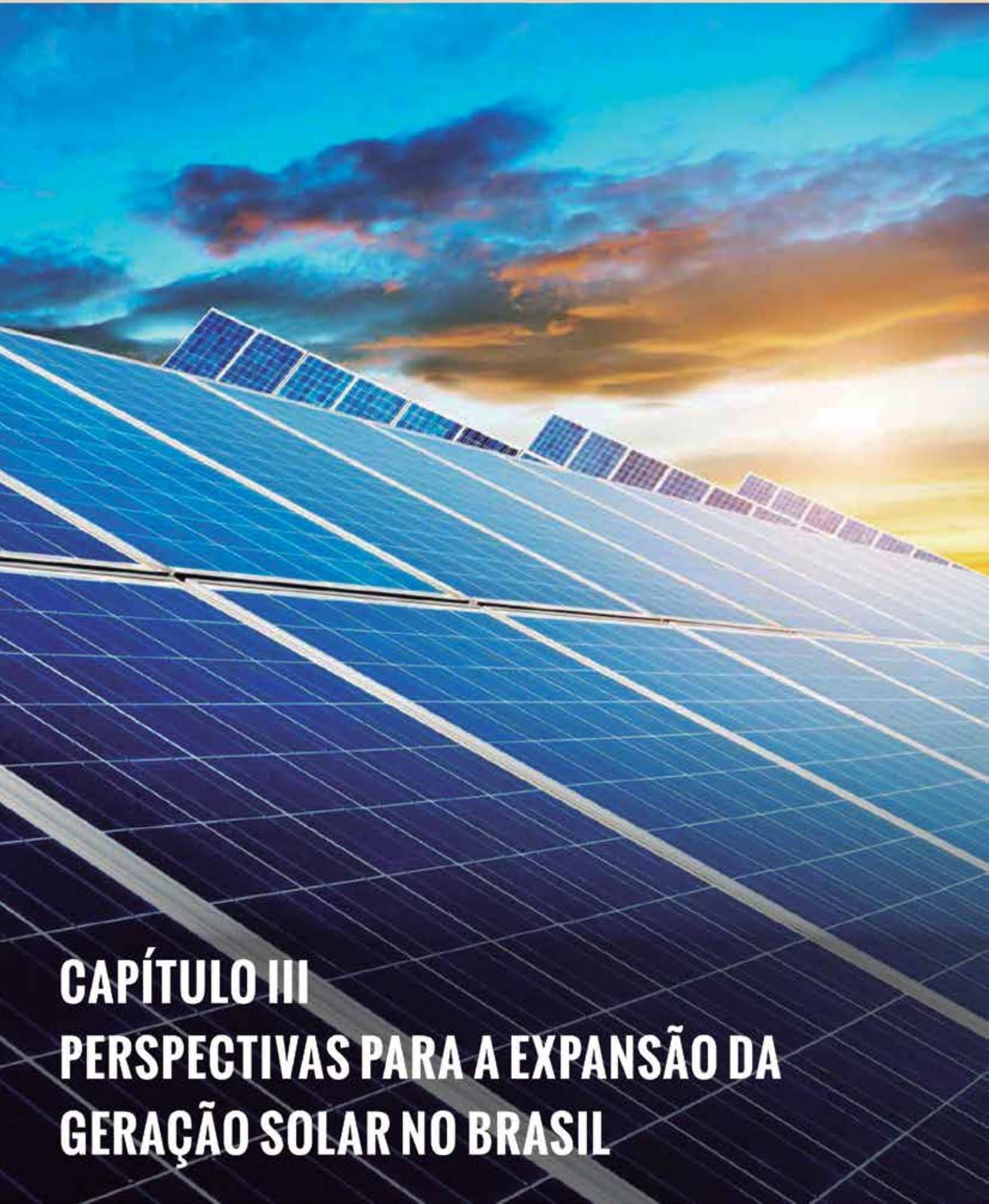
Por André Rodrigues Gonçalves e Rodrigo Santos Costa*



# CAPÍTULO III
# PERSPECTIVAS PARA A EXPANSÃO DA GERAÇÃO SOLAR NO BRASIL

Quando se discutem os impactos do homem sobre o meio ambiente, a expansão da matriz de energia é assunto obrigatório. Estima-se que 69% das emissões antropogênicas de gases de efeito estufa no mundo sejam oriundas da queima de combustíveis fósseis, o que evidencia a importância da questão energética na mitigação do aquecimento global. Aproximadamente 81% de toda a energia gerada no mundo provém de combustíveis fósseis, sendo que 25% desta energia é consumida na forma de eletricidade, levando a uma média de emissões em torno de 515 kg CO2/MWh, de acordo com o último relatório do IPCC de 2014.

