



# CAPÍTULO I

## ENERGIA SOLAR - O POTENCIAL BRASILEIRO





O Plano Decenal de Energia (PDE) antecipa uma demanda de energia crescente no país, a qual deverá ser suprida por quaisquer que sejam as fontes de energia – nuclear, termoelétrica, hidrelétrica ou outras renováveis. Embora a maior parte da energia elétrica gerada no Brasil venha da hidroeletricidade, a matriz de geração relativamente limpa vem se transformando com a entrada de centrais termoelétricas em resposta ao crescimento da demanda e às crises hídricas que ameaçam a segurança energética do país. O PDE 2026 prevê a participação de fontes renováveis com 48% da oferta interna de energia consoante com as metas da contribuição brasileira às Nações Unidas para o acordo de Paris sobre mudanças climáticas (NDC). Entre as várias alternativas de fontes renováveis destaca-se a energia solar, cujo enorme potencial teórico nacional é ainda pouco explorado. No entanto, o aproveitamento desta fonte de energia, assim como da energia eólica, está sujeito à influência das condições meteorológicas que podem apresentar grande variabilidade ao longo de curtos intervalos de tempo. Apesar disso, as barreiras relacionadas à intermitência da geração solar estão sendo superadas através da combinação de pesquisa de inovação, da escala de mercado e da disseminação de informação.

## Introdução

A crescente demanda de energia e de alimentos vem acarretando profundas mudanças no meio ambiente e na qualidade de vida, colocando as sociedades diante de novos desafios em um planeta com recursos naturais finitos. O crescimento da demanda energética, somado à perspectiva de redução dos suprimentos de fontes de energias convencionais, tem sido motivo de preocupação com implicações na economia global.

O Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC AR5, 2014) adverte que as mudanças climáticas globais são uma realidade e decorrem, sobretudo, do aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) pelo consumo de combustíveis fósseis. Sem dúvida, um esforço mundial já vem sendo desenvolvido para o uso cada vez mais intenso das energias de fontes renováveis que causem menor impacto socioambiental nos próximos anos, como uma das formas de mitigar os efeitos do aquecimento global. Além da redução de emissões dos gases de efeito estufa, esses esforços promovem o desenvolvimento sustentável e em equilíbrio com o meio ambiente. É também sabido que a segurança energética de uma nação depende da pluralidade de suas fontes de energia que compõe sua matriz energética.

A grande maioria das fontes de energia alternativa e renovável apresenta um potencial teórico que supera a demanda mundial conforme apresentado na Tabela 1. Entre essas fontes, a energia solar é a que mais se destaca. Embora todas elas se mostrem capazes de suprir as necessidades energéticas da humanidade sem comprometer o conceito de sustentabilidade. O grande desafio é o de aproveitar tais capacidades de uma maneira economicamente competitiva.

A matriz brasileira de energia elétrica apresenta-se relativamente limpa quando comparada aos países com alto nível de desenvolvimento econômico e social. Nossa geração de eletricidade está baseada principalmente no aproveitamento dos recursos hídricos. Contudo, esse cenário está sendo alterado, não somente em razão da crescente demanda de energia, mas também em resposta às crises hídricas mais frequentes nas últimas décadas. O PDE 2026 antecipa um consumo de energia elétrica crescente a uma taxa média de 3,7% a.a., acrescentando uma demanda adicional de cerca de 225 TWh até 2026. A vulnerabilidade das hidrelétricas frente às condições climáticas leva a situações de racionamento e conflitos relacionados ao uso do recurso hídrico e constitui hoje uma constante preocupação. O uso de recursos hídricos destinados à geração de eletricidade concorre com usos destinados à agricultura, ao abastecimento urbano, à manutenção da biocapacidade e outros fins.

