

CENÁRIOS BRASILEIROS DE DEMANDA ELÉTRICA E DE SUPRIMENTO COM ENERGIAS EÓLICA E SOLAR NO PERÍODO 2019–2050

JOSÉ ALEXANDRE FERRAZ DE ANDRADE SANTOS¹, EDNILDO ANDRADE TORRES²

¹Doutorando e Mestre em Eng. Industrial, pesquisador, UFBA, Salvador–BA, alex_caeel@yahoo.com.br

²Dr. em Eng. Mecânica, Prof. Titular na Escola Politécnica, UFBA, Salvador–BA, ednildo@ufba.br

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
04 a 06 de outubro de 2022

RESUMO: A matriz elétrica brasileira precisa de expansão contínua e planejada para garantir a sua segurança energética, a diversificação das fontes de energia e a manutenção da sua predominância renovável. Adicionalmente, o setor elétrico brasileiro (SEB) pode reduzir suas emissões através da ampliação do uso de energias renováveis, o que ajudaria o Brasil a atender suas metas internacionais de sustentabilidade. Neste contexto, as energias eólica e solar são opções relevantes para o Brasil, principalmente por existirem grandes potenciais disponíveis. Com base nisto, este trabalho elabora cenários brasileiros de demanda elétrica e de oferta de energia (eólica e solar fotovoltaica) para o período de 2019 até 2050 e estima reduções de emissões de gases de efeito estufa (GEE).

PALAVRAS-CHAVE: Energia Eólica, Energia Solar (Fotovoltaica), Demanda-Oferta Elétrica.

BRAZILIAN SCENARIOS OF POWER ENERGY DEMAND AND OF WIND AND SOLAR POWER ENERGY SUPPLY IN THE PERIOD 2019-2050

ABSTRACT: The Brazilian electrical matrix needs continuous and planned expansion to guarantee its energy security, the diversification of energy sources and the maintenance of its renewable predominance. Additionally, the Brazilian electricity sector (SEB) can reduce its emissions by increasing the use of renewable energy, which would help Brazil to meet its international sustainability goals. In this context, wind and solar energy are relevant options for Brazil, mainly because there are great potentials available. Based on this, this work elaborates Brazilian scenarios of electricity demand and power energy supply (wind and solar photovoltaic) for the period from 2019 to 2050 and estimates reductions in greenhouse gas (GHG) emissions.

KEYWORDS: Wind Energy, Photovoltaic Solar Energy, Power Energy Demand-Supply.

INTRODUÇÃO

O contemporâneo cenário mundial de mudanças climáticas reforça a importância da inserção e expansão das energias renováveis nos planejamentos governamentais em relação às matrizes energéticas e elétricas. Segundo estudos da *International Energy Agency* – IEA (2020), da *International Renewable Energy Agency* – IRENA (IEA/IRENA, 2017) e da *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century – REN21* (2022) as energias renováveis são fundamentais para a transição energética mundial capaz de reduzir o consumo de combustíveis fósseis e possibilitar uma economia de baixo carbono, havendo destaque de importância das energias eólica e solar.

Nos últimos anos, no Brasil e no Mundo existe a tendência de investimentos em energias renováveis na geração centralizada (GC), especialmente a eólica e a solar FV (Santos *et al*, 2020). Então, estas duas fontes energéticas foram escolhidas como foco deste artigo, por estarem se expandindo e por apresentarem um grande potencial energético nacional (Tabela 1).

Tabela 1. Síntese dos Potenciais Energéticos da Energia Eólica e Solar (FV) no Brasil.

