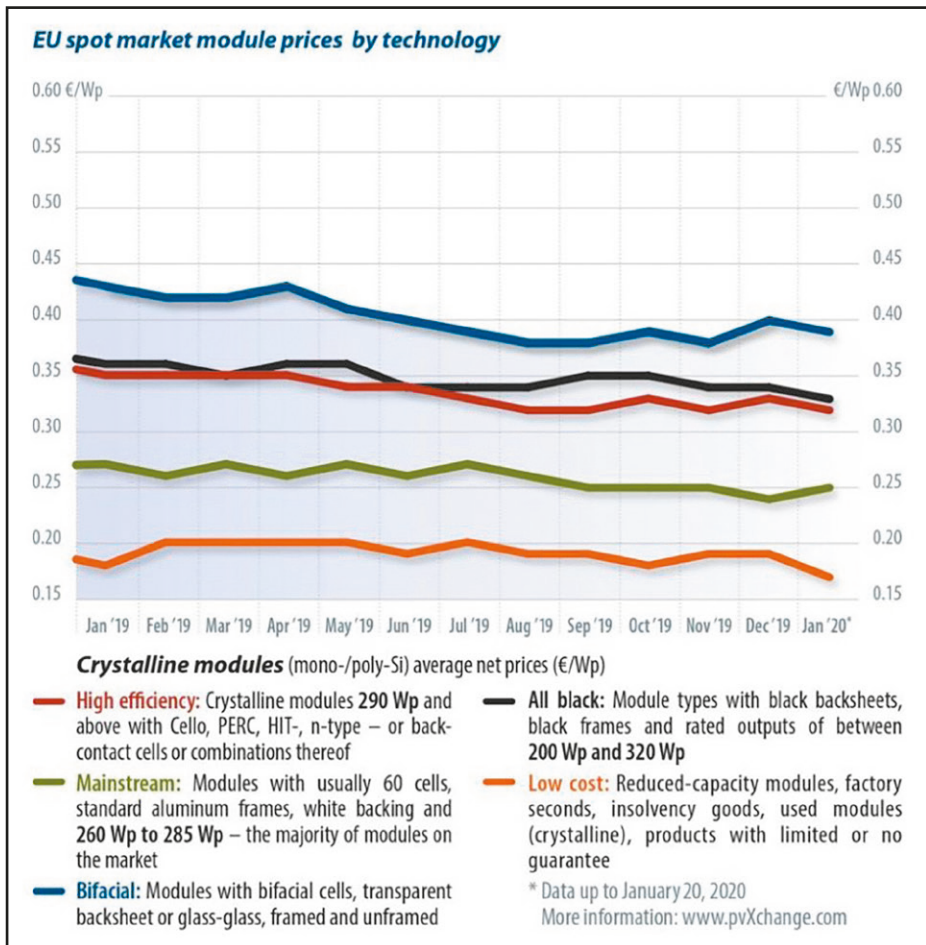
A evolução tecnológica na área fotovoltaica vem desempenhando um papel muito importante para se alcançar o objetivo primordial que é o aumento do rendimento na conversão da luz solar em energia elétrica.

No âmbito da evolução tecnológica de painéis fotovoltaicos são considerados quatro tipos de rendimentos: o teórico, o medido em laboratório sobre um protótipo, o obtido na linha de produção e, finalmente, o rendimento em operação no campo. Evidentemente há grandes diferenças entre esses rendimentos.

Os dispositivos fotovoltaicos diferem em rendimentos, desde valores da ordem de 10 % referente às células de baixo custo como as de filmes finos, até 20 % nas de alto custo e como as células monocristalinas.

A Figura 4.33 ilustra o preço de módulos fotovoltaicos de diversas tecnologias.

Figura 4.33 Evolução de preços de módulos fotovoltaicos por tecnologia (PV magazine, 2020)



O valor do rendimento tem impacto direto sobre o custo da célula e do painel, pois um maior rendimento leva a maior potência por unidade de área e de consequência à redução da área do painel.

A economia de escala

A capacidade mundial de produção de painéis fotovoltaicos tem apresentado crescimento acelerado, com capacidade de fabricação de painéis, seja de silício cristalino ou de filme fino.

Nos últimos anos, o mercado fotovoltaico na China cresceu muito rapidamente, verificando-se um aumento de 20 vezes em apenas quatro anos. China e Taiwan produzem mais de 50 % das células ao silício cristalino e a China é a líder mundial na exportação de células fotovoltaicas.

