

O POTENCIAL DA GERAÇÃO SOLAR FV NO BRASIL: HISTÓRICO E FUTURO

Edmilson Jose Dias

¹Edmilson Dias – Engenharia & Consultoria, edmilsonjdias@hotmail.com

RESUMO

Este trabalho apresenta o potencial da Geração Distribuída (GD) solar fotovoltaica no Brasil, e perspectivas futuras principalmente após a publicação da Resolução Normativa (REN) 482/2012, reformulada pela REN 687/2015, regulamentando assim o sistema de compensação de energia elétrica (SCEE) através da micro e minigeração distribuída (MMGD) de fontes renováveis de energia elétrica, como a solar fotovoltaica. Posteriormente, com a vigência da Lei 14.300/22 em 09/01/2023, bem como o advento de novas tecnologias fotovoltaicas disponíveis no mercado mundial, novos modelos de negócio tornaram-se atrativos para investidores e acessantes do sistema elétrico nacional. A utilização desta fonte de energia renovável para o consumo residencial, comercial e industrial, além de viável economicamente para os consumidores, traz consigo redução de impactos sócios ambientais e ampliação da matriz energética do País. O crescimento desta fonte renovável no Brasil está atualmente promissor, seguindo uma tendência mundial com expectativas futuras de potência instalada total no Brasil em torno de 75,6 GWp até 2025, representando aproximadamente 98,3 TWh de produção total, correspondendo a 12,3 % do total do País.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Fontes Renováveis, Geração Distribuída, Inovações Tecnológicas, Lei 14.300/22.

1. INTRODUÇÃO

A partir de 2012, com a publicação da REN 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), a energia solar fotovoltaica passou a figurar como uma importante opção de produção de energia elétrica de forma limpa e sustentável. Especialmente, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica possuem total aproveitamento da energia gerada por não necessitar de equipamentos armazenadores de energia, tais como as baterias. Estes sistemas utilizam a concessionária como fornecedora em horários sem produção, e como armazenadora em horários de alta produtividade. O crescimento no Brasil se deu de forma tímida nos primeiros anos após 2012, seguido de um aumento expressivo a partir de 2017, superando as expectativas da Aneel com relação a geração distribuída.

O Brasil é considerado um dos mercados promissores de energia solar da América Latina, beneficiado pelas condições climáticas favoráveis para geração solar fotovoltaica, com alto nível de irradiação solar em grande parte do seu território, especialmente nas suas regiões nordeste e centro-oeste, bem como triângulo mineiro/norte de MG. Com

potencial para se tornar um dos principais produtores mundiais de energia solar, a potência instalada total da geração fotovoltaica no País soma atualmente quase 33 GW de potência instalada (acréscimo de 4,7 GW somente em 2023), beneficiando mais de 2,61 milhões de UC's (Unidades Consumidoras) em todos os Estados. Dentre todas as classes de consumo, a residencial é a que responde pela quantidade maior de sistemas solares instalados em micro e minigeração distribuída, ou seja, pouco mais de 1,57 milhão de conexões, correspondendo a quase 80% do total: 5.530 do total de 5.570 cidades brasileiras já possuem ao menos um sistema de geração solar, instalado em residências ou pequenos terrenos. Com todo este crescimento e boas expectativas do mercado nacional de energia, tornou-se indispensável a revisão da REN 482/2012 proposta pela Aneel, através de consultas públicas envolvendo diversos segmentos da sociedade e culminando na criação de um marco legal para a MMGD (micro e mini geração distribuída) por meio da Lei 14.300/22.

Os modelos de negócios têm-se tornados altamente atrativos destacando-se das demais a geração local, onde o consumidor gera e injeta no sistema elétrico a sua própria energia produzida (em períodos sem consumo), faturando pela diferença entre consumo e injeção.