Energia	Altura	Potencial para Geração Centralizada	Referências
Eólica	50m	143,5 GW	CEPEL (2001)
	100m	880,5 GW (com 522 GW tecnicamente viáveis)	Pereira (2016)
Solar	Nível do solo	307 GWp (em áreas com atividades humanas)	Tolmasquim (2016), Konzen (2016)

O Brasil necessita expandir sua matriz elétrica de forma contínua e planejada para garantir sua segurança energética, a diversificação das fontes de energia e a manutenção da sua predominância renovável. Esta expansão tem sido feita isto principalmente através de contratações de empreendimentos energéticos via leilões federais (Tabela 2). Além disto, o setor elétrico brasileiro (SEB) pode reduzir suas emissões via uso de energia eólica e solar, o que auxiliaria o Brasil a atender suas metas de sustentabilidade assumidas nas 21ª e 26ª Conferências das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas, ocorridas respectivamente em 2015, em Paris, e em 2021, em Glasgow.

Tabela 2. Históricos e Médias de Contratações Eólicas e Solares dos Leilões 2009–2019 a partir de dados da EPE (2020a), ABSOLAR (2020) e ABEEOLICA (2020).

Séries Históricas das Contratações das Energias Eólica e Solar Fotovoltaica em Leilões no Brasil							
EÓLICA				SOLAR FV			
Nº	Leilões	Projetos Contratados		Nº	Leilões	Projetos Contratados	
		Quantidade	MW			Quantidade	MW
1	2º LER/2009	67	1.820,2	1	6º LER A-3/2014	31	890
2	3º LER/2010	20	548,2	2	1º LER/2015	30	834
3	2º LFA/2010	48	1.293,4	3	2º LER/2015	33	929
4	4º LER/2011	23	592,8	4	2016 - Sem contratação	0	0
5	A-3/2011	43	1.026,3	5	A-4/2017	20	574
6	A-5/2011	33	822,1	6	A-4/2018	29	807
7	LER/2013	47	1.108,6	7	LEN A-4/2019	6	204
8	A-3/2013	38	763,7	8	LEN A-6/2019	11	530
9	A-5 Dez/2013	64	1.415,3		Totais	160	4.768,0
10	6º LER A-3/2014	18	471,1		Média Anual de Contratação (MW/Ano)		794,7
11	LER/2014	31	740,6				
12	20º LEN A-5/2014	36	927,2				
13	LFA/2015	3	90,0				
14	A-3/2015	19	518,2				
15	LER Nov/2015	20	551,3				
16	2016 - Sem contratação	0	0,0				
17	A-4/2017	2	69,3				
18	A-6/2017	49	1.452,6				
19	A-4/2018	4	114,4				
20	A-6/2018	44	1.136,3				
21	LEN A-4/2019	3	95,4				
22	LEN A-6/2019	44	1.040,0				
	Totais	656	16.597,0				
	Média Anual de Contratação (MW/Ano)		1.508,8				

Neste contexto, o objetivo deste artigo é fazer cenários com as projeções das demandas elétricas e das ofertas de eletricidade eólica e solar (FV) para o período de 2019 até 2050 no Brasil e estimar o benefício ambiental da redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) no SEB.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho referenciou-se no Plano Nacional de Energia para 2050 – PNE 2050, nos Balanços Energéticos Nacionais – BEN e em pesquisas acadêmicas. Os dados primários foram pesquisados em base de dados técnico-científicos nacionais de domínio público, disponíveis na internet. Assim, a partir dos dados dos BEN (EPE, 2022) e do PNE 2050 (MME/EPE, 2020; EPE, 2014a; 2014b) e utilizando-se o *software Excel* e as *Equações 1* (cálculo de demandas) e *2* (cálculo de ofertas), adaptadas de Santos (2015) e Santos & Torres (2016; 2017) no Quadro 1, foram criados *quatro cenários nacionais de demanda elétrica e três cenários nacionais de oferta de eletricidade eólico-solar*.

Quadro 1. Equações para as projeções.

