

CENÁRIOS DE EXPANSÃO DA GERAÇÃO SOLAR E EÓLICA NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

André Rodrigues Gonçalves – andre.goncalves@inpe.br

Rodrigo Santos Costa – rodrigo.costa@inpe.br

Enio Bueno Pereira – enio.pereira@inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Ciência do Sistema Terrestre

Fernando Ramos Martins – fernando.martins@unifesp.br

Universidade Federal de São Paulo, Departamento de Ciências do Mar

Resumo. O Brasil, assim como diversos países no mundo, enfrenta uma forte transição energética impulsionada por questões ambientais como o aquecimento global e a poluição urbana. Neste contexto planejar a expansão do sistema elétrico torna-se uma tarefa árdua, face às incertezas políticas, econômicas e mudanças tecnológicas em curso. Dentre as diversas alternativas possíveis algumas soluções já se mostram consistentes, como a diversificação da matriz elétrica através da inserção de novas fontes renováveis como a energia solar e eólica. Este estudo apresenta uma revisão sobre as projeções de crescimento da participação das fontes solar e eólica na matriz elétrica brasileira. São apresentados dados recentes do setor elétrico e da disponibilidade e custo das fontes de energia, além de uma breve discussão sobre a inserção de fontes intermitentes no sistema elétrico. Diferentes cenários produzidos pelo governo são discutidos com base em uma revisão de literatura sobre o tema. Os resultados mostram que apesar da perspectiva crescimento da energia solar e eólica chegando a 26% da matriz na próxima década, mais estudos são necessários para se averiguar a necessidade e alternativas para balanço de carga em horários de ponta, uma vez que a adoção de até 18 GW em termelétricas podem trazer prejuízos às metas de emissões e impacto no custo da energia para a sociedade.

Palavras-chave: Energia Solar, Energia Eólica, Planejamento Energético.

1. INTRODUÇÃO

Estima-se que 69% das emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEEs) no mundo sejam oriundas da queima de combustíveis fósseis o que evidencia a importância da questão energética na mitigação do aquecimento global (Blanco *et al.*, 2014). Esta questão se torna ainda mais relevante se considerarmos os objetivos do desenvolvimento sustentável (SDGs) assumidos pelas Nações Unidas de prover energia limpa e acessível à população mundial SDG7 (United Nations, 2016). Isto porque 1,2 bilhão de pessoas ainda não tem acesso a eletricidade, e 2,7 bilhões ainda utilizam biomassa sólida como combustível de fogão, conforme dados da Agência Internacional de Energia (IEA), colocando forte pressão sobre a demanda futura no planeta. Para que estes objetivos sejam alcançados são necessários ganhos importantes de eficiência no uso da energia combinado a uma descarbonização da matriz energética mundial. Evidências apontam para uma participação crescente de fontes renováveis na matriz como parte da solução, capitaneada principalmente pela geração solar e eólica (IEA, 2016a)

Tratando especificamente do Brasil, onde a matriz elétrica é predominantemente renovável sustentada na maior parte pela fonte hidráulica, o consumo de energia elétrica per capita vem crescendo acima da evolução do PIB, elevando a intensidade energética da economia brasileira em torno de 2% ao ano. Na ausência de melhoria em eficiência energética, esta demanda crescente tem sido sustentada por uma ampliação das fontes térmicas não-renováveis (principalmente gás natural) em um processo de carbonização da matriz elétrica brasileira. Dados recentes 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 gCO₂/kWh em apenas dois anos (EPE, 2017a)

Neste sentido este trabalho tem como objetivo investigar os diferentes cenários produzidos para a expansão da geração elétrica no Brasil, avaliando a evolução da participação da fonte solar eólica na matriz. A partir de uma análise comparativa entre as diferentes metodologias e premissas pretende-se levantar quais as restrições e potencialidades para o crescimento destas fontes, assim como definir trajetórias otimistas e pessimistas para o futuro.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Cenários de expansão para setor elétrico

Estimar a expansão da energia consiste em adotar premissas socioeconômicas e tecnológicas que permitam conciliar a evolução da demanda e da oferta de energia em uma região. Dadas as incertezas inerentes a estas premissas é conveniente construir alternativas ou cenários para a expansão deste setor, apurando previsões otimistas e pessimistas para as variáveis de modo a quantificar a dispersão entre as diversas trajetórias possíveis. As regras que definem a dinâmica espacial ou temporal entre as diferentes variáveis envolvidas caracterizam um modelo, seja ele estritamente um arcabouço teórico-conceitual ou equações matemáticas que descrevem o meio biofísico associado. Existe uma variedade de modelos que estimam a demanda e oferta de energia em escala nacional ou global com graus de complexidade distintos. Os mais completos são classificados como *Integrated Assessment Models* ou IAMs e contemplam aspectos socioeconômicos, tecnológicos e ambientais no balanço entre oferta e demanda de energia. Os resultados destes modelos são utilizados por exemplo pelo *Intergovernmental Panel for Climate Change* (IPCC) na definição das trajetórias para mitigação das emissões de GEE (Clarke *et al.*, 2014)