Aliada à necessidade de diversificar as fontes de energia e de reduzir a dependência do recurso hídrico, existem ainda os compromissos da implementação do Acordo de Paris sobre Mudança

do Clima e da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, com base nas chamadas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC, na sigla em inglês), correspondentes à diminuição de emissão de gases de efeito estufa. Desde o início deste século, o Brasil tem utilizado de operação de centrais termelétricas alimentadas com combustíveis fósseis para garantir a segurança energética requerida para a manutenção do desenvolvimento socioeconômico do país.

O país incluiu em sua NDC a meta de reduzir em 37% as emissões de gases de efeito estufa em 2025 e de 43% em 2030, ambas com relação a 2005, e alcançar 45% de participação de fontes renováveis de energia (incluindo hidrelétrica) em sua matriz primária de energia. Alguns objetivos da Agenda 2030 têm um claro componente ambiental de garantir acesso a energia limpa, promover consumo e produção responsáveis e de tornar as cidades inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis. Nesse sentido, a partir de dezembro de 2015, o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD, 2015) busca dar impulso a esse esforço, porém, ainda existem barreiras tecnológicas e de informação que devem ser rompidas com maior esforço em pesquisas e na formação de recursos humanos.

### Energia solar no território brasileiro

O Brasil possui elevados índices de incidência de radiação solar. Apesar de ser um país com dimensões continentais e apresentar diferentes características climáticas em seu território, o país apresenta condições ideais para o aproveitamento da geração de eletricidade empregando a tecnologia solar em todo seu território.

A média anual de irradiação solar global no Brasil oferece uma boa uniformidade, com níveis nacionais de irradiação solar global incidente entre 1300 kWh/m<sup>2</sup> e 2200 kWh/m<sup>2</sup>. Esses valores são superiores ao de países europeus que, de longa data, fazem uso da tecnologia solar fotovoltaica para geração de energia elétrica em grande escala, como a Alemanha. A região com menor média anual de irradiação solar no Brasil apresenta valor equivalente ao nível máximo no território alemão. (Pereira, et al., 2017). Ademais, como se pode observar na Figura 1, a variabilidade da irradiação solar na maioria das regiões brasileiras é muito inferior à dos demais países, o que representa um garantia para participação da geração solar ao longo de todo o ano.

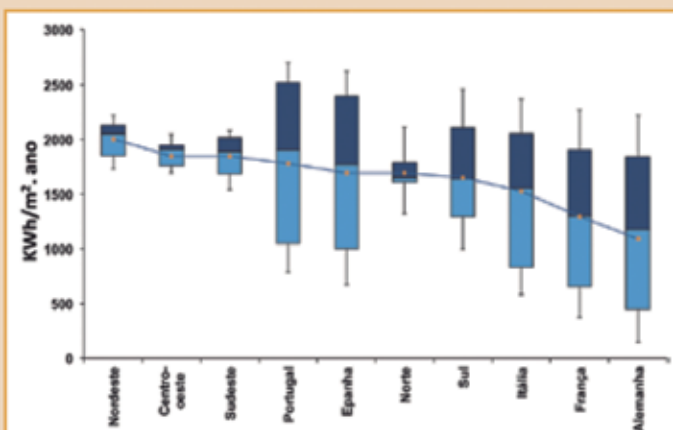


Figura 1 – Comparativo dos níveis anuais de irradiação média anual.

As características climáticas locais ou regionais definem a melhor tecnologia de geração solar a ser implementada. Como exemplo, a tecnologia de geração heliotérmica é fortemente dependente de altos níveis de radiação direta normal incidente (DNI) que, por sua vez, sofre impacto de elevadas cargas de aerossóis, além da nebulosidade. Por isso, o desenvolvimento de metodologias destinadas ao mapeamento preciso das diversas componentes da irradiação solar incidente tem merecido especial destaque na atualidade em todos os países onde o aproveitamento da energia solar é realidade.

Nesse contexto, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) lançou em agosto do ano passado a segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira et al. 2017). A nova edição do Atlas traz vários avanços nas parametrizações do modelo de transferência radiativa Brasil-SR e, também, análises sobre a variabilidade espacial e temporal do recurso solar. Para isso, foram utilizados dados de satélites obtidos durante 17 anos, e os resultados foram validados com base em mais de 400 estações de superfície espalhadas pelo território brasileiro.



