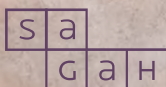


GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA



SOLUÇÕES
EDUCACIONAIS
INTEGRADAS

Geração de energia solar

Iberê Carneiro de Oliveira

OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM

- > Caracterizar a geração de energia a partir do sol.
- > Demonstrar o funcionamento das células fotovoltaicas.
- > Apresentar as principais usinas solares do Brasil.

Introdução

A energia solar sempre esteve presente na vida das pessoas, pois todo alimento que consumimos é indiretamente alimentado pelo sol — as plantas são alimentadas por meio da fotossíntese, e os animais se alimentam de plantas que realizaram fotossíntese. Porém, os avanços tecnológicos trouxeram formas de utilizar a energia proveniente do sol de forma mais direta, como para aquecer o banho ou acender uma lâmpada.

Essa mudança nas formas de lidar com a energia e com o sol tem propiciado uma revolução na forma de consumir e produzir energia. Ela ajuda a talhar o conceito de redes elétricas inteligentes, introduzindo as noções de consumidor-produtor e geração distribuída e mudando permanentemente, e cada vez de forma mais drástica, o mercado de energia elétrica.

Neste capítulo, você vai estudar os fundamentos da energia solar e vai conhecer as principais tecnologias que integram esse conceito, que é dividido em energia solar térmica e energia solar fotovoltaica. Você também vai aprender sobre as células fotovoltaicas e as suas características físicas e elétricas e vai verificar o panorama da geração fotovoltaica no contexto nacional.

Fundamentos da energia solar

O Sol é uma estrela capaz de produzir energia realizando a fusão de hidrogênio. A energia do Sol é transmitida para a Terra através do espaço, na forma de **radiação eletromagnética**, que é um tipo de onda eletromagnética (VILLALVA, 2015). A velocidade de propagação dessa onda eletromagnética é constante no vácuo e assume o valor de 299.792.458 m/s, sendo denominada simplesmente **velocidade da luz**.

Apenas uma pequena parte dessas ondas pode ser vista diretamente pelo olho humano, sendo essa parcela denominada **espectro de luz visível**. As ondas eletromagnéticas com frequência superior à luz visível são chamadas de **ultravioleta**, e as ondas eletromagnéticas com frequência menor que a presente na luz visível são chamadas de ondas de **infravermelho**, como pode ser observado na Figura 1.

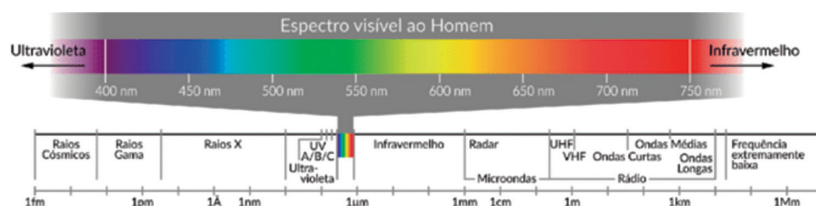


Figura 1. Espectro da radiação solar.

Fonte: Pereira (2017, p. 15).

O **espectro de radiação solar** é o conjunto de todas as frequências de ondas eletromagnéticas emitidas pelo Sol, incluindo a luz visível, que corresponde a 50% de toda a energia transmitida; o restante é formado por 45% de radiação infravermelha e 5% de radiação ultravioleta. Essa energia transportada pelo Sol pode ser captada na forma de luz ou calor (VILLALVA, 2015).

Energia solar térmica

Uma forma de aproveitar a energia proveniente do Sol é por meio da transformação da energia eletromagnética das ondas solares em **energia térmica** nos corpos que recebem essa radiação. Nos **sistemas de aquecimento solar** ou conversores heliotérmicos mais comuns, a radiação incidente nos coletores solares, instalados normalmente em telhados de prédios ou edifícios, é utilizada para aquecer a água, que é então armazenada para utilização em

chuveiros ou torneiras, diminuindo, assim, a necessidade de outra forma de energia, como gás ou eletricidade (VILLALVA, 2015). A Figura 2 apresenta o esquema de um aquecedor solar típico.