2.2 A evolução da matriz elétrica brasileira sob o ponto de vista histórico

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 de 152 GW com destaque para a participação de 65% da geração hidroelétrica e de 27% da térmica na matriz elétrica nacional (ANEEL, 2017a). Desde 2004, o país modernizou sua estrutura de expansão da oferta de energia através dos leilões regulados de contratação de longo prazo, onde concorrem tanto empreendimentos estatais quanto privados. Este mecanismo aliado a programas de incentivo fiscal possibilitou a maior diversificação de fontes de energia no país na última década, com o importante crescimento da geração eólica e de biomassa de cana por exemplo (Rego & Parente, 2013). Convém ressaltar uma diferença, pois enquanto as fontes térmicas e hidroelétricas são consideradas “firmes”, capazes de estocar energia para despachar conforme demanda, fontes como eólicas e solares fotovoltaicas são consideradas fontes intermitentes de energia (*Variable Renewable Energy - VREs*) pois sua disponibilidade varia em função das condições meteorológicas.

A expansão da geração eólica vem ocorrendo através de grandes plantas de geração (parques eólicos) discretizados tipicamente em empreendimentos modulares de 5 a 30 MW espalhados pelas regiões Nordeste e Sul do Brasil. De forma similar, a expansão da geração solar vem ocorrendo pela tecnologia fotovoltaica, tanto através de grandes centrais geradoras fotovoltaicas, de capacidade superior a 1 MW, quanto através da geração distribuída, onde consumidores são habilitados a gerar sua própria energia e conectá-la à rede elétrica. A geração distribuída é responsável hoje por grande parte da expansão da energia solar no mundo e sua aplicação no Brasil foi alavancada a partir da publicação da Resolução Normativa nº 482/2012 (ANEEL, 2012) e atualizada pela nº 697/2015, que permite a compensação entre a energia gerada e consumida pelas residências, indústrias ou comércio. A Fig. 1 ilustra a evolução da contratação de empreendimentos de geração eólica no Brasil nos últimos anos, ilustrando o acentuado crescimento desta fonte na matriz. Mais recentemente, e de forma similar, a energia solar vem experimentando um crescimento vertiginoso, alavancada não só pelos leilões, que contrataram mais de 2GW em dois anos, mas também pelo aumento da geração distribuída que atingiu 20.000 conexões em apenas três anos. Estes dados ressaltam o momento singular de transição energética em que vivemos.

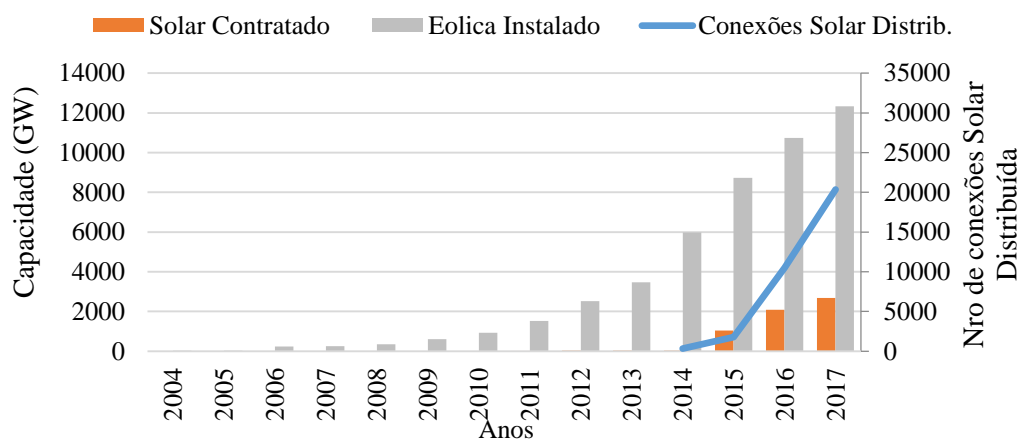


Figura 1 – Evolução da capacidade eólica instalada (cinza), solar contratada (laranja) e usuários de geração solar distribuída conectados (azul). Fonte: Adaptado de ANEEL, (2017a).

2.3 GERAÇÃO RENOVÁVEL DE ELETRICIDADE NO BRASIL: POTENCIAL E LIMITAÇÕES

Geração hidráulica

O potencial hidroelétrico brasileiro é estimado em 247 GW sendo que 43,7% deste potencial já é explorado pelas usinas atuais e dos 56,3% restantes, a maior parte está em fase de inventário, ou seja, não possuem viabilidade técnica e ambiental comprovada até o momento, como mostra a Tab. 1 a seguir. Com isto resta ao Brasil 9% ou 22 GW em projetos de centrais hidrelétricas em carteira, a grande maioria na região amazônica (ELETROBRAS, 2015)

Tabela 1 - Potencial hidroelétrico inventariado para cada bacia em (MW).