A busca por alternativas energéticas menos poluentes e renováveis tem aumentado consideravelmente a capacidade instalada de usinas solares no mundo inteiro. Diversos fatores depõem favoravelmente à energia solar fotovoltaica, como: o alto rendimento energético por hectare (cinco vezes maior que a eólica e dez vezes maior que a cana-de-açúcar) e boa eficiência termodinâmica. Além disso, fotovoltaicos são silenciosos, modulares, utilizam combustível gratuito e possuem baixo custo operacional e de manutenção. No entanto, alguns desafios atuais no Brasil necessitam ser superados para que a energia solar fotovoltaica atinja o seu potencial proposto como fonte consolidada, tais como: o custo da geração, armazenamento de energia, inversões de fluxo de potência, complexidade operacional, controle complexo de tensões, dificuldades de coordenação da proteção, violações de fator de potência, exaurimento de subestações e incapacidade de escoamento de energia em média tensão. O custo por watt pode ser reduzido aumentando-se a eficiência dos principais ativos envolvidos na geração (módulos e inversores) e reduzindo o custo de fabricação em toda a cadeia produtiva, o que pode ser impulsionado com a entrada de novas tecnologias do mercado mundial. Com relação às anomalias atuais operacionais impeditivas de novas conexões no sistema elétrico, são necessários esforços conjuntos de todos os setores envolvidos no processo, que serão explanados ao longo deste trabalho.

2. Desenvolvimento

2.1 Geração Distribuída: Histórico da regulamentação atual

2.1.1 Histórico da regulamentação da GD no Brasil

Desde a publicação da REN 687/2015 que alterou sensivelmente a REN 482/2012, havia a previsão por parte da Aneel de fazer uma avaliação dos impactos desta resolução e promover a revisão até 31 de dezembro de 2019, levando a uma possível atualização. Entre 2018 e 2019, por meio de consultas públicas envolvendo diferentes segmentos da sociedade, ocorreram diversos debates sobre esta proposta apresentada pela Aneel. Como resultado do processo de debate na época, identificou-se a necessidade de assegurar ao mercado de MMGD o seu estabelecimento via lei federal, ou seja, pela criação de um marco legal para a MMGD no Brasil, por meio do PL (Projeto de Lei) 5.829/2019. Em paralelo a esta elaboração, a Aneel seguiu com seus trabalhos internos para a revisão definitiva da RN 482/2012 e publicou, no final de março de 2021, uma minuta da nova resolução normativa.

O PL 5.829/2019 foi aprovado pelo senado federal no dia 16/12/2021, e no dia 05 de janeiro de 2022 o presidente da república sancionou o projeto de lei nº 5.829/2019 que instituiu o marco legal da microgeração e minigeração distribuída (MMGD) por meio da Lei 14.300/2022. A lei foi criada no dia 06 de janeiro de 2022 e publicada no diário oficial dia 07 de janeiro de 2022. Em fevereiro de 2023 a Aneel regulou esta Lei, o que culminou na REN 1.059/2023 atualizando a REN 1.000/2021.

2.1.2 Impactos importantes na GD com a vigência da Lei 14.300/22

As mudanças mais impactantes verificadas no setor após a data de vigência da Lei 14.300/2022 (07/01/2023), foram basicamente nos itens de potência instalada das usinas e valores de compensação da energia elétrica. As tabelas 01 e 02 ilustram estas principais mudanças:

Tabela 1. Mudanças na potência instalada

Item	REN 482/2012	Lei 14.300/2022 (Marco Legal)
Potência Instalada	Microgeração Distribuída: menor ou igual a 75 kW	Microgeração Distribuída: menor ou igual a 75 kW
	Minigeração Distribuída: maior que 75 kW e menor ou igual a 5 MW	Minigeração Distribuída: maior que 75 kW e menor ou igual a 5MW para as fontes despacháveis e menor ou igual a 3MW para as fontes não despacháveis .

Tabela 2. Comparação antes e depois da lei 14.300/22: valores de compensação

Item	REN 482/2012	Lei 14.300/2022 (Marco Legal)
Valor da compensação	Compensação considerando todas as componentes da tarifa de energia.	Compensação considerando todas as componentes da tarifa de energia, menos a TUSD Fio B.

2.2 Geração Distribuída Fotovoltaica

O foco deste trabalho é a geração distribuída fotovoltaica de energia elétrica (fonte não despachável e potência instalada até 3MW), constituída de micro (potência instalada menor ou igual a 75 kW) e mini geração (potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW) com diversos arranjos de módulos fotovoltaicos, inversores e demais componentes, dimensionados e projetados de acordo com a potência demandada.