Figura 2 – Potencial solar das regiões brasileiras.

A Figura 2 apresenta o valor médio anual do total diário de irradiação solar apontado no Atlas para as cinco regiões brasileiras. A região Nordeste apresenta o maior potencial solar, com valor médio do total diário da irradiação global horizontal de 5,49 kWh/m<sup>2</sup> e da componente direta normal de 5,05 kWh/m<sup>2</sup>. As regiões Sudeste e Centro-oeste apresentam totais diários para a irradiação global horizontal em torno de 5,07 kWh/m<sup>2</sup>. A irradiação global média no plano inclinado na região Sudeste apresentou total diário de 5,26 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto na região

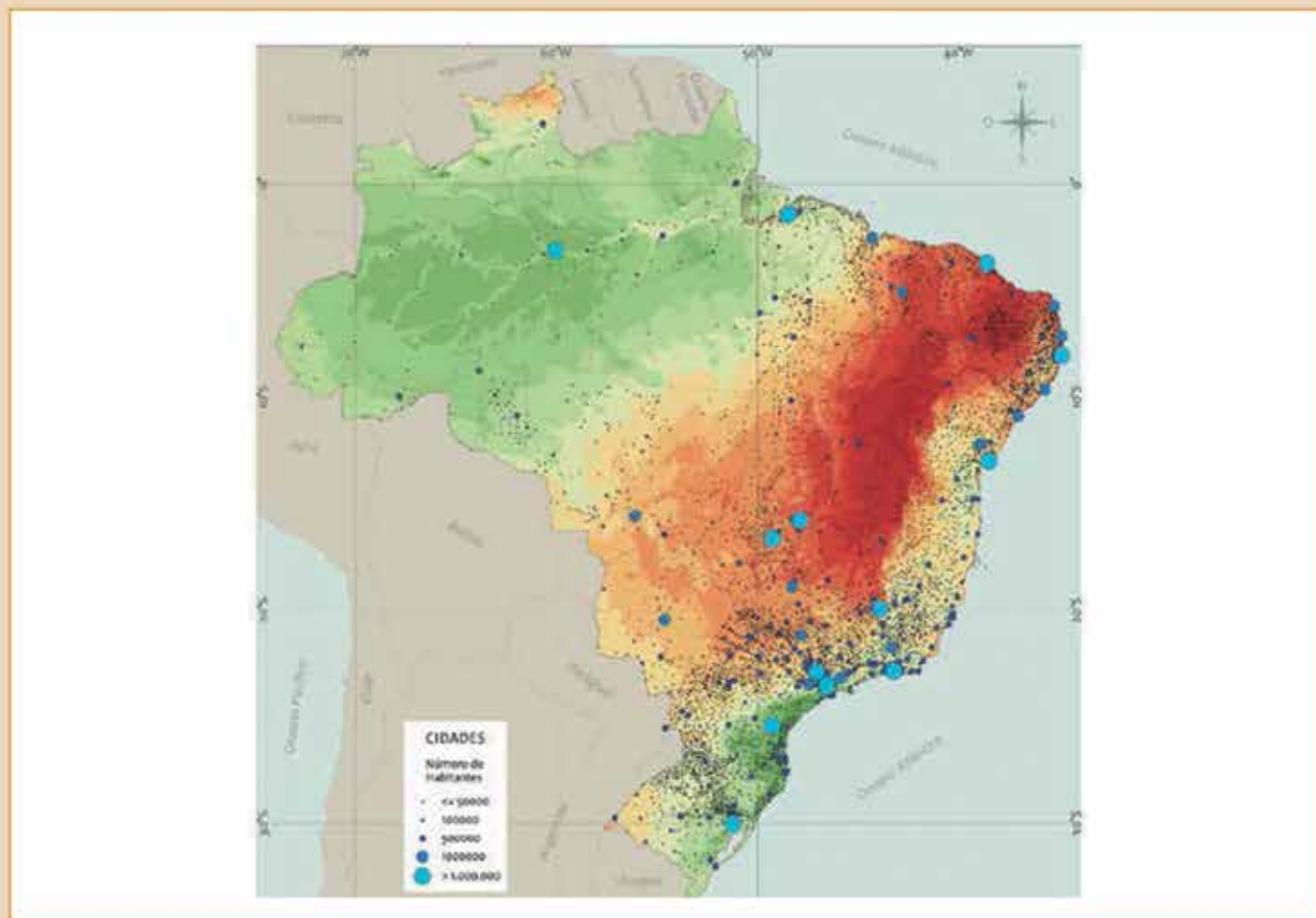


Figura 3 – Potencial de geração fotovoltaica no território brasileiro estimado com o uso do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR alimentado com 17 anos de dados de satélite.

Centro-Oeste apresentou  $5,20 \text{ kWh/m}^2$ . Os valores relativamente mais baixos da irradiação solar na região Norte se devem às características climáticas desta região, onde a nebulosidade frequente reduz a irradiação solar que incide na superfície. Com isso, a irradiação global média nos planos horizontal e inclinado apresenta valores próximos aos obtidos para a região Sul e a irradiação direta normal inferior à de todas as outras regiões do país.

A Figura 3 ilustra o rendimento energético fotovoltaico anual máximo (medido em kWh de energia elétrica gerada por ano para cada kWp de potência fotovoltaica instalada) em todo o território nacional, tanto para usinas de grande porte centralizadas e instaladas em solo, como para a geração fotovoltaica distribuída integrada em telhados e coberturas de edificações. A concentração populacional é também mostrada através dos círculos azuis espalhados pelo território brasileiro.