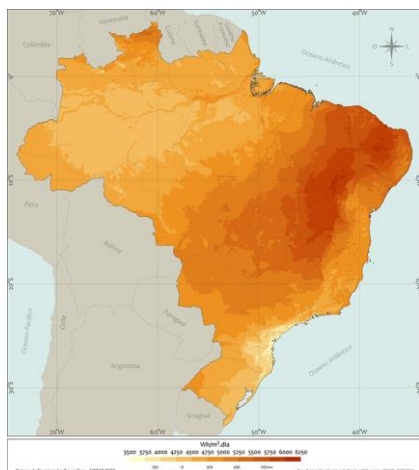
Estágio / Bacias	Atlântico E/SE	Atlântico N/NE	Amazonas	Paraná /Uruguai	São Francisco	Tocantins	Totais
Em operação	9.118	587	10.742	49.725	10.724	13.229	94.125
Percentual Aproveitado	3,7%	0,3%	9,5%	20,4%	4,4%	5,4%	43,7%
Percentual Disponível	6,1%	0,8%	29,5%	9,6%	4,8%	5,5%	56,3%

Fonte: ELETROBRÁS (2015).

Importante ressaltar que mesmo estes projetos tecnicamente viáveis levantados sofrem sérios questionamentos por parte da academia, da sociedade civil e de organizações nacionais e internacionais quanto aos reais impactos ambientais e sociais, principalmente se tratando de grandes empreendimentos na Amazônia. Isto porque as grandes áreas alagadas implicam em remoção de populações ribeirinhas e indígenas, emissões de metano, alteração do ciclo hidrológico e danos ao equilíbrio ecológico local (Almeida Prado *et al.*, 2016; Fearnside, 2015). Como exemplos recentes temos as usinas de Santo Antonio e Jirau no Rio Madeira, Belo Monte no rio Xingu e eventualmente a usina de São Luís, no rio Tapajós. Estes projetos além de enfrentar crescentes críticas de parte da sociedade pelos impactos sociais e ambientais, perpetuam a dependência da matriz elétrica brasileira ao regime de chuvas, impactando a segurança energética do país. Além disso, o aumento do consumo, das hidrelétricas que operam a fio d'água, aliado a falta de investimento no setor, tem feito com que a capacidade de reserva do sistema diminua, somando um déficit de, 20% em 10 anos (FGV, 2014). Isso 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.

Geração solar

A energia solar incidente na superfície caracteriza o potencial teórico, uma vez que o potencial técnico dependerá das tecnologias utilizadas em sua conversão. A irradiação diária no Brasil apresenta valores médios acima de 4,5 kWh/m².dia, superando estas médias nas porções mais continentais das regiões Nordeste e Centro-oeste, conforme demonstra a Fig. 2 e tabela extraída do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira *et al.*, 2017)



Região	Irradiação diária média (kWh/m ² .dia)
Norte	4,64
Nordeste	5,49
Centro-Oeste	5,07
Sudeste	5,06
Sul	4,53
Brasil	5,13

Figura 2 - Mapa de irradiação global média diária para o Brasil e valores médios regionais (kWh/m².dia)

Fonte: PEREIRA *et al.* (2017).

Ao considerar a tecnologia fotovoltaica de geração de eletricidade e premissas modestas de desempenho chega-se à conclusão de que uma área de 2.400 km² (equivalente a área de 0,03% do território nacional) seria suficiente para suprir toda a demanda de energia do Brasil em 2011 (EPE, 2012). Para se ter uma ideia, o país possuía só em áreas degradadas em desertificação avançada mais de 70.000 km² em 2015, área suficiente para suprir quase 30 vezes a demanda de eletricidade do Brasil (CGEE, 2016). Se considerarmos ainda a geração distribuída, estudos indicam que o potencial para geração de energia fotovoltaica pelos telhados apenas do setor residencial equivaleria a 32 GW médios, o que representa 50% do consumo de eletricidade no Brasil em 2015 (EPE, 2017a).

Uma outra tecnologia de aproveitamento solar para eletricidade em fase de maturação tecnológica são as usinas heliotérmicas ou CSPs (*Concentrated Solar Power*). No Brasil existem áreas superiores a 97.700 km² para este aproveitamento, mas o custo elevado devido a pequena escala de produção ainda é considerado um entrave a sua expansão (Malagueta *et al.*, 2014). Estimativas sugerem um potencial de 166 a 346 GW para plantas CSP no Brasil (Burgi, 2013). Outra opção interessante para o Brasil está no desenvolvimento de plantas híbridas, onde há geração complementar entre heliotérmicas e biomassa de cana por exemplo (Soria, Portugal-Pereira, Szklo, Milani, & Schaeffer, 2015). Estes dados evidenciam que o potencial de geração solar disponível não é uma restrição a sua expansão como fonte de energia para o Brasil.

Por se tratar de uma fonte de geração de baixo impacto ambiental, pois não emite GEEs durante sua operação, a energia solar de modo geral não enfrenta oposição a sua adoção, tendo inclusive seu uso incentivado pela sociedade. A principal restrição está na competitividade no preço final da energia, um reflexo do custo dos equipamentos e da disponibilidade de financiamento. Há alguns anos os preços dos painéis fotovoltaicos vem caindo no mundo, tendo reduzido em média 10% ao ano na última década (EPE, 2012; IRENA, 2017). Nos leilões do governo para a fonte solar de 2014 e 2015 realizados no Brasil o preço final da energia ficou entre 215 e 301 R\$/MWh, sendo muito sensível a taxa cambial adotada (EPE, 2015). Isenções fiscais e financiamento estatal atrelado a conteúdo nacional podem ter um efeito econômico positivo sobre o setor.