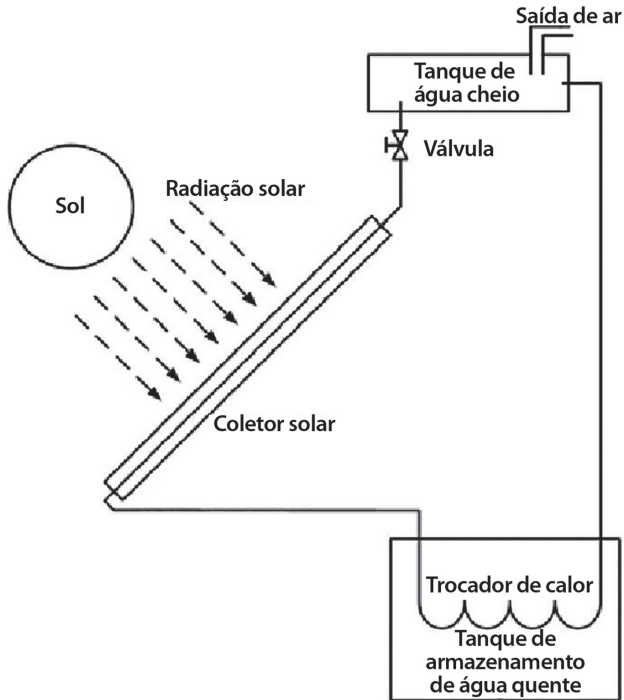


Figura 2. Aquecedor solar típico.

Fonte: Roonprasang, Namprakai e Pratinthong (2007, p. 94).

Outra forma de utilizar a energia heliotérmica é por meio da **geração de energia elétrica**. Nesse caso, a usina térmica capta e concentra o calor para aquecer um fluido. O fluido é transformado em vapor, que alimenta uma turbina conectada a um gerador elétrico (VILLALVA, 2015). O sistema coletor pode ser encontrado nas formas côncava, parabólica ou de espelhos planos com torre concentradora, como é mostrado na Figura 3, que apresenta uma usina térmica solar no deserto de Mojave, na Califórnia (Estados Unidos). Esses sistemas podem operar a temperaturas de 100°C a 400°C, para sistemas côncavos, e a temperaturas superiores a 400°C, em sistemas parabólicos ou de espelhos planos.



Figura 3. Usina solar térmica no deserto de Mojave, nos Estados Unidos.

Fonte: Delingha ([20--], documento *on-line*).

Embora existam vários exemplos de geração de energia elétrica a partir de fonte solar térmica, o modo mais utilizado para esse fim é a geração de energia solar fotovoltaica.

Energia solar fotovoltaica

O primeiro físico a observar a transformação da energia contida na radiação luminosa em energia elétrica foi Edmond Becquerel, em 1839, que denominou o fenômeno como **efeito fotovoltaico**. Esse efeito ocorre em alguns materiais semicondutores com capacidade de absorver a energia contida nos fótons da radiação luminosa incidente nesses materiais (ZILLES *et al.*, 2012). Essa energia quebra algumas ligações químicas presentes nos materiais semicondutores, liberando cargas elétricas para realizar trabalho.

O fenômeno fotovoltaico foi mais bem descrito com o desenvolvimento da mecânica quântica, que afirma que qualquer tipo de radiação eletromagnética tem partículas denominadas **fótons**, que possuem níveis específicos de energia. A energia de um fóton é dada pela equação:

$$E = h \times \frac{c}{\lambda}$$

Onde h é a constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), c é a velocidade da luz no vácuo e λ é o comprimento de onda do fóton em metros (ZILLES *et al.*, 2012).

O efeito fotovoltaico é a base da geração de energia solar fotovoltaica para a produção de eletricidade. Fótons incidentes no material semicondutor com determinada energia geram **pares elétron-lacuna** (PINHO; GALDINO, 2014). Esses elétrons e lacunas fotogerados podem mover-se dentro do material e aumentar sua condutividade elétrica, o que é chamado de **efeito fotocondutivo**.

Porém, para o aproveitamento da corrente e da tensão elétrica, é necessário aplicar um campo elétrico, a fim de separar os portadores, o que se obtém por meio da **junção P-N**. Os sanduíches de material semicondutor do tipo N e do tipo P aproveitam o efeito fotovoltaico, formando células que produzem diferença de potencial. Essa é a base das **células fotovoltaicas** que constituem os painéis fotovoltaicos.