Destacam-se no Brasil os sistemas de geração fotovoltaico conectado e híbrido:

- conectado: sistema conectado a uma rede de distribuição absorvendo e injetando energia elétrica (CA), conforme dinâmicas instantâneas da carga e da geração do sistema fotovoltaico.

- híbrido: sistema misto com a possibilidade de armazenamento de energia em uma bateria, para fornecimento de energia elétrica (CA) em caso de indisponibilidade de fornecimento através da rede de distribuição.

2.3 O Potencial da Geração Distribuída Fotovoltaica no Brasil

2.3.1 Irradiação e potencial fotovoltaico no Brasil

O conhecimento do recurso solar é uma importante ferramenta para a difusão do uso desta fonte com fins energéticos, bem como para o correto dimensionamento do gerador e estimativa da quantidade de energia que o mesmo pode gerar anualmente. Uma considerada média anual de irradiação solar direta global é preponderante para o potencial fotovoltaico de uma determinada região. Baseado nestes quesitos, conclui-se que a geração fotovoltaica de energia elétrica tem um grande potencial no Brasil, destacando-se grande parte do norte/triângulo de MG e grande parte do nordeste do País. No local menos ensolarado, é possível gerar mais energia solar do que no local mais ensolarado da Alemanha, por exemplo.

Observa-se que a geração solar fotovoltaica tem um caráter bem pulverizado em todo o território brasileiro. Sua adoção é tanto mais viável quanto mais onerosa for a tarifa

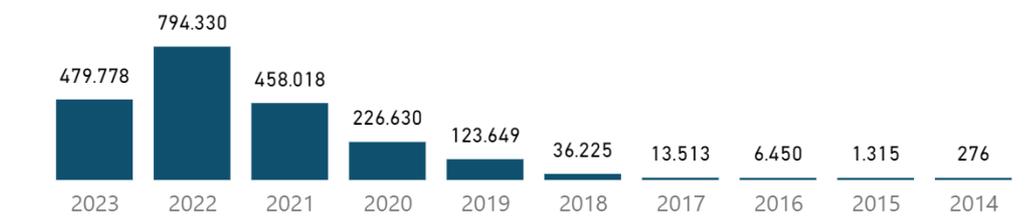
de energia da distribuidora local e quanto maior o índice de irradiação anual da região. A demanda crescente de energia elétrica vem alterando o perfil de consumo e demanda no Brasil. Ano a ano, de acordo com curvas de carga registradas pelo ONS (Operador Nacional do Sistema), os picos máximos de energia elétrica são registrados nos meses de verão no período entre 12 e 15 horas, coincidindo excelentemente com os índices máximos de irradiação solar para a geração fotovoltaica. Neste contexto, e por sua natureza distribuída, a geração solar fotovoltaica tem um grande potencial de contribuição para a redução dos picos de demanda dos sistemas de transmissão do SIN (Sistema Interligado Nacional).

Nos próximos anos, e com o aumento da penetração da geração solar fotovoltaica por todo o Brasil, a geração de energia elétrica próxima ao ponto de consumo deverá ser reconhecida pelo sistema elétrico como um dos seus principais atributos. Com a acentuada redução de custos experimentada pela tecnologia fotovoltaica nos últimos anos, o cenário vem ficando cada vez mais favorável à sua adoção em escala crescente.

2.3.2 Ranking fotovoltaico atual: potência instalada/número de conexões

Os dados infográficos online da Aneel apontam que o Brasil concluiu o primeiro semestre de 2023 com um acréscimo de 4,7 GW na capacidade instalada de geração fotovoltaica de energia elétrica. Das 160 usinas que entraram em operação no País, 59 são solares fotovoltaicas com 2,2 GW (46,80 %). Atualmente no Brasil, a geração fotovoltaica possui potência total instalada igual a 32,7 GW, sendo 23,8 GW somente GD, e mais de 2 milhões de conexões em 5.539 municípios, representando um crescente aumento ao longo dos anos principalmente a partir de 2019, conforme gráfico 01 a seguir:

Gráfico 01. Quantidade anual de conexões fotovoltaicas no Brasil até 03/10/2023



fonte: Aneel – Relatórios de Geração Distribuída

O ranking atual dos 10 Estados com maior número de conexões no Brasil, destacam-se SP, RS e MG representando 41 % do total do País. Com relação a potência instalada, SP lidera seguido de MG e RS representando 37 % do total do País.