Nos meses de verão, principalmente de dezembro a março, o potencial de geração é máximo nos estados do Sul e Sudeste do Brasil e coincide com os máximos de demanda registrados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) para essas regiões. Neste contexto e por sua natureza espacialmente distribuída, a geração solar fotovoltaica pode contribuir para a redução dos picos de demanda dos sistemas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Já o potencial de produção de energia térmica ( $\text{kWh/m}^2$ ) para aquecimento solar empregando um coletor de referência de placas

planas com configuração típica (coletor de placa plana com cobertura de vidro com consumo de água diário de 300 litros a  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  e relação reservatório/coletor de  $75 \text{ litros.m}^2$ ) para o Brasil pode ser visto na Figura 4. As regiões de maior aproveitamento térmico estão localizadas principalmente no sudeste e sul do país. A viabilidade do aquecimento solar no Brasil está fortemente associada ao custo da energia normalmente usada para o aquecimento de água. Considerando apenas o setor residencial, os gastos com aquecimento de água chegam a 24% do total de energia elétrica consumida, já que a potência dos chuveiros elétricos típicos pode exceder os  $6000 \text{ W}$ .

### Levantamento dos recursos solares

A partir da nossa rotina diária, é bastante intuitivo compreender que a quantidade disponível de energia solar apresenta variações não só ao longo do tempo como também do espaço. Para que o aproveitamento dessa fonte de energia limpa seja viável técnica e economicamente, é necessário compreender os aspectos que influenciam sua disponibilidade e variabilidade tanto sob o ponto de vista temporal (ao longo do dia, e dos meses) quanto do ponto de vista geométrico-espacial (em relação à posição geográfica). Dessa forma, o levantamento do potencial de recursos de energia solar em uma região envolve basicamente três componentes: a distribuição espacial do