Geração eólica

O potencial de geração eólica nacional é estimado em 143 GW conforme dados do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro dos quais pouco mais de 18 GW (12,6%) está sendo explorado (AMARANTE, BROWER, & ZACK, 2001; ANEEL, 2017a). Considerando-se o fator de capacidade médio dos parques eólicos no país, isto seria suficiente para atender a 86% da demanda elétrica brasileira (EPE, 2013). Estas são estimativas consideradas conservadoras uma vez que foram feitas com base na tecnologia eólica disponível há 15 anos considerando uma altura de cubo de 50 m e densidade média de instalação de 2 MW/km². Muitos avanços ocorreram no porte médio dos aerogeradores de modo que a simples adoção de uma nova altura de cubo para 100 metros leva um potencial técnico significativamente maior, de 245 GW como já apontado em estudos recentes (CEPEL, 2017; Tolmasquim, 2016). Atualmente, a energia eólica no Brasil é bastante competitiva sendo comercializada nos leilões do governo a preços em torno de US\$ 45/ MWh, acima apenas das grandes centrais hidrelétricas (Silva, De Marchi Neto, & Seifert, 2016). Conforme dados do setor o custo dos equipamentos de energia eólica caiu em 30% desde 2009 comprovando a competitividade alcançada (IRENA, 2017). Estes dados mostram que tanto o potencial disponível quanto o custo não são uma restrição para a expansão da geração eólica nas próximas décadas no Brasil.

Limites de inserção de energia renovável variável (VREs)

Muito se discute a respeito dos limites teóricos de inserção de VREs na matriz elétrica, onde os estudos sugerem números em torno de 25% a 35% (IEA, 2016a). 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 (Sarah Becker *et al.*, 2014; Huber, Dimkova, & Hamacher, 2014). Existem países que 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; WECOUNCIL, 2016). Estudos recentes indicam que o Brasil poderia operar seu sistema com penetração de até 46% de VREs (Schmidt, Cancelli, & Pereira, 2016a). Mais além, alternativas para uma matriz nacional totalmente renovável basead BUDISCHAK *et al.*, (2013). Dentre as soluções para aumentar a resiliência do sistema para a inserção das VRE's 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 VREs;
- 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 VREs (solar-eólica-hidráulica) tende a suavizar a variabilidade no sistema através de um efeito conhecido como *spatial smoothing*;
- iii. **Hibridização de plantas de geração:** as diversas combinações entre as fontes solar-térmica, solar-hidráulica, solar-eólica, hidro-eólica e termo-eólica tem efeito estabilizador na capacidade de geração das plantas permitindo a auto-regulação 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 VREs. Exemplos são os reservatórios térmicos, reservatórios de gravidade, armazenamento eletroquímico (ex: hidrogênio e baterias) e supercapacitores (Rasmussen, Andresen, & Greiner, 2012) . Mesmo os veículos elétricos plugados à rede para carga podem agir como elementos de armazenamento distribuído no sistema (Borba, Szklo, & Schaeffer, 2012; IEA, 2016b);

- 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 na 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* tendem a cumprir este papel;

3. PERSPECTIVAS PARA EXPANSÃO DA GERAÇÃO SOLAR E EÓLICA NO BRASIL

Conforme dados recentes da 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 Fig. 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, 2017a).

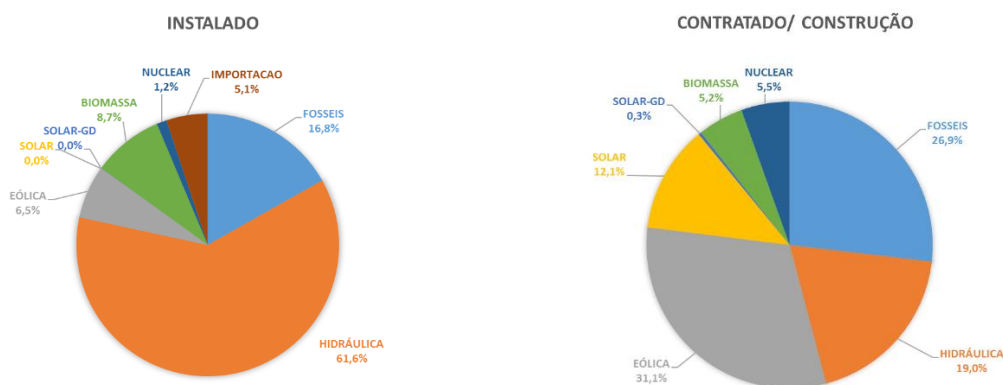


Figura 3 - Matriz Elétrica do Brasil sob ponto de vista de capacidade instalada e em construção.
Fonte: ANEEL (2017a).

O Plano Decenal de Expansão de Energia em sua última edição (PDEE2026) define diretrizes para expansão da capacidade instalada em função das previsões de demanda até 2026. No cenário apresentado, 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%. Isto acontecerá pela expansão de 26,5 GW médios em capacidade de geração (GW médios é a expectativa de potência média da usina, obtido pelo fator de capacidade x potência instalada). Este plano apresenta uma abordagem mais vantajosa em relação a versão anterior uma vez que a nova metodologia avalia diversos cenários obtidos pela alteração de premissas iniciais e permite quantificar melhor as incertezas da análise (EPE, 2017b).