2.4 Atuais modelos de negócios fotovoltaicos no Brasil – RN 482/2012

Desde a publicação da REN 687/2015 que alterou sensivelmente a REN 482/2012, havia uma boa previsão por parte da Aneel de amplas possibilidades de negócios em micro e minigeração distribuída de energia, estabelecendo modelos de geração de energia solar própria e coletiva (consórcio, cooperativa e condomínio), além de manter o sistema de compensação. Consolidou-se, portanto, um mercado no qual um consumidor que gera mais energia do que consome, receba seus créditos de energia (em KW/h) e que podem ser utilizados dentro das modalidades geração local, auto consumo remoto, condomínios e geração compartilhada.

A atratividade no atual mercado de GD se dá pelo fato de que o sistema de compensação permite que os créditos de energia sejam utilizados pelo próprio consumidor para o abatimento das UC's sob sua titularidade (incluindo matriz/filial), mesmo que seja em local diferente daquele onde o crédito foi gerado, bem como permite a reunião de consumidores para o desenvolvimento de um projeto de GD conjunto e compartilhar os benefícios de uma usina em comum, visando otimizar custos de acordo com sua participação percentual no projeto conjunto.

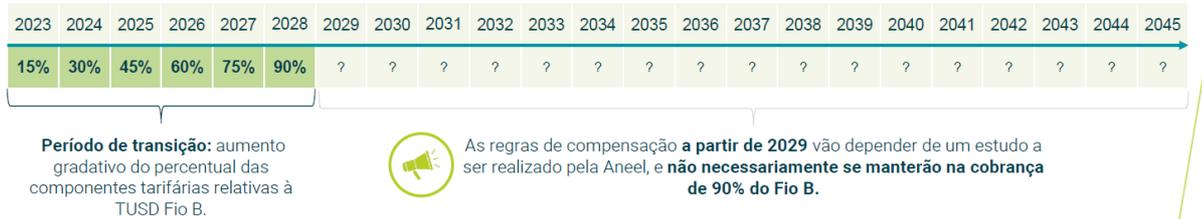
2.4.1 Modelo de negócio em destaque atualmente no Brasil

Atualmente, e após a vigência da lei 14.300/22 (em 07/01/23), a utilização do modelo geração local se destaca fortemente com relação aos demais em todo o mercado fotovoltaico brasileiro com cerca de 75 % do total, devido a utilização otimizada da rede de distribuição da concessionária acessada, pela possível simultaneidade de geração própria/consumo, pagando desta maneira menos parcela da TUSD fio B (quanto maior a simultaneidade, menos uso da rede e pagamento menor da TUSD fio B).

2.4.2 Impactos nos atuais modelos de negócio após a Lei 14.300/22

O acessante que solicitou a conexão (no modelo de compensação considerando todas as componentes da tarifa de energia, menos a TUSD Fio B) no sistema elétrico dentro do território brasileiro após 07/01/2023, teve que se enquadrar em um dos 4 modelos de negócios citados anteriormente, e seguir a regra de transição destacando neste quesito o pagamento parcial e gradativo da componente TUSD Fio B da tarifa, pelo período de 6 anos, chegando até 100 % em 2029, conforme tabela 03 a seguir:

Tabela 3. Linha do tempo de cobrança da TUSD Fio B, após a Lei 14.300/22



fonte: Greener – Análise do Marco Legal da Geração Distribuída - 2023

As regras de compensação a partir de 2029 irão depender de um estudo a ser realizado pela Aneel. Teve um período de transição para conexões entre 07/01/2023 e 07/07/2023, em que foi garantido a cobrança de 90% até 2030. Conclui-se que quanto mais antecipado se der a conexão do acessante ao sistema elétrico, mais atrativo será o investimento tanto com relação a payback quanto a TIR (Taxa Interna de Retorno) final. Para os casos de acessos ao sistema elétrico no modelo de compensação considerando 100% da TUSD Fio B + 40% da TUSD Fio A (para usinas auto consumo remoto ou compartilhada + 25% maior que 500 KW), não teve período de transição.

