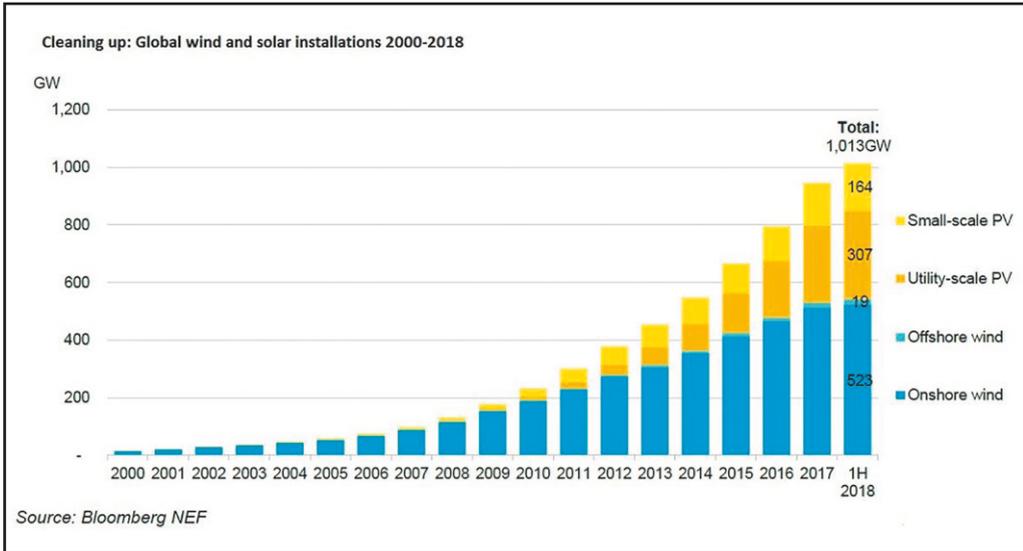


TENDÊNCIAS NA EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS

Desde 2010, vem ocorrendo aumento significativo da instalação de geração solar nos telhados de residências e edifícios comerciais, como mostra Figura 3.1. Essas instalações fizeram surgir um novo tipo de consumidor, o prosumidor, aquele que também pode gerar energia para rede. A Figura 3.1 também mostra que, após 2013, a geração solar de médio e grande porte ultrapassou a de pequeno porte em capacidade instalada e o crescimento da geração eólica no mar se inicia em 2015 e ainda é muito inferior à capacidade instalada em terra.

Figura 3.1 Potência instalada de solar e eólica no mundo (Willuhn, 2018)



Desta forma, constata-se que os sistemas elétricos de potência, que estão em constante evolução, se encontram no início de um processo para tornar a operação do sistema mais segura e mais econômica (Li, Shen, Wang, & Jiang, 2016). Essa transformação está associada ao crescimento da demanda, à diversificação dos tipos de geração, à modernização do sistema de transmissão e de distribuição, bem como à utilização de sistemas de armazenamento de energia e, principalmente, a crescente integração de todos esses sistemas. Esses temas são tratados a seguir.

3.1 CARACTERÍSTICAS DA DEMANDA

Embora a preocupação com mudanças climáticas tenha se intensificado, tem se verificado o crescimento da demanda de energia de forma global, o que tende a agravá-la. Os próximos itens tratam deste crescimento de consumo, assim como de alternativas de amenização, como resposta à demanda e a emulação de plantas virtuais de geração de energia.