O documento que complementa o planejamento do sistema elétrico brasileiro a mais longo prazo é o Plano Nacional de Energia, sendo que o mais recente se refere ao horizonte 2030 – PNE2030 (EPE, 2007). Sua nova versão PNE2050 encontra-se em elaboração. Nele prevê-se uma demanda por energia elétrica em 2050 em torno de 1600 TWh, dependendo dos cenários de ganhos de eficiência energética. A participação da eletricidade no consumo final é projetada em torno de 26% indicando forte eletrificação no período 2026 a 2050.

No âmbito internacional, o Brasil assumiu compromissos para mitigação das emissões de GEE 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 Pesquisas Energéticas 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 a 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 Tab. 2 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.

Tabela 2 - 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 ANEEL;

A Nota Técnica acima, embora contribua na presente discussão, apresenta números bastante defasados em relação ao PDE2026, 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.

Na Fig. 4, por exemplo, é apresentada a comparação entre as projeções para expansão da capacidade de geração eólica. Nota-se que as estimativas do PDEE estão além das metas estabelecidas pela NDC brasileira, indicando uma adição de 14 a 23 GW no horizonte até 2026, sugerindo taxas próximas de 2 GW/ano.

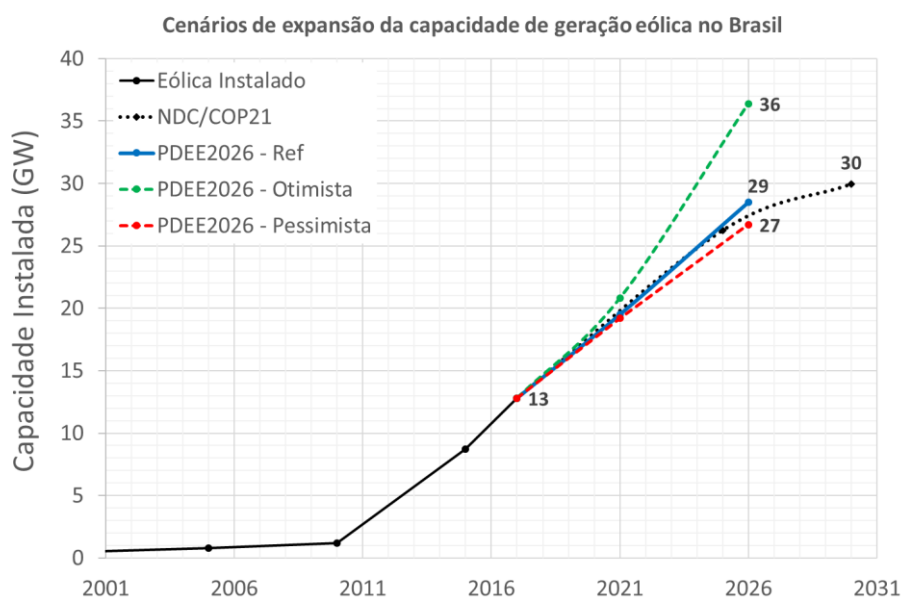


Figura 4 – Projeções da expansão da capacidade de geração eólica pelo PDEE e NDC.

Fonte: EPE (2016, 2017b).

De forma análoga, a Fig. 5 apresenta esta a comparação para a expansão da capacidade de geração solar centralizada e distribuída, onde prevê-se um aumento de 15GW até 2026 pelo PDEE e 20 GW na capacidade instalada até 2030 pela NDC. Os dados de geração distribuída foram retirados das projeções da (ANEEL, 2017b).

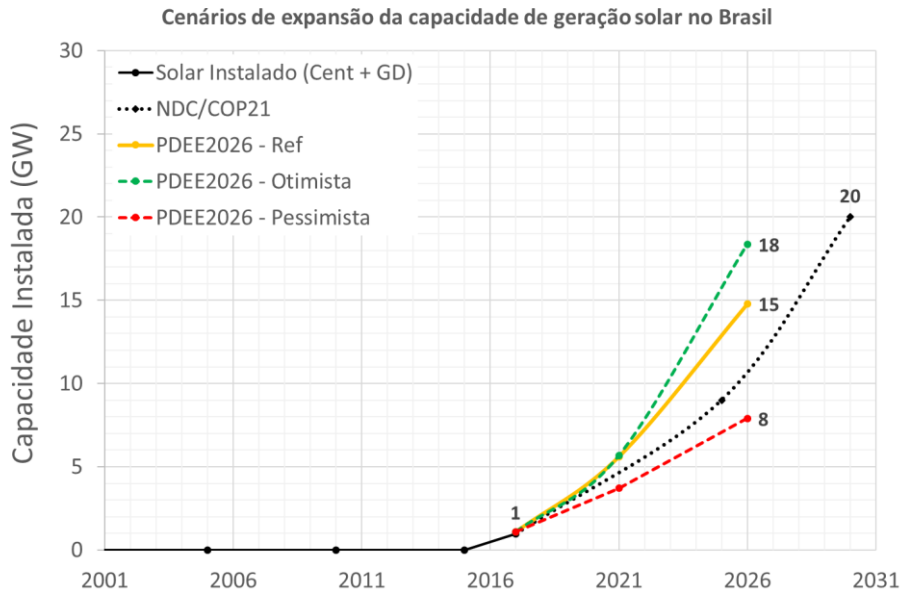


Figura 5 – Projeções da expansão da capacidade de geração solar (centralizada e distribuída) pelo PDEE e NDC.