2.5 Tendências e inovações tecnológicas em destaque no Brasil

Quando se trata de pesquisas e inovações tecnológicas referentes às energias renováveis, as fontes de origem solar fotovoltaica tem-se destacado das demais nos últimos anos. As pesquisas focam o aprimoramento dos componentes com objetivos de tornar, principalmente os módulos e inversores, mais eficientes e com diminuição de custos de produção. Diversos fatores são favoráveis à energia solar fotovoltaica, tais como: alto rendimento energético por hectare (cinco vezes maior que a eólica e dez vezes maior que a cana-de-açúcar) e a alta eficiência termodinâmica. Além disso, fotovoltaicos são silenciosos, modulares, utilizam combustível gratuito e possuem baixo custo operacional e de manutenção (OPEX). A utilização da energia solar para geração de energia elétrica também traz benefícios ambientais e segurança energética, pois os ativos utilizados para esta finalidade além de simples aplicação, não geram ruídos bem como emissões de elementos poluentes durante a operação. Ao longo dos anos, principalmente a partir de 2020 com o desenvolvimento e advento de novas tecnologias e incentivos fiscais, a evolução da fonte solar fotovoltaica vem crescendo no Brasil, sendo atualmente a segunda em potência instalada do total da matriz elétrica nacional, segundo a ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica). Considerando as tecnologias atuais disponíveis no mercado,

concluimos que as mesmas são escaláveis, utilizadas em aplicações de pequeno ou grande porte, com baixa manutenção e ciclo de vida útil de 25 anos.

2.5.1 Novas tecnologias de módulos fotovoltaicos

O investimento em geração fotovoltaica pode ser reduzido aumentando-se a eficiência das células solares individuais e conseqüentemente dos módulos, e/ou reduzindo o custo de fabricação. Assim, novas tecnologias primordialmente necessitam ter simultaneamente alta eficiência e baixo custo. Historicamente, o silício cristalino (C-Si) tem sido usado na maioria das células fotovoltaicas, após um processo de purificação e tratamento químico visando a produção de energia elétrica, com o efeito fotovoltaico. Este material representa 90% do mercado fotovoltaico, pois são estáveis, eficientes (20% a 24%), além de utilizar tecnologia desenvolvida na indústria de microeletrônica. A principal novidade na construção de módulos fotovoltaicos atualmente consiste no aumento gradual das células ao longo dos anos, principalmente após a consolidação da tecnologia Half Cell: a indústria mundial está lançando neste ano células de tamanho de 282 e 210 mm, alterando parâmetros elétricos importantes da geração, como corrente e potência elétrica na entrada dos inversores.

2.5.2 Novas tecnologias de inversores fotovoltaicos

A evolução tecnológica dos inversores no mercado mundial se dá em caráter contínuo, com os fabricantes procurando atender todas as novas necessidades do setor, bem como o aumento da eficiência energética. Com relação a atualização tecnológica constante de todas as categorias de inversores, destacam-se os híbridos on-grid/off-grid com novos diferenciais de integração utilizando banco de baterias com tensão segura, compatível com as tecnologias de lítio e de chumbo-acido. Os atuais novos inversores já possuem tempo de transferência rede-backup menor de 10 ms, não necessitando de quadro de transferência externo para cargas prioritárias: quando ocorre uma falta na rede, atuam de fato como backup enviando e recebendo informações usando “bits” (fluxos de informações) para gerenciar “watts” (fluxos de energia). Todo o elo de geração-transmissão-armazenamento-distribuição-consumo é visível, gerenciável e controlável. utilizando os módulos fotovoltaicos e banco de baterias para alimentar a carga. Outras novas tecnologias como a Smart String ESS, adotam uma arquitetura distribuída e design modular: o gerenciamento inteligente digital otimiza a energia no nível da bateria e controla a energia no rack, resultando mais energia na descarga, segurança e confiabilidade durante todo o ciclo de vida do sistema, otimizando também CAPEX e OPEX. São desafios atuais que impulsionam novas tecnologias nos inversores.