Equação 1	Equação 2
$D(TWh) = D_0 \times (1 + C)^N$ <p>Onde: D(TWh) = Demanda total de eletricidade em Terawatt-hora (TWh); D₀ = Ponto inicial da demanda de energia elétrica com valor igual a 545,6 TWh em 2019 (EPE, 2021b); C = Taxa de crescimento anual da demanda de eletricidade; N = Número de anos considerados no período definido.</p>	$P(TWh) = P_0 + \frac{8.760 \times N \times [(CIEol \times FCEol) + (CISol \times FCSol)]}{1.000.000}$ <p>Onde: P(TWh) = Geração total de energia eólica e solar FV em TWh; P₀ = Ponto inicial de fornecimento eólico com valor igual a 62,6 TWh em 2019; N = Número de anos, variando de 0 a 31, correspondendo a 2019 até 2050; CIEol = Contratação de capacidade eólica instalada em Megawatt/ano (MW/ano); CISol = Contratação da capacidade instalada de energia solar fotovoltaica em MW/ano; FCEol = Fator de capacidade adotado para geração eólica igual a 41,05%; FCSol = Fator de capacidade adotado para geração de energia solar fotovoltaica igual a 21,71%.</p>

Para visualização de cenários futuros de demanda e oferta de eletricidade, foram criadas projeções para o período de 2019 até 2050. O ano de 2019 foi considerado o ponto de partida das projeções porque foi o último ano não impactado pela pandemia do coronavírus, supostamente originada na China e que impactou significativamente as economias em todo mundo, inclusive a brasileira. Em 2019, segundo o BEN 2020 (EPE, 2022): a oferta interna de energia elétrica foi de 651,3 TWh com importação de e 25,0 TWh, a demanda elétrica (consumo final) foi de **545,6 TWh** e o fornecimento conjunto da energia eólica (55.986 GWh) com a energia solar FV (6.655 GWh) por GC foi de 62.641 GWh (ou **62,6 TWh**).

O **1º cenário de demanda elétrica** corresponde à versão preliminar do PNE 2050 (EPE, 2014a; 2014b) e apresenta uma demanda final de eletricidade de 1.624 TWh em 2050, correspondendo ao período 2019-2050, com uma taxa anual de crescimento de 3,5813%. O **2º cenário de demanda elétrica** foi obtido a partir do crescimento histórico médio da demanda de 2000 a 2018 (EPE, 2022), que corresponde a uma taxa anual de 2,7%. Os efeitos previsíveis da redução transitória da demanda elétrica por causa da pandemia do coronavírus não serão levados em consideração, pois serão diluídos ao longo do período de três décadas deste estudo. Os **3º e 4º cenários de demanda elétrica** correspondem, respectivamente, aos cenários de *expansão* (demanda elétrica de 1.548 TWh em 2050) e de *estagnação* (demanda elétrica de 585 TWh em 2050) da versão definitiva do PNE 2050 (MME/EPE, 2020), que pré-estabeleceu estimativas para os valores de demanda elétrica para os anos de 2030, 2040 e 2050. Dessa maneira, a *Equação 1* foi utilizada nestes dois cenários com taxas anuais distintas de crescimento de demanda elétrica conforme os períodos determinados: a) 2019–2030: com taxas anuais de 1,184% para a *estagnação* e 5,301% para a *expansão*; b) 2031–2040: com taxas anuais de -0,15% para a *estagnação* e 2,577% para a *expansão*; c) 2041–2050: com taxas anuais de -0,45% para a *estagnação* e 2,2265% para a *expansão*.

Os três cenários de oferta de eletricidade via GC eólica e solar FV foram definidos por estimativas de contratações anuais de capacidades instaladas via leilões do Governo Federal feitos na Tabela 2. O **1º cenário de oferta de eletricidade** (Oferta 1) corresponde a soma das contratações de capacidades instaladas atualmente reivindicadas pela ABEEÓLICA (Melo, 2015) e ABSOLAR (2014), sendo equivalentes a 2.000 MW/ano para cada fonte e correspondendo a um cenário otimista (maior contratação). O **2º cenário de oferta de eletricidade** (Oferta 2) é uma referência (uma contratação intermediária) que corresponde à média de contratações (Tabela 2) já realizadas de 2009 a 2019 (série histórica), sendo 1.508,8 MW/ano para eólica e 794,7 MW/ano para solar. O **3º cenário de oferta de eletricidade** (Oferta 3) corresponde a um cenário pessimista (menor contratação), onde são considerados 1.000 MW/ano para energia eólica e 500 MW/ano para energia solar FV.