Fonte: EPE (2016, 2017b); ANEEL (2017b).

Por se tratar da fonte de geração elétrica predominante no Brasil, avaliou-se também as projeções para a expansão da matriz hidráulica. A Fig. 6 ilustra um grande descompasso na instalação de hidrelétricas entre os planos. Enquanto o PDEE estima uma adição modesta de 11 GW até 2026, a NDC estima em 58 GW em novas hidrelétricas até 2030. Sendo o PDEE 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 carga horária de ponta. Embora a tecnologia a ser adotada ainda seja objeto de discussão no governo, assume-se no PDEE que esta capacidade seja, a priori, atendida por termelétricas a gás natural.

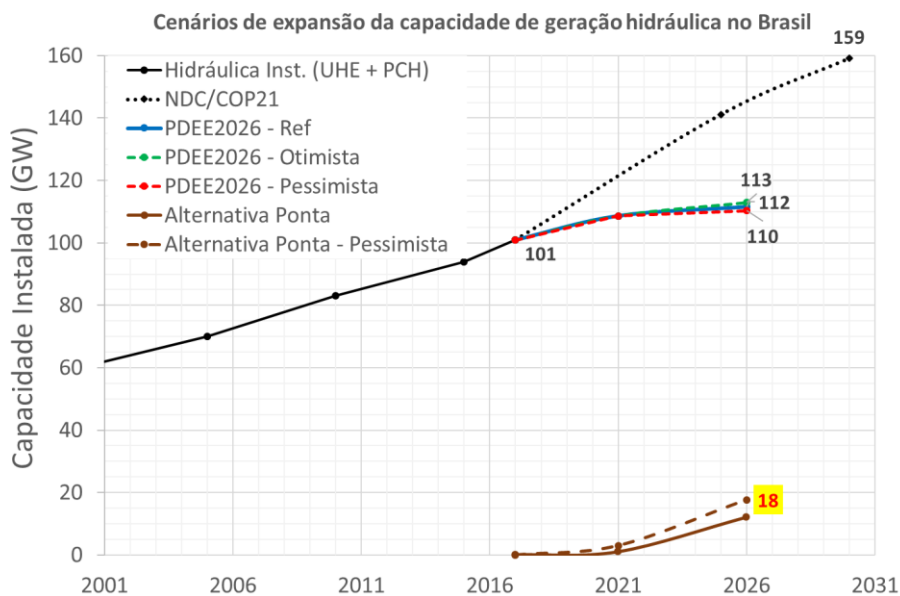


Figura 6 – Projeções da expansão da capacidade de geração hidráulica (UHE e PCH) pelo PDEE e NDC e consequente surgimento de alternativa para carga de ponta.

Fonte: EPE (2016, 2017b).

4. DISCUSSÃO

Os dados apresentados mostram que o Brasil está em uma posição confortável no que se refere aos desafios para 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 comparada ao potencial renovável disponível. No entanto, o histórico recente mostra uma tendência a carbonização da matriz elétrica brasileira frente a dificuldades de se implantar grandes projetos hidrelétricos, agravado pelos investimentos ainda tímidos em novas fontes renováveis como solar e eólica. Este cenário pode ser agravado pela perspectiva de inclusão de até 18 GW de capacidade extra (possivelmente termelétricas) para suprir carga de ponta no sistema elétrico em determinados horários como ilustra a Figura 6.

A real necessidade desta potência extra é incerta, uma vez que o próprio PDEE observa a deficiência dos modelos utilizados em representar a geração solar e eólica em escala horária. Evidências que apontam que há uma subutilização do potencial oriundo das fontes solar e eólica no planejamento nacional (Aquila, Pamplona, Queiroz, Rotela Junior, & Fonseca, 2017). Os cenários mais otimistas apresentados pelo PDEE sugerem uma penetração de VREs de 26% na matriz elétrica enquanto diversos estudos apontam a viabilidade técnica e econômica para uma penetração superior a 30%. (Schmidt *et al.*, 2016a; Schmidt, Cancelli, & Pereira, 2016b) realizaram simulações com modelos de despacho de carga para o ano de 2013 e chegou a uma matriz composta por 37% de geração solar, 9% de eólica, 50% de hidráulicas e 2% de térmicas a biomassa, capaz de atender aos critérios brasileiros de segurança energética. Isto representa quase duas vezes o cenário otimista do PDEE e mais de quatro vezes a meta de 12% em geração solar e eólica estipulado pelo NDC.