Para obter a junção P-N, é necessário introduzir de maneira controlada impurezas no material; esse processo é chamado de **dopagem**. Uma vez preparada a célula fotovoltaica, ela é capaz de gerar uma pequena diferença de potencial quando incidida por luz. Essas células são associadas em série e paralelo, para se obter a tensão e a corrente próprias ao objetivo do módulo. Um esquema do funcionamento de uma célula fotovoltaica pode ser visto na Figura 4.

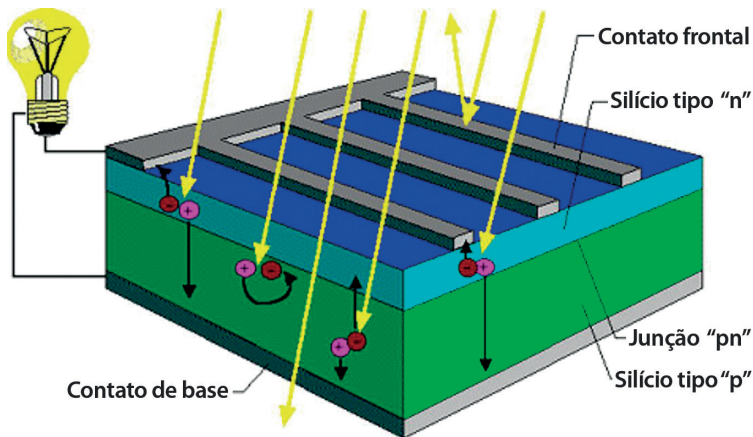


Figura 4. Efeito fotovoltaico.

Fonte: Energia... (2008, documento *on-line*).



Fique atento

O efeito fotovoltaico gera uma tensão e uma corrente contínuas nos terminais do material semicondutor, necessitando de uma interface inversora que transforma a corrente contínua em corrente alternada, caso seja necessário utilizar equipamentos de corrente alternada como motores síncronos, transformadores, etc.

Células fotovoltaicas

Uma célula fotovoltaica é composta de finas camadas de materiais semicondutores do tipo N e do tipo P. Os **semicondutores tipo N** têm elétrons em excesso, permitindo que eles tenham mobilidade. Os **semicondutores tipo P** têm lacunas de elétrons que, da mesma forma, permitem a mobilidade dessas lacunas. Esses dois materiais são colocados em contato, e a área onde isso ocorre é chamado de junção P-N.

Os materiais mais utilizados para a produção de células fotovoltaicas são o silício monocristalino e o silício policristalino, como mostra a Figura 5. Existem outros materiais, como o germano e o silício amorfo, porém são menos comuns (PINHO; GALDINO, 2014). A preferência pelo silício se deve ao fato de ele ser um elemento bastante comum na crosta terrestre, constituindo 28% da sua matéria.

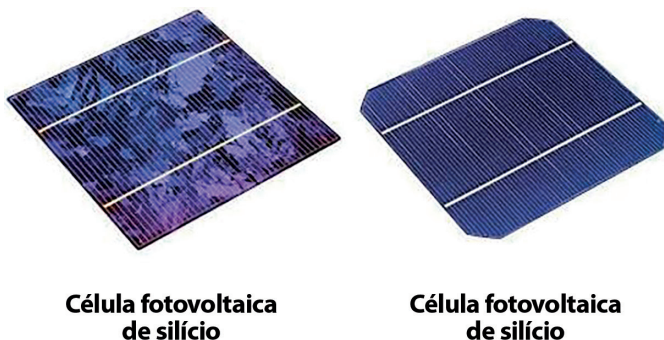


Figura 5. Silício policristalino e silício monocristalino.

Fonte: Adaptada de Souza (2019).

Porém, para a fabricação das células, é necessário primeiramente purificar o silício encontrado na natureza. A forma mais comum de esse material ser encontrado é ligado ao oxigênio, formando o quartzo, principal componente da areia. Após a purificação do silício, ele é passado para a fase de dopagem, para ganhar a característica de excesso de elétrons ou excesso de buracos (tipo N ou tipo P). Um dos materiais utilizados na dopagem do silício de tipo N é o fósforo, por possuir cinco elétrons em sua camada de valência, contra quatro do silício. Por sua vez, para confecção de semicondutores do tipo P, é usada a dopagem com boro, por ele possuir três elétrons em sua camada de valência (BULLOCK; GRAMBS, 1981).