Os fatores de capacidade (FC) médios (Tabela 3) usados foram obtidos com o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS (2021a; 2021b) referentes ao ano 2020: 41,05% para a eólica e 21,71% para a solar FV. A Tabela 4 apresenta, respectivamente, as determinações dos números das contratações anuais de capacidades instaladas e os FC usados nas projeções dos três cenários da expansão de oferta, bem como as capacidades instaladas e a energias geradas totalizadas para 2050.

Tabela 3. FCs das energias eólica e solar FV em 2020.

Energia	Fator de Capacidade em 2020												Fator de Capacidade Médio
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Eólica	25,16%	27,14%	20,51%	28,84%	34,48%	45,72%	51,80%	59,04%	59,30%	49,21%	44,75%	46,70%	41,05%
Solar FV	21,43%	20,95%	21,01%	21,71%	21,48%	22,13%	22,48%	22,81%	23,75%	21,28%	20,57%	20,97%	21,71%

Tabela 4. Contratações, capacidades instaladas e energia gerada no Brasil: período 2019-2050.

Cenários	Fonte de Energia	Contratação (MW/Ano)		Nº de Anos (2019-2050)	Capacidade Instalada 2019-2050		Fator de Capacidade	Geração Elétrica em 2050 (TWh)	
		Individual	Conjunta		Individual (MW)	Conjunta (MW)		Individual	Conjunta
Cenário de Oferta 1	Eólica	2000	4000	31	62000,0	124000,0	41,05%	223,0	340,9
	Solar FV	2000			62000,0		21,71%	117,9	
Cenário de Oferta 2	Eólica	1508,8	2303,5		46772,8	71408,5	41,05%	168,2	215,0
	Solar FV	794,7			24635,7		21,71%	46,9	
Cenário de Oferta 3	Eólica	1000	1500		31000,0	46500,0	41,05%	111,5	141,0
	Solar FV	500			15500,0		21,71%	29,5	

Em termos de sustentabilidade, foram estimados os impactos futuros causados por esta geração elétrica a partir da energia eólica e solar. Assim, com base nos três cenários de oferta elétrica eólica-

solar FV, foram calculadas as respectivas reduções de emissões de GEE para o ano de 2050. A redução adotada foi de 90 kgCO₂/MWh, correspondente a 2019, conforme BEN 2020 (EPE, 2022).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através do software *Excel* foram feitas interpolações com as *Equações 1 e 2* para projetar os cenários na Figura 1, onde aparece o cruzamento entre esses diferentes cenários de demanda e oferta de eletricidade, gerando *doze possibilidades de contribuição da energia eólica e solar FV* para o Brasil em 2050 (Tabela 5). Com isto, constata-se que a eletricidade eólico-solar produzida poderá abastecer entre **12,5% e 69,0% da demanda elétrica nacional** e poderá contribuir efetivamente na redução de emissões de GEE no SEB entre **12,7 e 30,7 Gt CO₂-eq** (Tabela 6).

Figura 1. Projeções de demandas elétricas e ofertas de eletricidade eólico-solar 2019-2050.