Esta questão torna-se ainda mais importante se considerarmos os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) assumidos pela Convenção das Partes das Nações Unidas - COP21 de "prover energia limpa e acessível à população mundial até 2030" (SDG7-ONU, 2015). Isto porque 1,2 bilhão de pessoas ainda não tem acesso à eletricidade e 2,7 bilhões ainda utilizam lenha como combustível de fogão, colocando forte pressão sobre a demanda futura de energia no planeta (IEA, 2016). Para que estes objetivos sejam alcançados, são necessários ganhos importantes de eficiência combinados a uma "descarbonização" da matriz energética mundial.

No Brasil, onde a matriz elétrica é predominantemente renovável – sustentada na maior parte pela fonte hidráulica –, o consumo de energia elétrica per capita nos últimos dez anos vem crescendo acima da evolução do PIB, elevando a intensidade elétrica da economia brasileira em torno de 2% ao ano. Na ausência de melhoria em eficiência, esta demanda crescente foi sustentada em grande parte por uma ampliação das fontes térmicas não renováveis (principalmente gás natural) em um processo de carbonização da matriz elétrica brasileira. Dados mostram que as térmicas chegaram a responder por quase 25% da oferta interna de energia elétrica em 2014, frente a um decréscimo na geração hidráulica de 85% para 65% entre 2012 e 2014 - em parte devido à grave estiagem no período. Tal fato fez com que as emissões de carbono na geração de energia elétrica subissem de 82 para 137 kgCO2/MWh em apenas dois anos, conforme dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2016). Estes números são um alerta para que o planejamento da expansão da geração elétrica no Brasil seja ambientalmente sustentável e compatível com as metas assumidas pelo país junto à comunidade internacional.

## *Potencial de geração renovável de eletricidade no Brasil*

O sistema elétrico brasileiro se apresenta como um sistema hidrotérmico de grande porte com forte predominância de usinas hidrelétricas, sendo interconectado através do Sistema Interligado Nacional (SIN), o que o confere tamanho e características únicas em âmbito mundial. Este sistema apresenta uma capacidade total instalada superior a 152 GW, com destaque para a participação de 65% da geração hidroelétrica e de 27% da térmica na matriz elétrica nacional (Aneel, 2017).

O potencial hidroelétrico brasileiro é estimado em 247 GW, sendo que 43% deste já é explorado e outros 48% estão em fase de inventário (ainda não possuem viabilidade técnica e ambiental comprovada), restando 9% ou 22 GW de projetos hidroelétricos em carteira segundo dados da Eletrobras, (2015), sendo a grande maioria na região amazônica. Soma-se a isso o aumento das hidrelétricas que operam a fio d'agua, o que torna nossa matriz mais vulnerável a períodos de estiagem, que aumentam o risco de apagões assim como o custo da energia devido ao despacho adicional de termelétricas. Esta é uma conjuntura extremamente desfavorável, tendo em vista a incerteza associada aos cenários atuais de mudanças no clima e suas possíveis influências na frequência de eventos extremos de estiagem, devendo ser de alguma forma mitigada. É evidente, assim, o importante papel que a energia solar pode desempenhar através da diversificação das fontes e exploração de possíveis complementariedades com a matriz elétrica atual.