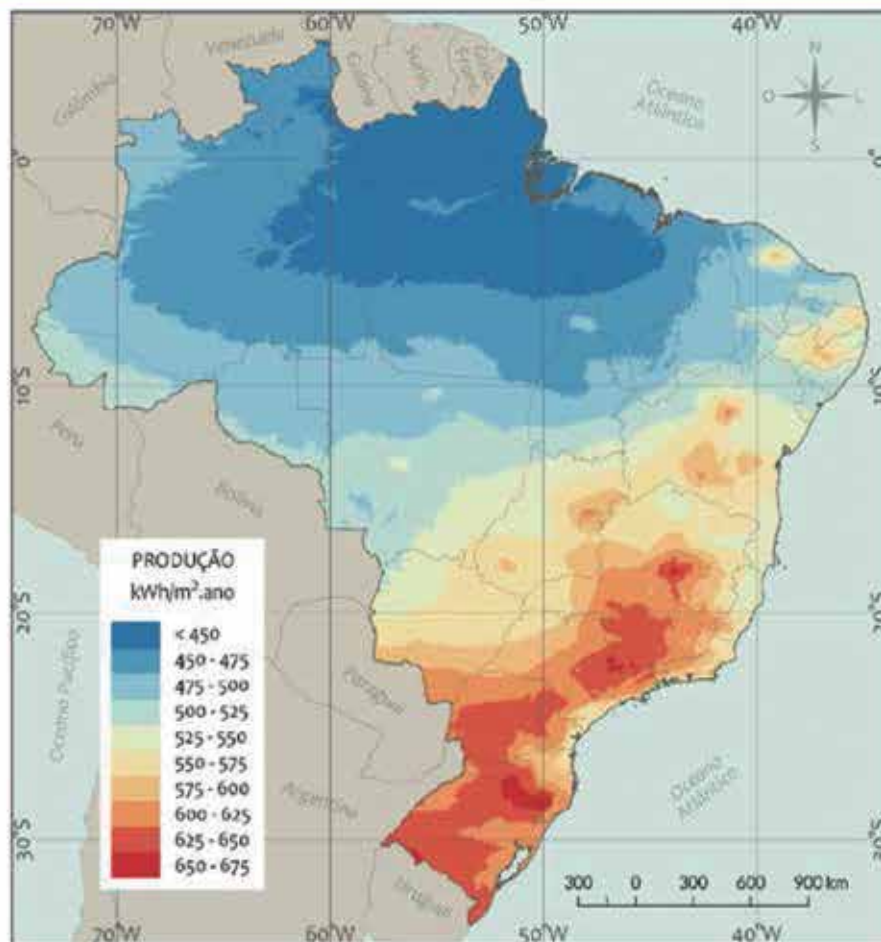


Figura 4 – Potencial de produção de energia térmica para aquecimento d'água a partir da incidência de energia solar considerando uma configuração típica de um sistema térmico residencial.

recurso solar, sua variabilidade temporal e as incertezas associadas às duas primeiras componentes. Informações sobre as três componentes são essenciais para elaboração de cenários de aproveitamento do recurso solar e para estudos preliminares de viabilidade de aproveitamento do recurso solar.

Conhecer a geometria de insolação e o sombreamento por obstáculos e relevo a que as tecnologias de conversão da energia solar estarão sujeitas em um dado local é importante, mas não suficiente para explicar a variabilidade da energia solar que incide na superfície. Há mais um fator que é bastante relevante na disponibilidade do recurso energético solar: a atenuação da radiação solar causada pela atmosfera. A atmosfera funciona como um "cobertor" protetor que evita a incidência de radiações prejudiciais à vida na superfície terrestre e garante a manutenção de temperaturas confortáveis para a existência de vida no planeta. O principal fator atmosférico de atenuação da radiação solar é a nebulosidade que pode atenuar totalmente a irradiação solar direta (DNI) que chega à superfície restando apenas a irradiação difusa (aquela fração da energia solar que é espalhada em todas as direções pela atmosfera). A composição dos gases atmosféricos e presença de poluentes lançados para a atmosfera também reduz a intensidade da energia que atinge a superfície.

