

USINAS HIDRELÉTRICAS DA AMAZÔNIA: ADAPTANDO O SETOR DE ENERGIA PARA A SEGURANÇA ENERGÉTICA

Bruna Coelho da Conceição Pôjo¹
Pedro Manuel Soares Moura¹

¹Universidade de Coimbra

DOI: 10.47168/rbe.v27i4.615

RESUMO

Atualmente, várias hidrelétricas estão sendo planejadas para instalação na Amazônia devido ao potencial hídrico da região, porém, estudos indicam que mesmo o aumento da geração hidroelétrica não será suficiente para garantir que a demanda futura de eletricidade do Brasil seja atendida. A extensão territorial brasileira e sua diversidade climática permitem explorar o enorme potencial de complementaridade entre as fontes renováveis de energia, dada a variabilidade sazonal entre as regiões, tendendo a ser um fator que garanta a geração ao longo do tempo. Portanto, este trabalho identificou potenciais de complementaridade entre fontes renováveis de energia (solar, eólica, hídrica) e similaridade (à hídrica) em cada uma das regiões (Norte, Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste, Sul). Para tanto, foram obtidos dados de geração de energia junto ao Operador Nacional do Sistema Elétrico e foi utilizado na avaliação o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson. De forma geral, os resultados apontaram para o potencial eólico nas regiões Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste e Sul e o potencial solar nas regiões Nordeste e Sul, como alternativas que devem ser mais exploradas para garantir a diversificação da geração de energia elétrica.

Palavras-chave: Amazônia; Diversificação energética; Hidrelétrica; Energia renovável.

ABSTRACT

Currently, several hydroelectric power plants are being planned to be installed in Amazon due to the hydroelectric potential in the region, however studies indicate that even the increase in hydropower generation would not be enough to ensure that Brazil's future electricity demand is met. The Brazilian territorial extension and its climatic diversity make it possible to explore the enormous potential for comple-

mentarity between renewable energy sources, given the seasonal variability between regions, tending to be a factor that ensures generation over time. Therefore, this paper has identified scenarios of complementarity between renewable energy sources (solar, wind, hydro) and similarity (to hydro) in each of the regions (North, Northeast, Southeast/Midwest, South). To this end, energy generation data were obtained from the National Electric System Operator and the Pearson's correlation coefficient was used in this evaluation. In general, the results pointed to the potential of wind power in the Northeast, Southeast/Midwest and South regions and the solar potential in the Northeast and South regions, as alternatives that should be further explored to ensure the diversification of electricity generation.

Keywords: Amazon; Energy diversification; Hydropower; Renewable energy.

1. INTRODUÇÃO

A região Amazônica detêm um dos maiores potenciais para a geração de energia hidroelétrica no mundo. Durante muitos anos as usinas hidrelétricas foram instaladas como fonte de “energia limpa”, para atender a demanda de eletricidade do Brasil. Mais recentemente, levando-se em conta que “o potencial hidroelétrico da região Sudeste está praticamente esgotado, a expansão do sistema tem ocorrido principalmente na região Norte, incluindo a Amazônia” (GOLDEMBERG, 2015, p. 40).

No entanto, mesmo com a instalação adicional de 120 GW, o que elevaria para 80% o aproveitamento do potencial, ainda assim não seria suficiente para atender a demanda em 2030 (QUEIROZ et al., 2013, p. 2780). Adicionalmente, ressalta-se que, “os efeitos ambientais negativos das barragens existentes e barragens propostas, se construídas, podem desencadear grandes distúrbios hidrofísicos e bióticos que afetarão as planícies aluviais na Bacia Amazônica, no estuário e na pluma de sedimentos” (LATRUBESSE et al., 2017, p. 363).

O Brasil é o oitavo maior país em termos de consumo de eletricidade (509,1 TWh em 2016) e também o oitavo maior na geração de eletricidade (567,9 TWh em 2016) (CIA, 2020). Apesar da aparente segurança energética o país ainda depende muito de fontes intermitentes de energia, tal qual a hídrica, sem complementaridade substancial com outras fontes renováveis de energia, como a eólica e a solar. Assim, há a frequente necessidade de complementação térmica.