Estudos similares com penetração de renováveis de até 100% associado a uma eletrificação da matriz energética têm sido publicados para diversos países mostrando ser este um campo onde há margem para inovação (S. Becker, Rodriguez, Andresen, Schramm, & Greiner, 2014; Budischak *et al.*, 2013; Delucchi & Jacobson, 2011; Rasmussen *et al.*, 2012). No contexto técnico-econômico estudos com cenários diversos construídos por modelos integrados (IAM) específicos para o Brasil mostram que, na presença de mecanismos de incentivo e compensação de emissões de carbono, há uma tendência maior de expansão das fontes eólica e biomassa no horizonte de 2050, podendo chegar a 30% da geração total (Santos *et al.*, 2017). Em contrapartida, há uma incerteza tecnológica quanto aos limites de inserção de VREs ao sistema. Isto porque a geração hidrotérmica brasileira pode não estar adaptada a grandes penetrações de geração variável, uma vez que requisitos de flexibilidade são necessários para responder a rápidas variações na potência oriunda de plantas solares e eólicas (Denholm & Hand, 2011; Miranda, Schaeffer, & Szklo, 2016).

Outras incertezas tecnológicas que afetam a expansão da matriz elétrica se referem ao advento dos veículos elétricos e dos *smartgrids*. Em 2015, o número de veículos elétricos no mundo chegou a marca de 1,3 milhão e deve alcançar 30 milhões em 2025 e 150 milhões em 2040, causando um aumento de 40% na demanda de eletricidade mundial. Se políticas de incentivo forem adotadas de modo a limitar as emissões de CO₂ este número pode chegar a 715 milhões em 2040, o que ilustra a incerteza e o potencial impacto deste setor (IEA, 2016b). As metas brasileiras consideram uma inserção de 4,5% de veículos elétricos até 2030 o que teria pouco efeito sobre a demanda neste horizonte. Por outro lado, os *smartgrids* afetam a demanda de duas formas: i) permitindo tarifas diferenciadas ao longo do dia de modo a reduzir a demanda no horário de pico; e ii) aumentando a eficiência elétrica na medida em que reduz perdas na distribuição de energia. Estes grids tendem a favorecer a inserção de VREs no sistema elétrico, mas a velocidade de sua expansão para grande escala em países como o Brasil ainda é incerta.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho mostra que a discussão sobre os cenários futuros para o setor de energia permeia as esferas econômica, política, social e ambiental da sociedade tratando-se de um tema essencialmente interdisciplinar. Considerando especificamente a expansão da geração solar e eólica, conclui-se 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 de VREs no sistema elétrico, embora evidências apontem que este limite é muito superior à meta assumida no planejamento atual.

Os cenários apresentados mostram que o Brasil optou por atribuir até 20 GW (considerando 2,6 GW previstos mais 18 GW em alternativa de ponta) possivelmente a termelétricas fósseis, o que representa 50% de toda a expansão do setor nos próximos 10 anos. Se concretizada, esta decisão pode elevar os custos da energia no país e dificultar o atendimento às metas de emissões de CO₂ assumidas junto à comunidade internacional.

Por fim salienta-se que advento de tecnologias que afetam a demanda de eletricidade, como os veículos elétricos e os *smartgrids* podem alterar substancialmente as premissas de evolução da demanda adotadas para a construção dos cenários de expansão da geração no Brasil, especialmente a partir de 2030.

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 N° 16/2014.

REFERÊNCIAS

- Almeida Prado, F., Athayde, S., Mossa, J., Bohlman, S., Leite, F., & Oliver-Smith, A. (2016). How much is enough? An integrated examination of energy security, economic growth and climate change related to hydropower expansion in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1132–1136. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.050>
- 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 (2012). *Resolução Normativa Nº 482, De 17 De Abril De 2012 - RN-482/2012*. Brasília.
- 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.
- Aquila, G., Pamplona, E. de O., Queiroz, A. R. de, Rotela Junior, P., & Fonseca, M. N. (2017). An overview of incentive policies for the expansion of renewable energy generation in electricity power systems and the Brazilian experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70(December 2016), 1090–1098. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.013>
- Becker, S., Frew, B. A., Andresen, G. B., Zeyer, T., Schramm, S., Greiner, M., & Jacobson, M. Z. (2014). Features of a fully renewable US electricity system: Optimized mixes of wind and solar PV and transmission grid extensions. *Energy*, 72. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.067>
- Becker, S., Rodriguez, R. A., Andresen, G. B., Schramm, S., & Greiner, M. (2014). Transmission grid extensions during the build-up of a fully renewable pan-European electricity supply. *Energy*, 64, 404–418. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.010>
- Blanco, G., Gerlagh, R., Suh, S., Barrett, J., de Coninck, H. C., Diaz Morejon, C. F., ... Zhou, P. (2014). Drivers, Trends and Mitigation. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 351–412. <https://doi.org/10.2800/93693>
- Borba, B. S., Szklo, A., & Schaeffer, R. (2012). Plug-in hybrid electric vehicles as a way to maximize the integration of variable renewable energy in power systems: The case of wind generation in northeastern Brazil. *Energy*, 37(1), 469–481. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.008>
- Budischak, C., Sewell, D., Thomson, H., MacH, L., Veron, D. E., & Kempton, W. (2013). Cost-minimized combinations of wind power, solar power and electrochemical storage, powering the grid up to 99.9% of the time. *Journal of Power Sources*, 225, 60–74. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.09.054>
- 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*. Brasília.
- Clarke, L., Jiang, K., Akimoto, K., Babiker, M., Blanford, G., Fisher-Vanden, K., ... van Vuuren, D. P. (2014). Chapter 6 - Assessing transformation pathways. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. IPCC Working Group III Contribution to AR5*. Cambridge University Press. Recuperado de <http://pure.iiasa.ac.at/11119/>
- 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 Energéticas. (2007). *Plano Nacional de Energia 2030*.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energéticas. (2012). *Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira*. Rio de Janeiro.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energéticas. (2013). *Caracterização do Recurso Eólico e Resultados Preliminares de sua Aplicação no Sistema Elétrico*. Rio de Janeiro.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energéticas. (2015). *Nota Técnica 127/2015, 1º Leilão de energia de reserva de 2015, Participação dos Empreendimentos Solares Fotovoltaicos: Visão Geral*. Rio de Janeiro.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energéticas. (2016). *O compromisso do Brasil no combate às mudanças climáticas: Produção e Uso de Energia - Nota Técnica*. Rio de Janeiro.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energéticas. (2017a). *Balanço Energético Nacional 2017 - Ano base 2016*. Rio de Janeiro.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energéticas. (2017b). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2026*. Rio de Janeiro.
- Fearnside, P. . M. . (2015). Brazil ' s São Luiz do Tapajós Dam : The Art of Cosmetic Environmental Impact Assessments, 8(3), 2015.
- FGV, Fundação Getúlio Vargas (2014). *Energia e Sustentabilidade. Desafios do Brasil na expansão da oferta e na*