A irradiação solar diária no Brasil apresenta valores médios acima de 5,0 kWh/m².dia,

condições meteorológicas. Muito se discute a respeito dos limites teóricos de inserção de ERV na matriz elétrica, em que os estudos sugerem números em torno de 25% a 35%. Porém, diante de sistemas elétricos cada vez mais diversificados e interconectados (onde há importação e exportação de energia entre países), definir limites torna-se uma tarefa complexa, já que cada sistema possui características próprias. A composição do parque gerador, tempo de resposta das plantas, níveis de complementariedade entre as fontes e perfil da curva de demanda são algumas das características que determinam a penetração máxima, conforme discutido em alguns estudos. Alguns países já experimentam níveis de penetração bastante elevados, como Portugal, Espanha, Irlanda, Dinamarca e Alemanha, chegando acima de 40% por alguns períodos no ano (IRENA, 2017). Dentre as soluções para aumentar a resiliência do sistema para a inserção das ERVs, estão:

***I*** **-** Redução no tempo de resposta das centrais geradoras: centrais com armazenamento de energia que respondem rápido às variações no sistema podem amenizar os eventos de rampa ocasionados pelas ERVs;
***II*** **-** Planejamento espacial da matriz elétrica: ordenar a expansão do sistema elétrico de modo a explorar a complementariedade espacial e temporal entre as plantas de geração por ERV (solar-eólica-hidráulica) tende a suavizar a variabilidade no sistema através de um efeito conhecido como spatial smoothing;
***II*** **-** Hibridização de plantas de geração: as diversas combinações entre as fontes solar-térmica, solar-hidráulica, solar-eólica, hidro-eólica e termo-eólica têm efeito estabilizador na capacidade de geração das plantas, permitindo a autorregulação do despacho de energia. A melhor opção de hibridização dependerá da análise dos recursos energéticos disponíveis em cada local;
***IV*** **-** Armazenamento de energia: novas tecnologias para armazenamento de energia em diversas escalas de tempo tendem a regularizar a oferta, permitindo um aumento da penetração das ERVs. Exemplos são os reservatórios térmicos, reservatórios de gravidade, armazenamento eletroquímico (ex: hidrogênio e baterias) e supercapacitores. Mesmo os veículos elétricos plugados à rede para carga podem agir como elementos de armazenamento distribuído;
***V*** **-** Interconexão entre sistemas elétricos nacionais: acordos de compartilhamento de rede elétrica entre países com cláusulas técnicas e comerciais bem definidas tendem a trazer vantagens para ambos, à medida em que proporcionam um aumento na segurança energética e reduzem custos com armazenamento;
***VI*** **-** Controle de demanda: tecnologias que permitam a taxação da energia em função do horário de consumo tendem a nivelar a curva de demanda, reduzindo o tamanho do parque gerador necessário para sustentar a rede elétrica e as perdas associadas no sistema. O advento das redes elétricas inteligentes ou smartgrids tende a cumprir este papel.

## *Cenários de expansão da geração elétrica no Brasil*

De acordo com dados recentes da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), a matriz elétrica brasileira – do ponto de vista da capacidade instalada – é composta por 61% de usinas hidráulicas, 16% de termelétricas fósseis, 8,7% de biomassa e 6,5% de eólicas, conforme ilustra a Figura 3. Analisando a capacidade a instalar, já contratada ou em construção, nota-se uma predominância da fonte eólica (31%) e um forte crescimento da geração solar (com 12%). No entanto, percebe-se uma parcela crescente de energia fóssil a ser adicionada, o que tende a aumentar a intensidade de carbono da matriz elétrica brasileira (Aneel, 2017).