Porém, nem toda a irradiação solar que chega à célula fotovoltaica é transformada em energia. Grande parte se perde por motivos como: reflexão e sombreamento dos contatos frontais, fótons com energia insuficiente, fótons com energia excedente, recombinação de elétrons, absorção na área de contato da junção P-N, entre outros. Porém, os avanços tecnológicos têm possibilitado o desenvolvimento de células solares cada vez mais eficientes.

Características elétricas das células fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são fabricadas majoritariamente em lâminas com área de 50 cm² e 150 cm² e espessura de 0,2 mm e 0,3 mm (ZILLES *et al.*, 2012). A aparência externa de uma célula fotovoltaica, como vista na Figura 5, é de uma lâmina azul-escura. Essas células demonstram a maior potência quando o Sol está com potência de irradiação de 1.000 W/m² e sua temperatura é de 25°C. Nessas condições, a corrente, dependendo do tamanho da célula, é de 1,5 A a 4,5 A, e sua tensão pode variar de 0,46 V a 0,48 V.

Dessa forma, as células são agrupadas em série e paralelo para produzir correntes e tensões convenientes para sua aplicação. Tendo sido atingida a configuração série/paralelo adequada, as células são encapsuladas para produzir um **módulo fotovoltaico**. A configuração elétrica da associação de células pode ser observada na Figura 6.

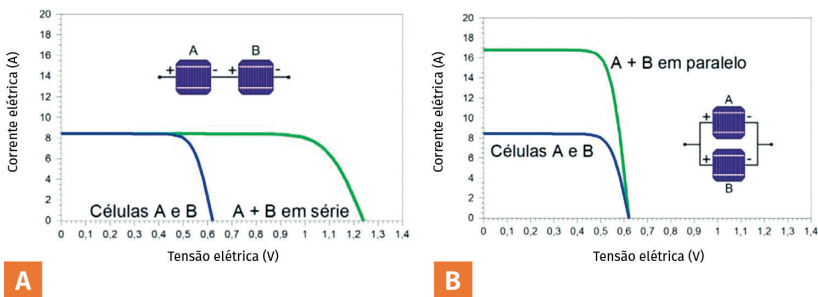


Figura 6. Curvas características de um painel solar em conexão (a) em série e (b) em paralelo.
Fonte: Pinho e Galdino (2014, p. 122).

Nos módulos fotovoltaicos, as células são associadas em série e em paralelo, para se apresentarem tensões e correntes adequadas ao funcionamento do inversor em que se pretende conectar as *strings*.



Fique atento

Os módulos fotovoltaicos também são conectados em série (formando *strings*) e em paralelo para se conectar aos inversores de frequência. Essa configuração é chamada de *array*. Em módulos residenciais pequenos, normalmente, as *strings* são conectadas diretamente nos inversores, podendo esses ter entrada para mais de uma *string*. Porém, em sistemas maiores, é necessário o uso de *junction boxes* para conectar e proteger as *strings* ligadas em paralelo.

Os módulos fotovoltaicos têm suas características elétricas variantes principalmente com a irradiação solar e a temperatura. As curvas características dos módulos fotovoltaicos podem ser observadas na Figura 7.

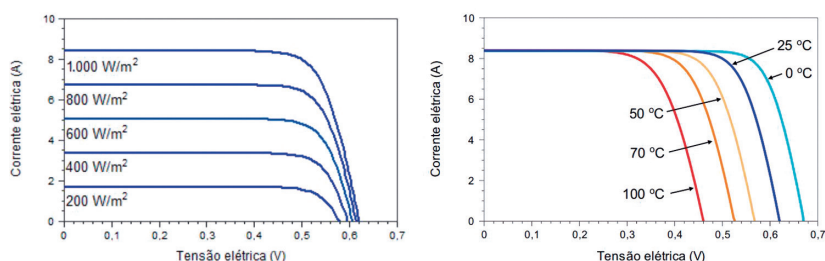


Figura 7. Curvas características I-V de um painel solar para diferentes níveis de insolação e temperatura.

Fonte: Pinho e Galdino (2014, p. 126; p. 127).

Pode-se notar que a corrente elétrica cai significativamente e proporcionalmente à irradiação solar; por sua vez, a tensão máxima é afetada pela temperatura. A curva de potência por tensão de um módulo pode ser observada na Figura 8.