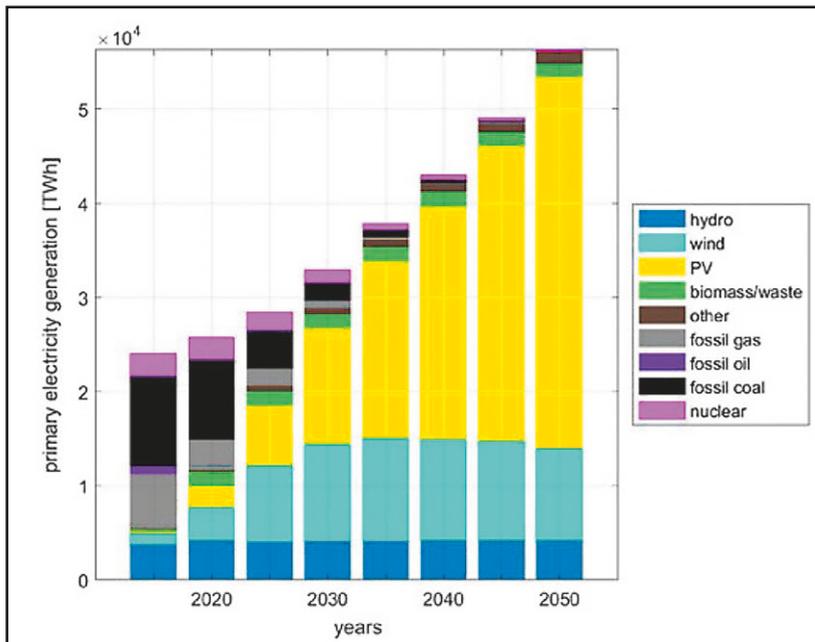
3.1.1 Crescimento da demanda

A previsão da demanda de energia é sempre uma tarefa difícil por se basear em índices com grandes incertezas. De acordo com (Breyer, y otros, 2018), foi

previsto que a demanda mundial por energia elétrica aumentará a taxa média de 2 % ao ano entre 2015 e 2050, elevando a demanda global de 24.310 TWh para cerca de 48.770 TWh. Essa projeção se deve à estimativa do aumento populacional, que alcançaria 2,4 bilhões de pessoas, e à utilização de carros elétricos que devem fazer parte da vida cotidiana dos cidadãos no ano de 2050. Além desses fatores, (Breyer, y otros, 2018) também indica que a demanda média per capita deve evoluir de 3,2 MWh/ano para 5 MWh/ano em 2050.

A demanda em 2015 (24.310 TWh) foi suprida por uma matriz energética com 65 % de sua geração de energia elétrica baseada em combustíveis fósseis e outros 10 % em usinas nucleares, sendo apenas 17 % por usinas hidrelétricas e 7 % por outras renováveis (Breyer, y otros, 2018). Para atender a demanda esperada para 2050, é inevitável que haja uma composição da matriz de geração com grande aumento da participação de geração de energia renovável, como apresenta a Figura 3.2.

Figura 3.2 Geração de energia mundial por fonte de 2015 a 2050 (Breyer, y otros, 2018)



Como pode ser visto na previsão proposta na Figura 3.2, a geração hidrelétrica deverá permanecer no mesmo patamar atual até 2050, devido ao alto custo de construção, às restrições ambientais e à inexistência de grandes potenciais

adequados para exploração. Enquanto isso, a geração por meio de combustíveis fósseis deve ser reduzida drasticamente no mesmo período.

Resposta da Demanda (*Demand Response*)

A resposta da demanda é um procedimento que se fundamenta num acordo entre consumidor e fornecedor de energia, que permite interromper ou reduzir o fornecimento em um determinado período, podendo deslocá-lo para outro. A motivação desse procedimento é restringir a oferta, em períodos de ponta, quando há limitação no transporte ou a geração incremental é indisponível ou de custo elevado, como por exemplo, a necessidade de acionamento de usinas térmicas.

Usualmente, criam-se programas para os quais os consumidores admitem cortes de carga em troca de benefícios ou incentivos, podendo envolver a utilização de recursos como geração própria e sistema de armazenamento de energia. Os desligamentos seguem uma ordem de prioridade para que o número de cargas afetadas seja o menor possível e que haja compatibilidade com as restrições dos consumidores que aderiram ao programa.

O programa de resposta da demanda para um consumidor que dispõe de recursos próprios de geração ou de armazenamento de energia pode ser feito de forma a considerar, além do corte de carga, possibilidades e combinações de fornecimento envolvendo os níveis de corte vis-à-vis esses recursos.

Vale ressaltar que a resposta à demanda pode ser utilizada para solucionar restrições operativas da rede como, por exemplo, linhas de transmissão operando próximas de seus limites de carregamento ou quando os limites de frequência ou tensão estiverem próximos de serem ultrapassados (Aghaei, Alizadeh, Abdollahi, & Barani, 2016).

Central Elétrica Virtual (*Virtual Power Plants*)

As centrais elétricas virtuais (VPP, do inglês *Virtual Power Plants*) são recursos energéticos distribuídos pela rede, constituídos por controle de corte de cargas ou de fontes de energia que aumentam a oferta em determinados períodos, agregados em controle de despacho centralizado. A energia resultante das VPP pode, idealmente, ser comercializada em mercados livres de energia.