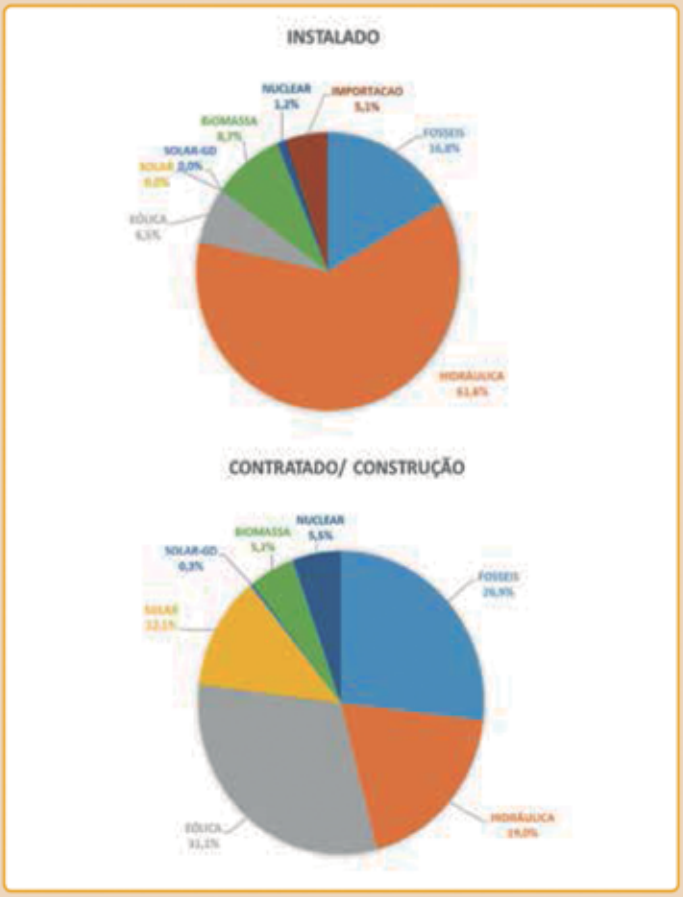



***Figura 3 – Matriz elétrica do Brasil sob ponto de vista de capacidade instalada e em construção. Fonte: Aneel (2017).***

No cenário apresentado pelo Plano Decenal de Expansão de Energia em sua última edição (PDE 2026), a eletricidade será responsável por 20,6% do consumo final de energia, chegando a 741 TWh em 2026 – o que representa um aumento de 43,6% – com isto acontecendo através da expansão de 26,5 GW médios em capacidade de geração. Este plano apresenta uma abordagem mais interessante em relação à versão anterior, uma vez que avaliou diversos cenários obtidos pela alteração de premissas iniciais, quantificando melhor as incertezas.

No âmbito internacional, o Brasil assumiu compromissos para mitigação das emissões de gases de efeito estufa durante a COP21 (21ª Conferência das Partes) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, na sigla em inglês), através de sua Contribuição Nacionalmente Determinada – NDC (MRE, 2015). Neste documento, o Brasil se compromete, dentre outros, a:

***I*** **-** Expandir o uso de fontes renováveis, além da energia hídrica, na matriz total de energia para uma participação de 28% a 33% até 2030;

*II* - Expandir o uso doméstico de fontes de energia não fóssil, aumentando a parcela de energias renováveis (além da energia hídrica) no fornecimento de energia elétrica para, ao menos, 23% até 2030, inclusive pelo aumento da participação de eólica, biomassa e solar;

A meta (*I*) não representa grandes mudanças, uma vez que ao balanço nacional já aponta para uma participação de 29% de outras fontes renováveis (OFR) na matriz nacional de energia em 2015. Já a meta (*II*) parece bastante confortável, uma vez que a participação das OFR na geração elétrica em 2015 foi de 13,5%, restando um aumento de apenas 9,5% em 15 anos. Nos últimos anos, este aumento tem sido de 2% ao ano, evidenciando um maior potencial de crescimento.

De modo a esclarecer os pontos omissos, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) publicou uma Nota Técnica em 2016 com detalhes das metodologias utilizadas para a NDC brasileira (EPE, 2016). Consta, entre outros compromissos, até 2030, o aumento da participação de fontes renováveis na matriz energética para 45%. Esta participação foi de 41% em 2015. Esta meta é desafiadora na medida em que se estima que 54% de toda a expansão de energia até 2030 deverá acontecer com inserção de fontes renováveis. Especificamente quanto à matriz elétrica, este estudo considera que, no período de 2014 a 2030, haverá a expansão de 290 TWh na oferta interna de energia hidráulica, 93 TWh na eólica e 35 TWh solar, sendo 26 TWh em fotovoltaica centralizada e 9 TWh em geração distribuída. Isto significa que, em 2030, 12% da geração elétrica será por conversão da fonte solar e eólica. A Tabela 1 apresenta estes valores, assim como uma estimativa da potência adicional necessária para atingir esta geração e o respectivo crescimento em relação ao parque gerador atual.