Figura 4.34 Distribuição da produção mundial de módulos FV em 2018 (Wang, Distribution of solar photovoltaic module production worldwide in 2018, by country, 2020)

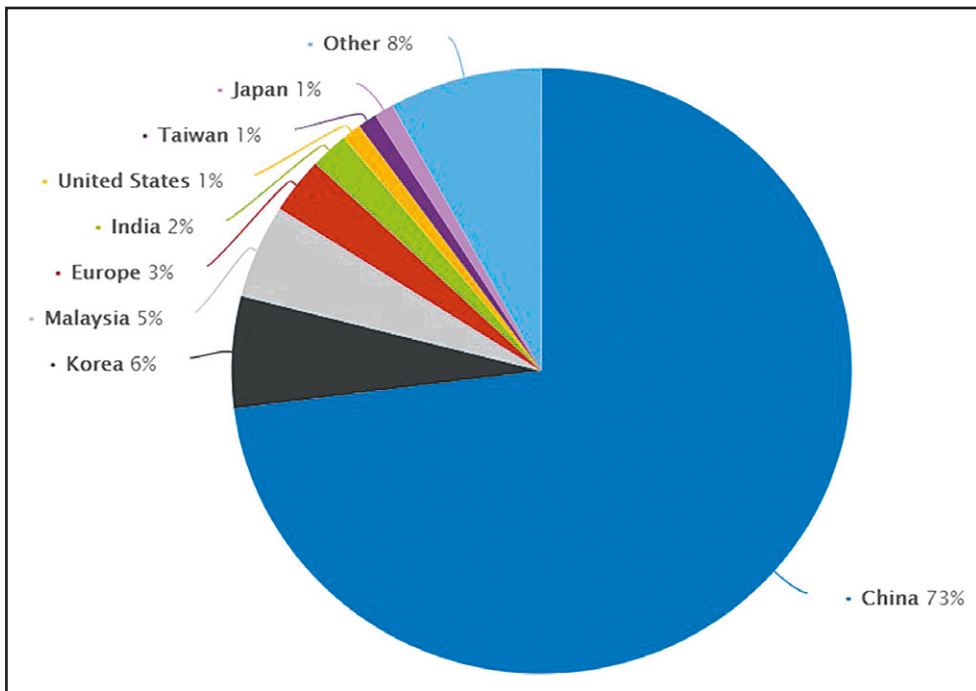
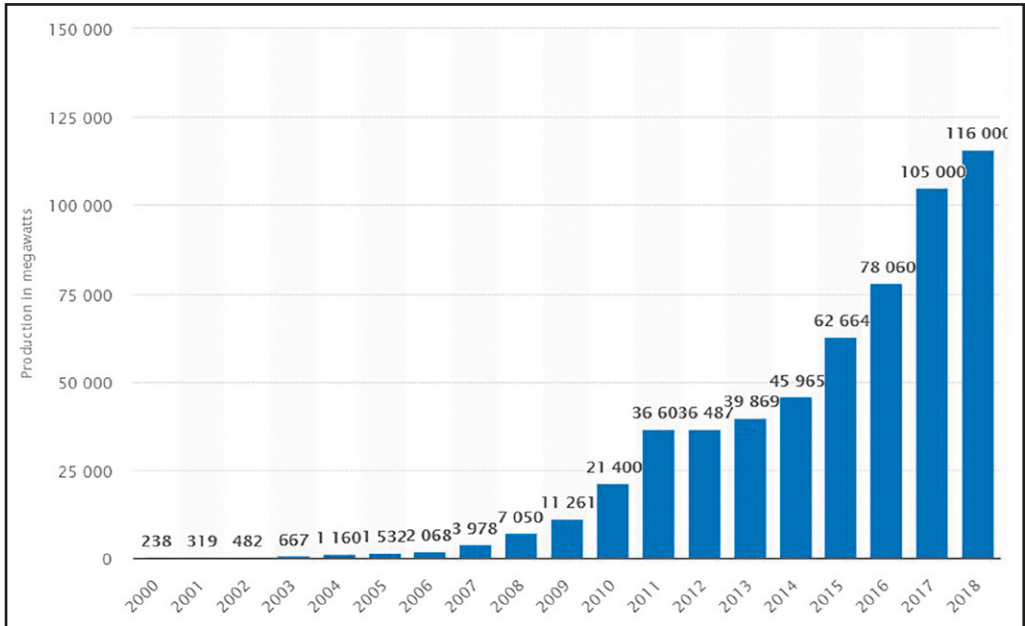


Figura 4.35 Produção anual global de módulos FV de 2000 a 2018 (Wang, Annual solar module production globally from 2000 to 2018, 2020)



Esse potencial de redução dos custos está associado à otimização e inovações de projeto, tais como:

- Otimização de inversores quanto à padronização, escala de produção e aumento da vida útil. Há pesquisas sobre possível inclusão do inversor no seio das células solares, por meio de integração eletrônica;
- Introdução de critérios inovadores nas estruturas, como utilizar o próprio painel (ou o vidro) como elemento estrutural, dispor espaçamentos e inclinações dos painéis para aliviar a pressão do vento e, portanto, minimizar os esforços mecânicos na estrutura;
- Maior eficiência na instalação decorrente de experiência adquirida, automação e maiores níveis de pré-montagem, juntamente com uma padronização adequada e utilização de pré-moldados;
- Padronização dos componentes por si promove redução de preços, que pode ser acentuada na medida em que contribui com a economia de escala.

A Figura 4.36 ilustra as reduções no custo de um sistema fotovoltaico por causa da economia de escala, o exemplo mostra a economia produzida ao aumentar a capacidade de uma usina de 50 a 100 MW.

Figura 4.36 Quadro das reduções pela economia de escala (Fu, Feldman, & Margolis, U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2018, 2018)