As VPP terão um papel muito importante no futuro (Pasetti, Rinaldi, & Manerba, 2018) como parte de redes inteligentes e já são realidade em alguns mercados em vários países.

Em um primeiro momento, as VPP agregavam cargas industriais que pudessem ser desligadas conforme a conveniência e a disponibilidade acordada previamente com os consumidores para negociação no mercado de energia. A VPP não dispunha de geração, mas tinha o poder de cortar cargas, o que, de certa forma, era contabilizada como geração.

No segundo momento, uma nova modalidade de VPP surgiu agregando a disponibilidade de micro e minigerações distribuídas oferecendo melhores valores na venda dessa energia, do que seria apurado na injeção individual na rede.

Num terceiro momento, as VPP operam com mais flexibilidade na oferta ao mercado de energia, utilizando sistemas de armazenamento e geração distribuída, entre outros recursos distribuídos e conectados e despachados via internet, lançando mão de ferramentas de big data e de inteligência artificial. Em 2019, esse tipo de serviço já está sendo desenvolvido por meio de projetos da Autogrid na Índia, no Japão e na Austrália, com foco na expansão para o mercado chinês, asiático e europeu. Nos Estados Unidos, um projeto demonstrativo está sendo desenvolvido pela *Pacific Northwest GridWise* (Thavlov & Bindner, 2015).

Microrredes (*Microgrids*)

Uma microrrede é um conjunto de instalações, à jusante de uma subestação do sistema de distribuição, que inclui alguns tipos de geração de energia elétrica, armazenamento de energia e cargas. As microrredes podem operar conectadas à rede elétrica ou totalmente isoladas e autônomas. Dentre as vantagens das microrredes estão a diminuição do congestionamento da rede, já que a geração é feita próxima ao local de consumo, permitindo também possível postergação de investimento em novas usinas ou em linhas de transmissão, bem como o aumento da confiabilidade e possível redução de custo de energia (Lotfi & Khodaei, 2017). Por outro lado, existe a possibilidade de impacto nos níveis de qualidade de energia na operação isolada, causado pela variação das fontes renováveis que geralmente são utilizadas (Bellido, 2018) e as dificuldades inerentes de operação de sistemas em ilhas.

3.2 CARACTERÍSTICAS DA GERAÇÃO

A evolução das tecnologias de geração de energia elétrica tem contribuído para o seu estabelecimento na expansão das fontes renováveis no setor elétrico,

fazendo com que a matriz de geração mundial tenha se alterado rapidamente nos últimos anos.

3.2.1 Geração centralizada

A geração centralizada se caracteriza por ter grandes usinas, geralmente afastadas do centro de carga, desenvolvidas com o intuito de reduzir o custo da produção de energia. Alguns dos motivos que levam a essa concentração de energia em pontos centralizados são (Martin, 2009):

- Aumento do tamanho das turbinas;
- Busca por uma melhor eficiência energética;
- Aumento da confiabilidade ao consumidor final;
- Maior restrição ambiental em locais próximos aos grandes centros;
- Regulamentações favorecendo grandes usinas geradoras.

O aumento das plantas de geração possibilitou um aumento da eficiência energética, uma vez que passaram a ser capazes de lidar com maiores variações da demanda. A operação centralizada trouxe maior economia e flexibilidade para a operação da rede.

O atendimento da demanda, quando feito com a geração centralizada, torna-se dependente das linhas de transmissão que interligam a geração e a carga, porém, nela podem se conectar diferentes tipos de plantas de geração fazendo com que a demanda seja atendida por uma combinação de fontes. Para que a operação fosse centralizada e uniformizada, agentes de operação dos sistemas e agências reguladoras foram criadas e, de certa forma, favoreceram grandes usinas. Com as limitações ambientais atuais, grandes empreendimentos tradicionais deixam de ser atrativos. No Brasil, a criação de programas/leilões de energia específicos para energias alternativas, iniciado pelo PROINFA, deu início a uma movimentação rumo a uma diversificação da matriz brasileira.