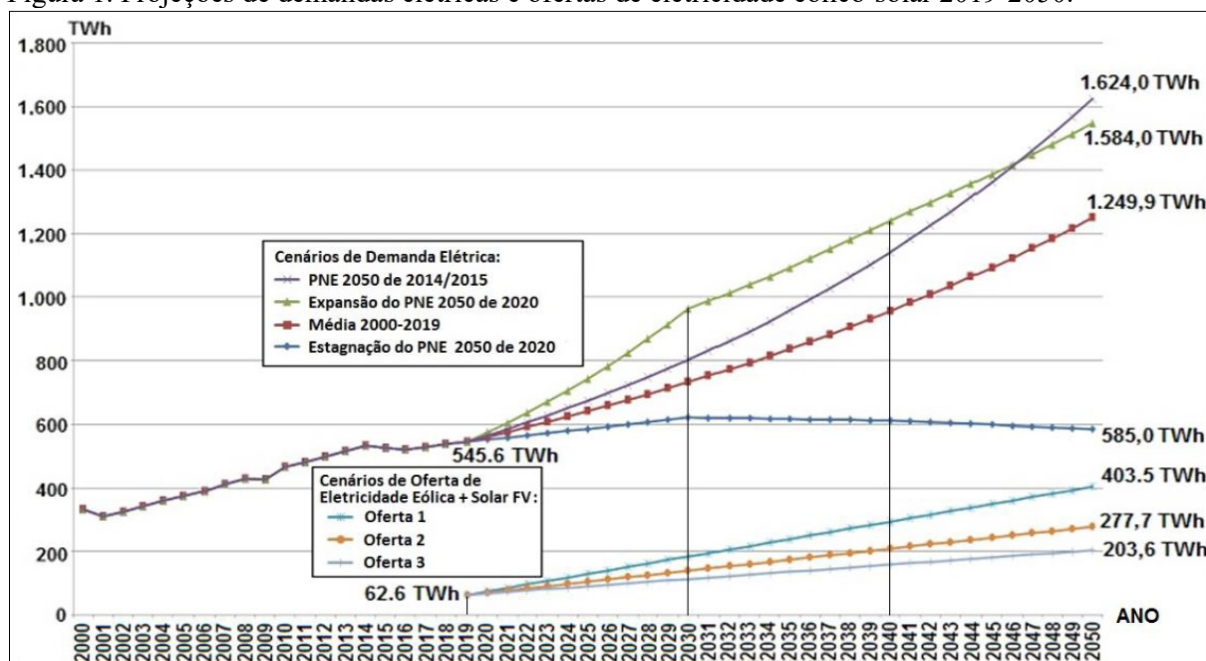


Tabela 5. Cruzamento entre Demandas e Ofertas de Eletricidade em 2050.

Demanda Brasileira de Eletricidade (TWh)		Oferta de Energia Eólica e Solar FV (TWh)		% da Demanda Brasileira abastecida com Energia Eólica e Solar FV	
Referencia em 2019		545,6	Oferta em 2019	62,6	11,5%
Cenários para 2050	PNE 2050 2014/2015 Preliminar (Taxa Anual de 3,5813%)	1624,0	Oferta 1	403,5	24,8%
			Oferta 2	277,7	17,1%
			Oferta 3	203,6	12,5%
	PNE 2050 (versão 2020) "Cenário de Expansão"	1548,0	Oferta 1	403,5	26,1%
			Oferta 2	277,7	17,9%
			Oferta 3	203,6	13,2%
	Período 2000-2019 (Taxa Anual de 2,71%)	1249,9	Oferta 1	403,5	32,3%
			Oferta 2	277,7	22,2%
			Oferta 3	203,6	16,3%
	PNE 2050 Versão 2020) "Cenário de Estagnação"	585,0	Oferta 1	403,5	69,0%
			Oferta 2	277,7	47,5%
			Oferta 3	203,6	34,8%

Tabela 6. Cenários de Ofertas de Energia Eólico-Solar em 2050 e as respectivas reduções de emissões.