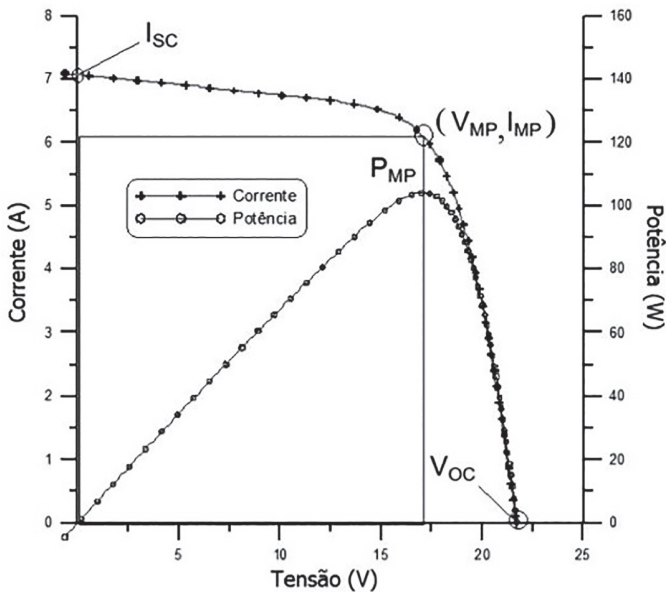


Figura 8. Curva característica I-V e curva de potência P-V para módulo com potência nominal de 1.000 Wp.

Fonte: Pinho e Galdino (2014, p. 147).

O ponto da curva onde se encontram o V_{MP} e o I_{MP} é chamado de ponto de máxima potência, justamente por ser a configuração em que a potência de saída do módulo tem seu pico, para uma determinada condição de temperatura e insolação. O ponto I_{SC} é chamado de ponto de corrente de curto circuito da célula, e o ponto V_{OC} é chamado de ponto de tensão de circuito aberto da célula. O ponto P_{MP} é o **ponto de máxima potência**.



Fique atento

A grande maioria dos inversores vem com mecanismo de eletrônica de potência capaz de manter o sistema fotovoltaico no ponto de maior potência. Esse mecanismo é chamado de MPPT (*maximum power point tracking*).

Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos

Embora a geração de energia fotovoltaica possa ser considerada intermitente, por depender das condições meteorológicas do local de insta-

lação, ao longo do tempo, a energia gerada é mais ou menos previsível, podendo-se ter uma boa estimativa do custo-benefício do sistema a ser instalado. Para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico, pode ser adotada uma série de estratégias; porém, a mais comum para sistemas residenciais é baseada na energia que se deseja abater da fatura de energia da concessionária. Lembre-se de que a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aplica o custo de disponibilidade, que é o mínimo pago na fatura de energia, independentemente do consumo. Esse valor é de 30 kWh para sistemas monofásicos (ou bifásicos a dois condutores), 50 kWh para bifásicos a três condutores, e 100 kWh para sistemas trifásicos (BRASIL, 2010).

Painéis solares são classificados em Wp (watt-pico), que é a medida associada à máxima potência que o painel é capaz de gerar nas condições-padrão de ensaio (STC, do inglês *standard test conditions*) (PINHO; GALDINO, 2014). Porém, a energia efetiva que um módulo é capaz de gerar ao longo do tempo é função, além da potência-pico, de uma série de fatores. Entre eles, pode-se citar: a irradiação solar do local onde esse módulo foi instalado, a inclinação dos módulos em relação ao solo, a direção que as placas apontam, as condições de manutenção e limpeza do sistema, a temperatura a que as placas estão submetidas, além da *performance ratio*, que traduz a eficiência geral do sistema, como perdas elétricas etc.

Contudo, para um dimensionamento adequado do sistema, deve-se ter em mente a quantidade de energia que se deseja obter e as condições gerais de instalação dos módulos. Com isso, é possível prever o número mínimo de placas que seja capaz de entregar a quantidade de energia desejada.



Saiba mais

Para auxiliar no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, pode ser utilizada uma série de ferramentas. Um simulador da produção de energia de sistemas de geração fotovoltaico bastante utilizado é o PVSyst. Porém, pode-se ter uma boa estimativa prévia com ferramentas mais simples, como o Global Solar Atlas. No entanto, deve-se ter em mente que essa ferramenta considera que o sistema foi otimamente instalado, com a inclinação e a direção adequadas e com uma *performance ratio* média de 80%.