2.6 Impactos positivos da geração solar na economia do Brasil

Segundo projeções de economistas e associações de energia solar, a energia solar fotovoltaica poderá gerar mais de 300 mil novos empregos até o final de 2023 no Brasil. Por esse motivo, os investimentos gerados pelo setor deverão ultrapassar mais de R\$50 bilhões. Este fato se deve principalmente pelos benefícios proporcionados pela fonte a todos os consumidores brasileiros, atingindo todas as classes de consumo e provocando um efeito multiplicador positivo na sociedade. Estudos indicam que o setor solar foi responsável pela criação de 1 milhão de empregos no Brasil desde 2012, distribuídos entre todos os elos da cadeia produtiva, com investimentos acumulados que devem alcançar a marca de R\$ 170,9 bilhões, com mais de R\$ 53,8 bilhões em arrecadação de tributos públicos até o final de 2023, segundo estudo da ABSOLAR. Além da questão do quesito sustentabilidade, a energia solar fotovoltaica pode ser um vetor de incentivo relevante para o desenvolvimento social, econômico e ambiental atualmente no Brasil, com geração de empregos/rendas, atração de investimentos, diversificação da matriz elétrica e benefícios sistêmicos.

2.7 Impactos e desafios do sistema elétrico brasileiro com a expansão da geração fotovoltaica no Brasil

O crescimento, principalmente da minigeração distribuída fotovoltaica no Brasil, tem impactado de alguma maneira o sistema elétrico das concessionárias de energia, especialmente sob alguns aspectos operacionais e de proteção, dos quais se destacam:

- inversão do fluxo de potência no posto de transformação da distribuidora ou no disjuntor do alimentador, ocasionando violação dos limites de carregamento dos ativos da rede, bem como ultrapassagem dos limites operativos dos módulos de tensão nos barramentos, causando instabilidade no sistema elétrico;
- complexidade operacional: a operação do sistema elétrico em circuitos com geração distribuída é desafiadora para a concessionária de energia devido ao efeito do fluxo reverso, principalmente observados em manobras de transferências;
- controle complexo de tensão do sistema: influência do fator de potência em determinados pontos da conexão;
- dificuldade de coordenação da proteção: mais uma fonte de energia no sistema contribuindo para o curto-circuito, dificulta a coordenação dos respectivos ativos;
- possível violação do fator de potência em alguns pontos de conexão;
- exaurimento de subestações transformadoras e da capacidade de escoamento de energia em redes de média tensão;
- elevação das perdas na rede devido à distância da conexão as SE's de energia.

3. Conclusão

Ao longo deste trabalho, explanamos tendências de expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil com base em vários fatores, destacando-se dentre outros: excelente média anual de irradiação solar, regulamentação das regras de conexão, redução dos custos de fabricação dos componentes, conscientização ambiental com sustentabilidade e aprimoramento tecnológico com aumentos de eficiência. Porém, o País ainda necessita avançar com relação a políticas públicas efetivas em investimentos de pesquisa e inovação para criação de novas tecnologias, o que poderia diminuir o atraso brasileiro em relação a outros países, e, por conseguinte ainda maior geração de empregos no setor. O planejamento técnico-financeiro eficiente das concessionárias de energia (conhecendo previamente o potencial solar em suas áreas de concessões) visando a realização das obras estruturantes locais, permitirá ainda mais crescimento da matriz energética solar no Brasil e consequente crescimento econômico. O desafio atual, considerando todos os fatores citados e visando um futuro ainda mais promissor para a geração fotovoltaica no Brasil, envolve uma participação positiva, integrada e efetiva de todos os setores e players envolvidos no processo, tais como: Governo Federal (Ministério de Minas e Energia), Aneel, ONS, ABRADEE, ABSOLAR, movimentos solares, integradores e toda cadeia de valor produtiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GREENER, **Análise do Marco Legal da Geração Distribuída – Lei 14.300/2022**. Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudos/landing-page-analise-do-marco-legal-da-geracao-distribuida-2023/>. Acesso em: 14/09/2023.

GREENER, **Estudo Estratégico: Geração Distribuída 2023**. Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-geracao-distribuida-2022-mercado-fotovoltaico-2-semester/>. Acesso em: 14/09/2023.

Aneel, **Resolução Normativa Nº 482, de 17 de Abril DE 2012**. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf/>. Acesso em: 14/09/2023.

FADIGAS, A. F. A (2018), **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica**. São Paulo: USP.