gestão da demanda. Rio de Janeiro.

- Huber, M., Dimkova, D., & Hamacher, T. (2014). Integration of wind and solar power in Europe: Assessment of flexibility requirements. *Energy*, *69*, 236–246. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.109>
- IEA, International Energy Agency (2016a). *Energy Technology Perspectives 2016: Towards Sustainable Urban Energy Systems*.
- IEA, International Energy Agency. (2016b). *Global EV Outlook: Beyond one million electric cars*.
- IRENA, International Renewable Energy Agency. (2017). *REthinking Energy 2017: Acelerating 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>
- Miranda, R., Schaeffer, R., & Szklo, A. S. (2016). Limitations of thermal power plants to solar and wind development in Brazil. In *ECOS 2016-The 29th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems* (p. 1–21).
- 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). Sao José dos Campos: INPE.
- Rasmussen, M. G., Andresen, G. B., & Greiner, M. (2012). Storage and balancing synergies in a fully or highly renewable pan-European power system. *Energy Policy*, *51*, 642–651. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.009>
- Rego, E. E., & Parente, V. (2013). Brazilian experience in electricity auctions: Comparing outcomes from new and old energy auctions as well as the application of the hybrid Anglo-Dutch design. *Energy Policy*, *55*, 511–520. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.042>
- Santos, M. J., Ferreira, P., Araújo, M., Portugal-Pereira, J., Lucena, A. F. P., & Schaeffer, R. (2017). Scenarios for the future Brazilian power sector based on a multi-criteria assessment. *Journal of Cleaner Production*, *167*, 938–950. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.145>
- Schmidt, J., Cancelli, R., & Pereira, A. O. (2016a). An optimal mix of solar PV, wind and hydro power for a low-carbon electricity supply in Brazil. *Renewable Energy*, *85*(2016), 137–147. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.010>
- Schmidt, J., Cancelli, R., & Pereira, A. O. (2016b). The role of wind power and solar PV in reducing risks in the Brazilian hydro-thermal power system. *Energy*, *115*, 1748–1757. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.059>
- Silva, R. C., De Marchi Neto, I., & Seifert, S. S. (2016). Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.001>
- Soria, R., Portugal-Pereira, J., Szklo, A., Milani, R., & Schaeffer, R. (2015). Hybrid concentrated solar power (CSP)-biomass plants in a semiarid region: A strategy for CSP deployment in Brazil. *Energy Policy*, *86*(March 2014), 57–72. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.06.028>
- 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*.

SCENARIOS FOR WIND AND SOLAR POWER EXPANSION IN BRAZILIAN ELECTRICITY MATRIX

Abstract. Brazil, like many countries, faces a deep energy transition motivated by environmental concerns like global warming and urban air pollution. In this way, to plan the electricity sector expansion becomes a hard task, due to political and economic uncertainty and ongoing technological changes. Among several alternatives, some solutions are proving more reliable like diversification of the energy matrix through penetration of new renewable sources like solar and wind power. This study presents a review on the growth projections for solar and wind power sources in Brazilian electricity matrix. Updated data for availability and costs of energy sources are presented, followed by a brief discussion on penetration of intermittent sources on electrical system. Different scenarios produced by government are assessed based on a deep literature review. Results have shown that despite an expressive increase perspective for solar and wind power, reaching a share of 26% of the matrix in next decade, more investigation is required to evaluate the need and alternatives for load balance in peak hours. The possible adoption of upon to 18 GW thermoelectric plants may negatively impact emission targets and energy costs for Brazilian society.

Key words: Solar Energy, Wind Energy, Energy Planning