Fica evidente, desta forma, que a energia solar incidente na

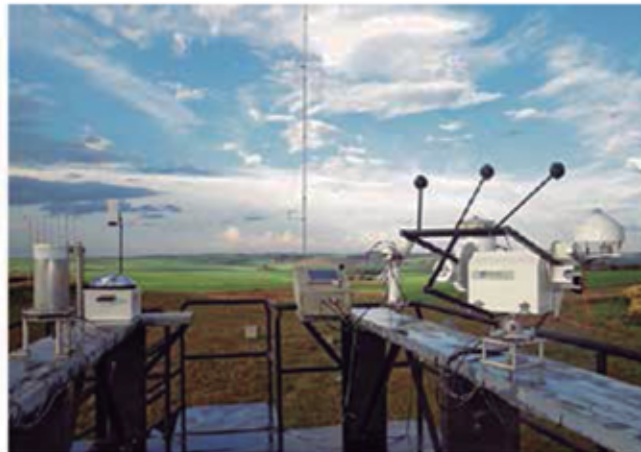
superfície, apesar de bastante elevada, está sujeita a diversos fatores que provocam uma variabilidade muito grande na disponibilidade desse recurso. Surge então a pergunta "Como podemos ter certeza de que o aproveitamento do recurso solar pode contribuir para atender à demanda de energia de forma segura?". Para avaliar a viabilidade técnica do aproveitamento da energia solar é primordial caracterizar a energia solar (quantidade e variabilidade) que incide no local de interesse.

Embora dados coletados em superfície, com instrumentação adequada e observando os cuidados devidos de operação e manutenção, sejam a fonte mais segura para conhecimento do recurso solar de um local específico, o custo de instalação e operação e manutenção de estações de coleta de dados com a precisão requerida para o setor energético pode ser um fator limitante, principalmente quando se trata de grandes extensões territoriais.

A Figura 5 ilustra dois exemplos de estações solarimétricas. A primeira (A) apresentando a configuração típica exigida pela RE 065/2013 (2017) da EPE para certificação de dados solarimétricos e de produção anual de energia. A segunda (B), empregada para estudos e desenvolvimento de modelos e métodos numéricos de levantamento solarimétricos como o empregado na elaboração do Atlas Brasileiro de Energia Solar. O uso de métodos numéricos torna-se uma alternativa para o levantamento de grandes áreas.



A



B

**Figura 5 – Estações de coleta de dados radiométricos para avaliação do potencial solar em local específico. É importante ter em mente que a qualidade dos dados adquiridos depende não apenas da qualidade dos equipamentos utilizados, mas, também da correta instalação dos sensores e de sua operação e manutenção.**

### Barreiras à penetração das energias não despacháveis

Apesar do enorme potencial, o crescimento da participação de fontes intermitentes de energia, como a solar, esbarra em barreiras de custo e de conhecimento que estão sendo superadas através da combinação do avanço tecnológico, da escala de mercado e da disseminação da informação.

A redução do custo de um sistema de geração fotovoltaica está sendo alcançada com a evolução tecnológica e a economia de escala, que reduz o custo dos painéis fotovoltaicos e aumenta a competitividade. A consequência principal é equiparação de tarifas (paridade) com a geração a partir dos combustíveis fósseis utilizados em plantas térmicas.

A barreira do conhecimento inibe a penetração de tecnologias de geração não despachável de energia elétrica. Energias do tipo não despachável têm impacto nas decisões tomadas em todas as escalas de tempo e em todas as regiões geográficas, uma vez que uma fonte energia variável e apenas parcialmente previsível irá implicar no balanço entre a oferta e a consumo de outras fontes de energia despacháveis (hidroelétricas com reservatórios de acumulação e termoeletricas). Essa barreira pode ser vencida com pesquisa científica não só sobre o potencial disponível de energia, mas também da variabilidade espacial e temporal da fonte. O desenvolvimento de metodologias e tecnologias para ampliar e aprimorar a capacidade de previsão de geração por essas fontes em diferentes horizontes de tempo está recebendo atenção e esforço de diversos grupos de pesquisa ao redor do mundo (Lima et al. 2015). Além disso, o impacto da intermitência da energia solar no sistema elétrico pode ser minimizado com amplo

conhecimento sobre a complementaridade desta com outras fontes de energia, inclusive aquelas consideradas despacháveis, como a hidráulica e a geração em termoeletricas.