3 Projeções de Cenários para a Energia Eólica e Solar no Brasil em 2050			
	Cenário de Oferta 1	Cenário de Oferta 2	Cenário de Oferta 3
Capacidade Instalada Total (MW)	124.000,0	71.408,5	46.500,0
Geração Adicional de Energia (TWh)	340,9	215,0	141,0
Geração Total de Energia Elétrica (TWh)	403,5	277,7	203,6
Redução de Emissões (Gt CO ₂ -eq)	30,7	19,4	12,7

CONCLUSÃO

Este estudo indica que as fontes de energia eólica e solar (FV) podem oferecer contribuições significativas para o suprimento das futuras demandas por energia elétrica no Brasil. Nos doze cenários elaborados de demanda-oferta, as contribuições da eletricidade produzida pelas fontes eólica e solar (FV) foram significativas. Além disso, as perspectivas de sustentabilidade ambiental são muito positivas, pois apresentam relevantes potenciais reduções de emissões de GEE.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com apoio da *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001*.

REFERÊNCIAS

- ABEEOLICA (Associação Brasileira de Energia Eólica). Infovento Nº. 15. Brasília, 2020.
- ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica). Infográfico Nº 19. São Paulo, 2020.
- CEPEL (Centro de Pesquisas em Energia Elétrica). Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. BSB, 2001.
- EPE (Empresa de Pesquisa Energética). Leilões. EPE, Rio de Janeiro, 2020a. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/leiloes-de-energia/leiloes>>. Acesso em 23/06/2022.
- _____. Balanço Energético Nacional. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>. Acesso em 23/06/2022.
- _____. Série Estudos Econômicos: Nota Técnica DEA 12/14 – Cenário Econômico 2050. Plano Nacional de Energia 2050, Rio de Janeiro, 2014a.
- _____. Série Estudos da Demanda de Energia: Nota Técnica DEA 13/14 – Demanda de Energia 2050. Plano Nacional de Energia 2050, Rio de Janeiro, 2014b.
- IEA (*International Energy Agency*). *Energy Technology Perspectives 2020*. IEA, Paris, 2020.
- IEA; IRENA (*International Renewable Energy Agency*). *Perspectives for the Energy Transition: Investment Needs for a Low-Carbon Energy System*. IEA, Paris, 2017.
- Konzen, G.. A Fonte Fotovoltaica no Planejamento Energético Nacional. In: 1º Encontro Baiano de Energia Solar. Palestra da EPE, Salvador, 2016.
- MME (Ministério de Minas e Energia); EPE (Empresa de Pesquisa Energética). Plano Nacional de Energia 2050. Brasília: MME/EPE, 2020.
- ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico). Resultados da Operação – Boletins de Operação: Dados da Geração Eólica no SIN. Rio de Janeiro, 2021a.
- _____. Resultados da Operação – Boletins de Operação: Dados da Geração Solar Fotovoltaica no SIN. Rio de Janeiro, 2021b.
- Pereira, E. B.. Segurança Energética: perspectivas no enfrentamento às mudanças climáticas globais. In: Conferência Internacional do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) para Mudanças Climáticas. São Paulo, 2016.
- REN21 (*Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*). *Renewables 2022 Global Status Report*. REN21 Secretariat, Paris, 2022.
- Santos, J. A. F. A.; De Jong, Pieter; Costa, C. A.; Torres, E. A.. *Combining Wind and Solar Energy Sources: Potential for Hybrid Power Generation in Brazil*. *Utilities Police*, vol. 67, 101084, 2020.
- Santos, J. A. F. A.; Torres, E. A.. Potencial e inserção de novas energias renováveis na matriz elétrica baiana para geração elétrica centralizada até 2050. *Bahia Análise & Dados*, v. 27, n. 1, p. 144–173, Salvador, 2017.
- Santos, J. A. F. A.; Torres, E. A.. Expansão da Geração Elétrica na Bahia até 2050 com base nas Novas Energias Renováveis. In: CONTECC 2016 – III Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Foz do Iguaçu-PR, 2016.
- Santos, J. A. F. A.. Planejamento energético para a Bahia em 2050: cenários e discussões relacionados às energias renováveis para geração de eletricidade. 246f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Eng. Industrial da Universidade Federal da Bahia (PEI-UFBA), Salvador, 2015.
- Tolmasquim, M. T.. Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. EPE, Rio de Janeiro, 2016.