Uma mudança importante na geração de energia elétrica ocorreu em 2001, devido à crise elétrica no Brasil e, para evitar ocorrên-

cias semelhantes, foi lançado em 2002 o Programa de Incentivo às Fontes de Energia Renovável (PROINFA), que buscou incentivar a diversificação da matriz elétrica brasileira. No entanto, em 2015, ocorreu uma nova crise, causada por uma longa seca e falta de investimentos no setor elétrico. Nesse período o déficit de chuvas levou o governo brasileiro ao acionamento frequente das usinas térmicas, para complementar o baixo desempenho da geração hidráulica (MYSZCZUK & SOUZA, 2018, p. 210).

Entende-se então, que a matriz ainda pouco diversificada não garante a segurança energética, muitas vezes resultando em problemas de abastecimento, como em 2015 (SINIMBU, 2017). Assim, para que o Brasil tenha um setor elétrico mais confiável, a matriz deve ser mais diversificada, aproveitando a complementaridade entre as fontes renováveis de energia, uma vez que as regiões possuem diferentes perfis de geração renovável. A complementariedade também evitará os impactos causados pela instalação de grandes hidrelétricas, uma vez que a Amazônia “não tem grande capacidade de se adaptar à magnitude das mudanças no uso do solo e do clima global” (ROCHA et al., 2012, p. 41).

Por meio da análise dos dados de vazão natural dos rios nas principais barragens brasileiras, observou-se que “a geração hidrelétrica no Brasil tem um padrão cíclico com intervalos de 10-15 anos [...]. Os períodos de seca nesse padrão cíclico geralmente coincidem com períodos de crise energética devido à redução da geração hidrelétrica” (HUNT et al., 2018, p. 220). Esse fato evidencia a importância da complementaridade na geração com fontes alternativas.

Deste modo, o objetivo principal deste artigo é avaliar o potencial de diversificação do setor elétrico brasileiro, identificando cenários potenciais de complementaridade e similaridade (para hidrelétricas) entre fontes renováveis de energia (solar, eólica, hídrica) em cada um dos subsistemas de geração (Norte, Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste, Sul).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi metodologicamente dividida em três partes: I. Coleta de dados; II. Definição de cenários; III. Análise de dados.

A primeira parte consistiu na ‘coleta de dados’ disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Foram obtidos dados mensais sobre a geração de energia elétrica renovável (solar, eólica e hídrica), em GWh, em cada região do país, para o período de 10 anos, entre os anos de 2009 e 2018.

O segundo estágio consistiu na ‘definição dos cenários’ relati-

onados com os vários mix de geração, consideradas as fontes e as regiões. Esses cenários (apresentados na Tabela 1) foram selecionados porque potencialmente viabilizariam complementariedade ou ofereceriam alternativa à geração estritamente hidrelétrica. O objetivo deste estudo é identificar a potencial complementariedade e similaridade entre fontes renováveis de energia no Brasil, para reduzir a dependência da geração hidrelétrica e evitar impactos de novas usinas na bacia Amazônica.

Tabela 1 - Cenários considerados

Cenários	Fonte e Região	
Cenário 1	Hídrica – Região Norte	Eólica - Região Nordeste
Cenário 2	Hídrica – Região Norte	Eólica – Região Sudeste/Centro-oeste
Cenário 3	Hídrica – Região Norte	Eólica – Região Sul
Cenário 4	Hídrica – Região Norte	Solar - Região Nordeste
Cenário 5	Hídrica – Região Norte	Solar - Região Sudeste/Centro-oeste
Cenário 6	Hídrica – Região Norte	Solar – Região Sul
Cenário 7	Hídrica – Região Nordeste	Eólica – Região Sudeste/Centro-oeste
Cenário 8	Hídrica – Região Nordeste	Eólica – Região Sul
Cenário 9	Hídrica – Região Nordeste	Solar - Região Sudeste/Centro-oeste
Cenário 10	Hídrica – Região Nordeste	Solar – Região Sul
Cenário 11	Eólica – Região Nordeste	Solar - Região Sudeste/Centro-oeste
Cenário 12	Eólica – Região Nordeste	Solar – Região Sul
Cenário 13	Hídrica – Região Sudeste/Centro-oeste	Eólica – Região Nordeste
Cenário 14	Hídrica – Região Sudeste/Centro-oeste	Eólica – Região Sul
Cenário 15	Hídrica – Região Sudeste/Centro-oeste	Solar - Região Nordeste
Cenário 16	Hídrica – Região Sudeste/Centro-oeste	Solar – Região Sul
Cenário 17	Eólica – Região Sudeste/Centro-oeste	Solar - Região Nordeste
Cenário 18	Eólica – Região Sudeste/Centro-oeste	Solar – Região Sul
Cenário 19	Hídrica – Região Sul	Eólica – Região Nordeste
Cenário 20	Hídrica – Região Sul	Eólica – Região Sudeste/Centro-oeste
Cenário 21	Hídrica – Região Sul	Solar - Região Nordeste
Cenário 22	Hídrica – Região Sul	Solar - Região Sudeste/Centro-oeste
Cenário 23	Eólica – Região Sul	Solar - Região Nordeste
Cenário 24	Eólica – Região Sul	Solar - Região Sudeste/Centro-oeste