Os novos objetivos que a geração centralizada deve ter no cenário com maior penetração de energias renováveis é distinto dos objetivos iniciais desta modalidade e os desafios são grandes para as próximas décadas. Um desses

grandes desafios é o de gerar energia no mar utilizando turbinas eólicas e levar essa energia para o sistema em terra. Com o aumento da capacidade das turbinas eólicas para aplicações no mar chegando por volta de 12 MW por turbina, os locais mais adequados estão se tornando mais distantes e mais profundos. Para essa nova modalidade de instalações flutuantes necessitam-se novas tecnologias (The American Geosciences Institute, 2017). De certa forma, elas são componentes-chave de transição para um futuro com menos emissões de gases de efeito estufa e fontes mais limpas.

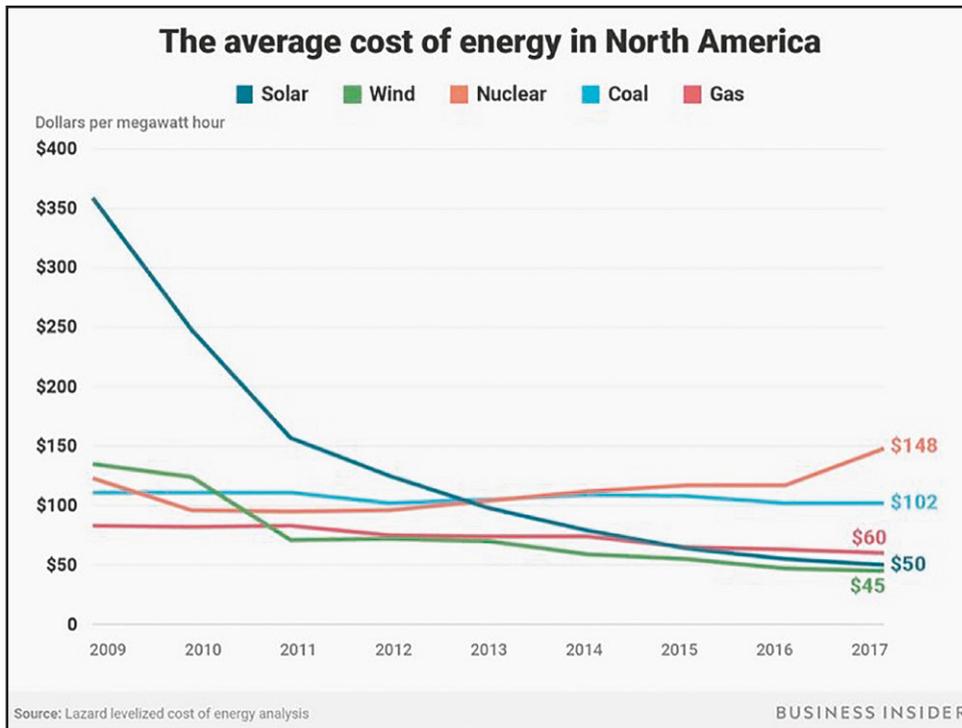
3.2.2 Geração distribuída

A geração distribuída (GD) se caracteriza pela instalação de unidades produtoras de energia elétrica de pequeno ou grande porte próximos das cargas. Geralmente a GD é constituída por fontes de energia renovável, predominantemente solar.

Embora o parque de GD venha ocorrendo de forma mais lenta no Brasil, no mundo já se atingiu quase 160 GW de potência instalada. Um estudo recente, elaborado pela Navigants, projeta que a geração distribuída atingirá 345 GW de potência instalada em 2028 (Silverstein, 2019).

Uma motivação desse aumento de instalações é a redução do custo de energia gerada pelas fontes alternativas mais comuns, como é apresentado na Figura 3.3. O custo da energia produzida pelas eólicas nos Estados Unidos alcançou 45 US\$/MWh em 2017, o que representa uma redução de cerca de 65 % em relação ao valor de 2019, de 140 dólares. A maior redução em termos de valor ocorreu no caso da energia gerada a partir das usinas solares, que em 2009 era pouco mais de 350 US\$/MWh e em 2017 chegou a 50 US\$/MWh. Uma redução de mais de 300 dólares, ou cerca de 85 %, em apenas 8 anos.