A Nota Técnica da Tabela 1, embora contribua na presente discussão, apresenta números bastante defasados em relação ao PDE 2026, uma vez que não considera a recessão dos últimos dois anos em suas análises. No entanto, é elemento útil de comparação para identificar a trajetória recente do planejamento energético no Brasil.

A Figura 4 apresenta uma comparação para a expansão da capacidade de geração solar centralizada e distribuída, em que se prevê um aumento de 15 GW até 2026 pelo PDE e 20 GW na capacidade instalada até 2030 pela NDC. Os dados de geração distribuída foram retirados das projeções da Aneel.

***Figura 4 – Projeções da expansão da capacidade de geração solar (centralizada e distribuída) pelo PDE e NDC brasileira. Fonte: EPE (2016, 2017b); Aneel (2017b).***

Analisando as projeções para a expansão da matriz hidráulica, enquanto o PDE estima uma adição modesta de 11 GW até 2026, a NDC estima em 58 GW em novas hidrelétricas até 2030. Sendo o PDE o planejamento mais recente, isto indica que houve uma mudança considerável nas perspectivas de expansão do setor hidroelétrico brasileiro nos últimos dois anos.

Ressalta-se, entretanto, a previsão de até 18 GW adicionais em 2026 para suprir a demanda de ponta. Embora a tecnologia a ser adotada ainda seja objeto de discussão no governo, assume-se no PDE que esta capacidade seja, a priori, atendida por termelétricas a gás natural. A real necessidade desta potência extra é incerta, uma vez que o próprio PDE observa a deficiência dos modelos utilizados em representar a geração solar e eólica em escala horária.

Os dados apresentados mostram que o Brasil está em uma posição confortável no que se refere aos desafios de redução de emissões oriundas do consumo de combustíveis fósseis para a geração de eletricidade. Dessa forma, as metas assumidas pelo governo federal podem ser consideradas modestas se comparadas ao potencial renovável disponível. Os cenários mais otimistas apresentados pelo PDE sugerem uma penetração das ERVs de 26% na matriz elétrica, enquanto diversos estudos apontam a viabilidade técnica para uma penetração

***Tabela 1 - Previsão de expansão da geração por fonte conforme NDC COP21 para o horizonte 2030***

| *Fonte* | *2014 (TWh)* | *2030 (TWh)* | *Participação em 2030 (%)* | *Incremento (TWh)* | *Potência adicional (GWp)[1]* | *Crescimento (%)[2]* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Hidráulica | 407 | 697 | 61% | 290 | 66,0 | 64% |
| Eólica | 12 | 105 | 9% | 93 | 26,5 | 108% |
| Solar-Cent. | 0 | 26 | 2% | 26 | 14,8 | 493% |
| Solar-Dist. | 0 | 9 | 1% | 9 | 5,1 | 6321% |
| Biomassa | 41 | 134 | 12% | 93 | 4,2 | 28% |
| Outras | 164 | 180 | 15% | 16 | - | |
| Total | 624 | 1151 | | 527 | - | |

Fonte: EPE, (2016)
[1] Admitindo-se os seguintes fatores de capacidade: Solar: 0,20; Eólica: 0,45; Hidráulica: 0,50; Biomassa: 0,85.
[2] Em relação a capacidade instalada e contratada na matriz até 2016 conforme a Aneel;

superior a 30% (Schimidt, 2016).

Perspectivas para uma eletrificação de 100% da matriz energética integrando diversas fontes renováveis têm sido estudadas em diversos países, mostrando ser este um campo onde há margem para inovação. Outras incertezas tecnológicas que afetam a expansão da matriz elétrica se referem ao advento dos veículos elétricos e dos smartgrids, já que em 2015 o número de veículos elétricos no mundo chegou a marca de 1,3 milhão e deve alcançar 30 milhões em 2025. O plano brasileiro considera uma inserção de 4,5% de veículos elétricos até 2030, o que teria pouco efeito sobre a demanda neste horizonte.

Por fim, considerando especificamente a expansão da geração solar, fica claro que a disponibilidade de recursos e o custo de geração não são restrições para o seu crescimento no Brasil. Restam incertezas tecnológicas quanto aos limites para inserção das ERVs no sistema elétrico, embora evidências apontem que este limite é muito superior à meta assumida no planejamento atual.