Geração fotovoltaica no Brasil

No Brasil, a geração solar fotovoltaica é dividida em três principais grupos:

- a microgeração distribuída, que se caracteriza por ter uma potência menor ou igual a 75 kW;
- a minigeração distribuída, que trata de centrais geradoras maiores que 75 kW, porém menores que ou iguais a 5 MW; e
- as centrais geradoras superiores a 5 MW, não sendo mais consideradas como de geração distribuída, e sim centralizada, de acordo com as normativas da ANEEL.

Os sistemas de microgeração e minigeração têm aumentado consideravelmente nos últimos anos, porém, a geração solar ainda é uma fonte pouco expressiva no Brasil, se comparada à hidráulica, à térmica ou mesmo à eólica, que já é superior à nuclear, como pode ser visto na Figura 9, que traz dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

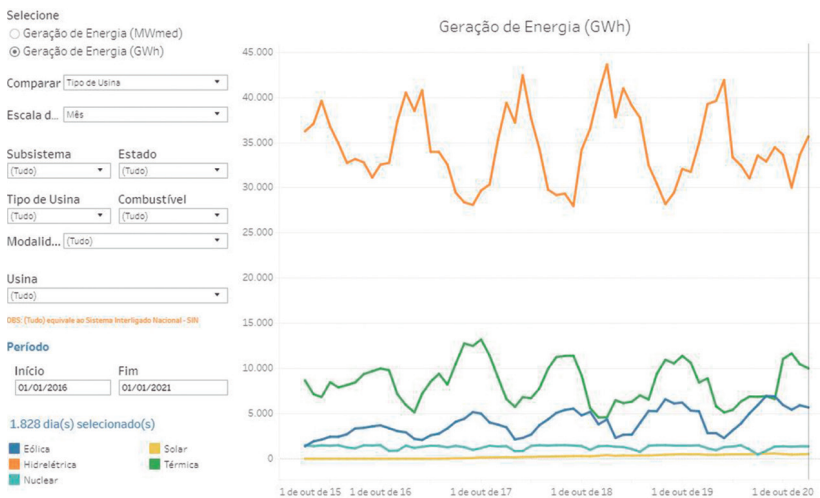


Figura 9. Curva comparativa de geração de energia no Brasil.

Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico ([2021], documento *on-line*).

No ano de 2020, a geração solar foi correspondente a 1% de toda a energia gerada no Brasil. Porém, a tendência é que esse valor suba nos próximos anos, principalmente nas regiões Nordeste, onde se destaca o estado da Bahia, e Sudeste, onde a liderança de geração é no estado de Minas Gerais, como mostra a tendência da curva da Figura 10.

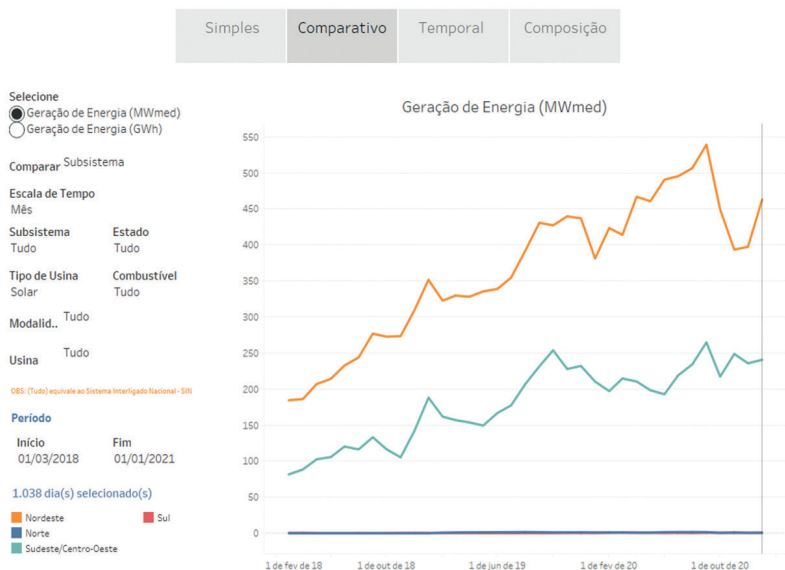


Figura 10. Curva comparativa de geração de energia solar por subsistema.

Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico ([2021], documento *on-line*).