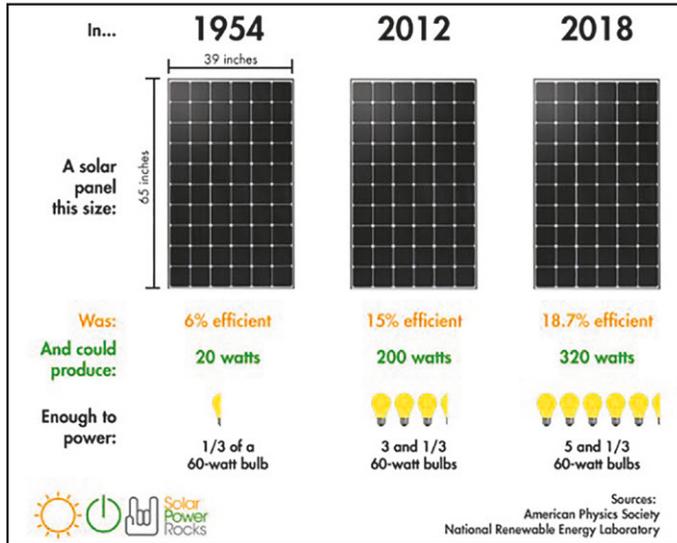
Figura 3.3 Variação do custo de energia de várias fontes de energia entre 2009 e 2017 nos Estados Unidos (Berke, 2018)



Nos últimos anos houve uma considerável evolução dos painéis fotovoltaicos e das turbinas eólicas, permitindo um aumento na taxa de energia gerada por painel e o aumento das potências das turbinas eólicas (ou aerogeradores).

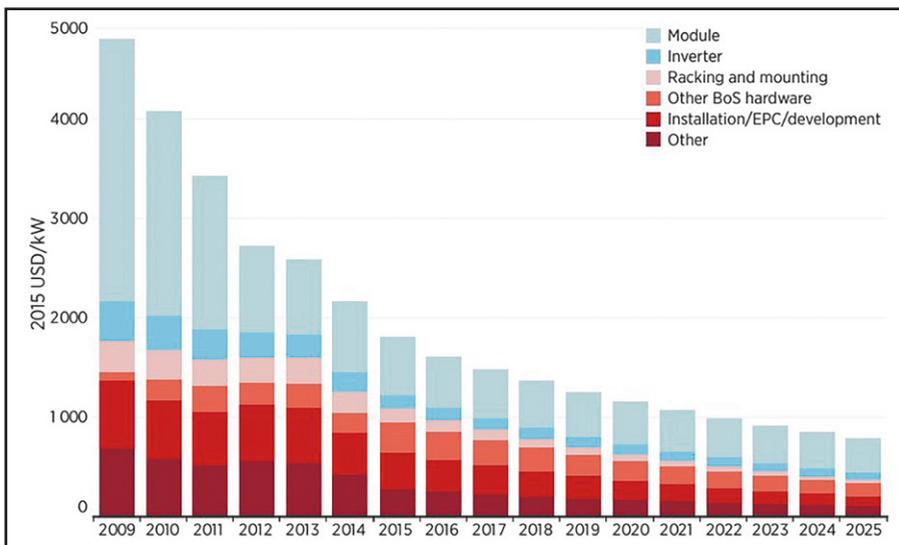
Na Figura 3.4 é apresentada a evolução dos painéis solares, que partiram de 20 W em 1954 para 320 W em 2018, representando aumento da eficiência de cerca de 200 % no período. Apenas entre 2012 e 2018 houve aumento significativo da potência gerada (60 %) e da eficiência (24 %), o que ressalta, em cerca de 6 anos apenas, a intensa evolução dessa tecnologia.

Figura 3.4 Crescimento da potência produzida por um painel solar (Zientara, 2018)



A evolução tecnológica da geração solar se resalta não só pelo aumento da eficiência e da capacidade específica do painel fotovoltaico, como também pela redução de custo. A Figura 3.5 apresenta preços verificados em 2009 e sua projeção até 2025 de diversos componentes de sistemas de geração solar instalado, onde se nota que o maior custo é o correspondente ao módulo.

Figura 3.5 Custo médio total ponderado global de energia solar PV instalada à escala de usina, 2009-2025 (IRENA, 2016)



Na Figura 3.6 é ilustrado o crescimento das turbinas eólicas desde 1980. Como se pode observar, a taxa de crescimento vem aumentando desde 2005 e é esperado que no futuro existam turbinas com a capacidade de cerca de 20 MW. Em (Kellner, 2019) é destacado que a GE espera ter, ainda em 2021, a certificação para a venda de turbinas de 12 MW de capacidade, indicando um possível adiantamento das previsões.

Figura 3.6 Crescimento em tamanho dos aerogeradores desde 1980 e prospectos. (IEA, 2013)