Outro aspecto relevante a ser considerado reside no fato de que as fontes renováveis de energia, como a solar e a eólica, sofrem impacto direto de alterações do clima e, considerando que projetos de geração que envolvem tais tecnologias têm vida útil típica de 20 anos, a viabilidade de um projeto deve levar em conta informações sobre os cenários de variabilidade climática de longo prazo a fim de assegurar o retorno financeiro esperado para o investimento.

### Agradecimentos

Este trabalho é uma contribuição do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (INCT-MC) financiado pela FAPESP 2014/50848-9, CNPq 465501/2014-1, e CAPES/FAPS Nº 16/2014. Os autores também agradecem o CNPQ pelo suporte financeiro por meio dos auxílios de Produtividade em Pesquisa.

### Referências

- EPE-BEN. (2017). *Balanço Energético Nacional Ano Base 2014*. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: [https://ben.epe.gov.br/downloads/S%3%adntese%20do%20Relat%3%b3rio%20Final\\_2017\\_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S%3%adntese%20do%20Relat%3%b3rio%20Final_2017_Web.pdf)
- Fouquet, R. (2011). *Energy Transitions: History, Requirements, Prospects*, Vaclav Smil. Praeger, Santa Barbara, CA (2010), Hardcover: ISBN 978-0-313-38177-5. 178 pages.
- Environmental Innovation and Societal Transitions*. 1. 198–199.



10.1016/j.eist.2011.10.007.

GT-GDSF. (2008). *Relatório do Grupo de Trabalho em Sistemas Fotovoltaicos*. Brasília: Ministério de Minas e Energia.

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*.

*Contribution of Working Group I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.). Geneva, Switzerland: IPCC.

Lima, F. J., Martins, F. R., Pereira, E. B., Lorenz, E., & Heinemann, D. (2016). *Forecast for surface solar irradiance at the Brazilian Northeastern region using NWP model and artificial neural networks*. *Renewable Energy*, 87(807), pp. 807-818.

Martins, F. R., Rüther, R., Pereira, E. B., & Abreu, S. L. (2008). *Solar energy scenarios in Brazil. Part two: Photovoltaics applications*. *Energy Policy*, 36, pp. 2865-2877.

Moriarty, P. e D. Honnery (2012). *What is the global potential for renewable energy?*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 244-252, doi:10.1016/j.rser.2011.07.151

*NDC - Contribuição Nacionalmente Determinada para Consecução do Objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima [arquivo em PDF] disponível em: [http://www.itamaraty.gov.br/images/ed\\_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf](http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf)*

*PDE2026 - Plano Decenal de Energia 2026*. Empresa de Pesquisa Energética, EPE/MME. Fonte: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/0/PDE2026.pdf/474c63d5-a6ae-451c-8155-ce2938fbf896>

Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Gonçalves, A. R.; Costa, R. S.; Lima, F. J. L.; Rüther, R.; Abreu, S. L.; Tiêpolo, G. M.; Souza, J. G.; Pereira, S. V. (2017) - *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. São José dos Campos: INPE, v.1. segunda edição, p.84.

*ProGD (2015), Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica, MME, acessado em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/prt2015538mme.pdf>*

*\*ENIO BUENO PEREIRA é graduado em Física pela Universidade de São Paulo e doutor em Geociências pela W.M.Rice University, nos Estados Unidos. É pesquisador titular sênior do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia.*

*FERNANDO RAMOS MARTINS é bacharel em Física pela Universidade de São Paulo, mestre em Tecnologia Nuclear pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares e doutor em Geofísica Espacial pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Atualmente, é docente adjunto da Universidade Federal de São Paulo campus Baixada Santista.*