## 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.

## REFERÊNCIAS

*Amarante, O. A. C., Brower, M., & Zack, J. (2001). Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia.*

*ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. (2017a). BIG - Banco de Informações de Geração. Recuperado 1 de novembro de 2017, de http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm*

*ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. (2017b). Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEE. Brasília.*

*Burgi, A. S. (2013). AVALIAÇÃO DO POTENCIAL TÉCNICO DE GERAÇÃO ELÉTRICA TERMOSSOLAR NO BRASIL A PARTIR DE MODELAGEM EM SIG E SIMULAÇÃO DE PLANTAS VIRTUAIS Adriano. Dissertação M. Sc. PPE. Recuperado de http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/salvi.pdf*

*CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (2017). Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: Simulações 2013 (1 ed.). Rio de Janeiro: CEPEL.*

*CGEE, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. (2016). Desertificação, degradação da terra e secas no Brasil. Brasilia.*

*Delucchi, M. A., & Jacobson, M. Z. (2011). Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: Reliability, system and transmission costs, and policies. Energy Policy, 39(3), 1170–1190. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.11.045*

*Denholm, P., & Hand, M. (2011). Grid flexibility and storage required to achieve very high penetration of variable renewable electricity. Energy Policy, 39(3), 1817–1830. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.01.019*

*ELETROBRAS. (2015). Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro - SIPOT. Rio de Janeiro.*

*EPE, Empresa de Pesquisa Energética. (2012). Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. Rio de Janeiro.*

*EPE, Empresa de Pesquisa Energética. (2016). O compromisso do Brasil no combate às mudanças climáticas: Produção e Uso de Energia - Nota Técnica. Rio de Janeiro.*

*EPE, Empresa de Pesquisa Energética. (2017a). Balanço Energético Nacional 2017 - Ano base 2016. Rio de Janeiro.*

*EPE, Empresa de Pesquisa Energética. (2017b). Plano Decenal de Expansão de Energia 2026. Rio de Janeiro.*

*IEA, International Energy Agency (2016a). Energy Technology Perspectives 2016: Towards Sustainable Urban Energy Systems.*

*IRENA, International Renewable Energy Agency. (2017). Rethinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation. Abu Dhabi.*

*Malagueta, D., Szklo, A., Soria, R., Dutra, R., Schaeffer, R., & Moreira Cesar Borba, B. S. (2014). Potential and impacts of Concentrated Solar Power (CSP) integration in the Brazilian electric power system. Renewable Energy, 68, 223–235. https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.050*

*MRE, Ministério das Relações Exteriores Contribuição Nacionalmente Determinada - NDC, Convenção das Partes das Nações Unidas - COP21, (2015). Brasil.*

*Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Abreu, S. L., Ruther, R., ... Souza, J. G. (2017). Atlas Brasileiro de Energia Solar. (INPE, Org.) (2a edição). São José dos Campos: INPE.*

*Schmidt, J., Cancella, R., & Pereira, A. O. (2016b). The role of wind power and solar PV in reducing risks in the Brazilian hydrothermal power system. Energy, 115, 1748–1757. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.059*

*Tolmasquim, M. T. (2016). Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica (1 ed.). Rio de Janeiro: EPE/MME.*

*United Nations. (2016). The Sustainable Development Goals Report. ONU, United Nations. https://doi.org/10.18356/3405d09f-en*

*WECOUNCIL, World Energy Council (2016). World Energy Perspectives. Variable renewables integration in electricity systems: How to get it right.*

**André Rodrigues Gonçalves é graduado em Engenharia Aeronáutica pela Universidade de São Paulo (USP) e mestre em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Atualmente, é tecnologista (pesquisador) do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia, no Centro de Ciência do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - LABREN/CCST/INPE.*

*Rodrigo Santos Costa é bacharel em Meteorologia pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL), mestre em engenharia civil - Ciências Atmosféricas em Engenharia pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE/UFRJ e doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Atualmente, é tecnologista do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia, no Centro de Ciência do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - LABREN/CCST/INPE.*