O ONS é responsável por operar 35 usinas solares, sendo as maiores usinas solares do Brasil as seguintes: a Usina Solar São Gonçalo (608 MW), a Usina Solar Pirapora (321 MW), a Usina Solar Nova Olinda (292 MW) e o Parque Solar Ituverava (254 MW).

Usina Solar São Gonçalo

É a maior usina de energia solar da América do Sul, localizada na cidade de São Gonçalo do Gurguéia, no Piauí. Esse parque foi construído com mais de 2,2 milhões de painéis solares e construído pela Enel Green Power, que em 2021 anunciou a expansão de mais 256 MW, o que elevará a sua capacidade para 864 MW. Essa instalação ocupa uma área de 12.000.000 m².

Complexo Solar Pirapora

Esse complexo é composto de 11 usinas, com capacidade instalada de 321 MW, e iniciou suas operações em setembro de 2017. Esse complexo pertence 50% à empresa Omega e 50% à EDF EM do Brasil, subsidiária da EDF Energies Nouvelles. Veja uma imagem do complexo na Figura 11.



Figura 11. Complexo Solar Pirapora.

Fonte: Souza (2017, documento *on-line*)

O Parque Solar Nova Olinda (292 MW), também no Piauí, pertencente à CGN Energy International Holdings, e o Parque Solar Ituverava (254 MW), localizado na Bahia, de propriedade da Enel Green Power, são outras grandes usinas solares dentro do território brasileiro. Isso demonstra que a energia solar pode ser interessante tanto para o pequeno consumidor residencial quanto para os grandes empreendedores no mercado de energia mundial.

Referências

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa ANEEL n. 414 de 9 de setembro de 2010. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, ano 147, n. 177, seção 1, p. 115-136, 15 set. 2010. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=15/09/2010&jornal=1&pagina=1&totalArquivos=184>. Acesso em: 19 abr. 2021.

BULLOCK, C. E.; GRAMBS, P. H. *Solar electricity: making the sun work for you*. Gaithersburg: Monegon, 1981.

DELINGHA. *Bright Source Energy*, [20--]. Disponível em: <http://www.brightsourceenergy.com/delingha-solar-project#YHWK1B9KiCg>. Acesso em: 19 abr. 2021.

ENERGIA solar fotovoltaica. *Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito*, 2008. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321. Acesso em: 19 abr. 2021.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Geração de energia. ONS, [2021]. Disponível em: http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx. Acesso em: 19 abr. 2021.

PEREIRA, E. B. et al. *Atlas brasileiro de energia solar*. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Espectro-da-radiacao-solar-incluindo-um-detalhamento-da-faixa-visivel-humana_fig2_319305620. Acesso em: 19 abr. 2021.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (org.) *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 19 abr. 2021.

ROONPRASANG, N.; NAMPRAKAI, P.; PRATINTHONG, N. A solar water heater system self circulated by a steam power. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND ENVIRONMENT, 2007, Phuket, Thailand. *Anais [...]*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 94-98. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/268006053_A_SOLAR_WATER_HEATER_SYSTEM_SELF_CIRCULATED_BY_A_STEAM_POWER/download. Acesso em: 19 abr. 2021.

SOUZA, C. Conheça a maior usina de energia solar da América Latina, em Pirapora. *G1 Economia*, 2017. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/negocios/noticia/usina-de-energia-solar-de-pirapora-inicia-producao-conheca.ghtml>. Acesso em: 19 abr. 2021.

SOUZA, J. P. Silício mono ou policristalino: quem vence o duelo? *Canal Solar*, 2019. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/silicio-mono-ou-policristalino-quem-vence-o-duelo/>. Acesso em: 19 abr. 2021.

VILLALVA, M. G. *Energia solar: conceito e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2015.

ZILLES, R. et al. *Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica*. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

Leitura recomendada

TIWARI, G. N.; TIWARI, A.; SHYAM. *Handbook of solar energy*. Singapore: Springer, 2016.



Fique atento

Os links para sites da web fornecidos neste capítulo foram todos testados, e seu funcionamento foi comprovado no momento da publicação do material. No entanto, a rede é extremamente dinâmica; suas páginas estão constantemente mudando de local e conteúdo. Assim, os editores declaram não ter qualquer responsabilidade sobre qualidade, precisão ou integralidade das informações referidas em tais links.

Conteúdo:



SOLUÇÕES
EDUCACIONAIS
INTEGRADAS