Entre os cenários não foi possível considerar a geração com biomassa, em todas as regiões, e a geração solar na Região Norte, por-

que na base de dados relativa ao atendimento do Sistema Integrado Nacional (SIN) não há registros da contribuição dessas fontes. Também foi possível considerar a contribuição da geração eólica que foi integrada ao SIN apenas em 2017.

Os cenários foram analisados graficamente e os dados de geração de energia foram normalizados entre 0 e 1, para obter um gráfico que indica a complementaridade ou similaridade entre as fontes renováveis de energia, para cada região, entre os meses ao longo do ano. Essa normalização foi implementada a cada ano e, portanto, o impacto de variações na capacidade instalada é baixo.

A terceira e última etapa consistiu na ‘análise dos dados’ obtidos nos diferentes cenários, e para tal o coeficiente de correlação de Pearson (Equação 1) foi utilizado devido ao fato de possibilitar a avaliação da relação linear entre duas variáveis. Os resultados mostram correlação variando de -1 a 1. Resultados negativos indicam uma correlação de contrariedade, portanto a complementaridade está associada a valores negativos do coeficiente de correlação. A correlação de similaridade ocorre quando os valores são maiores que zero, indicando que não há complementaridade. Não foi necessário padronizar o coeficiente de Pearson, pois a variação entre os dados é importante.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(x, y)}{\sqrt{var(x) \cdot var(y)}} \quad (1)$$

Os intervalos das correlações obtidas podem ser observados na Tabela 2 (PERON, 2017). As faixas dos valores de Pearson analisados nesta pesquisa são: 0,40 - 0,69; 0,70 - 0,89 e 0,89 - 1, negativos ou positivos em relação à geração hidroelétrica de referência. Essas faixas indicam correlações, respectivamente, moderadas, fortes e muito fortes.

Tabela 2 - Correlação de Pearson e faixa de valores

ρValor (positivo e negativo)	Correlação
0 - 0.19	Bem Fraca
0.20 - 0.39	Fraca
0.40 - 0.69	Moderada
0.70 - 0.89	Forte
0.90 - 1.00	Muito Forte

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na avaliação da contribuição de fontes renováveis de energia (solar, eólica e hídrica) no Brasil, em um período de 10 anos, a própria fonte hídrica se apresenta como a principal contribuinte. No entanto, existem evidências de potencial complementaridade entre as fontes de energia e similaridade às hídricas no período analisado de 10 anos. Considerando a adesão recente de algumas fontes de energia ao SIN, só serão analisados fontes que tenham geração de no mínimo quatro anos no SIN, de modo que possa ser identificado a sazonalidade na geração.

“No Brasil, a hidroeletricidade ainda é a fonte mais utilizada, entretanto a mudança para uma matriz mais baseada em fontes renováveis deve ocorrer, pois o modelo atual tem se mostrado frágil” (MYSZCZUK & SOUZA, 2018, p. 226). Por isso, o planejamento da diversificação da matriz elétrica é vital para a confiabilidade do sistema, ou seja a diversificação na geração de energia entre fontes renováveis é o caminho que o país tem que seguir para garantir a segurança energética, e isso deve ser feito com a máxima integração dos subsistemas. Neste sentido, a eletricidade gerada no Brasil “deverá provir de diversas fontes energéticas, uma vez que, por razões de segurança de abastecimento, é mais fiável depender de vários energéticos primários, do que de apenas um ou dois” (GOLDEMBERG; MOREIRA, 2005, p. 217).

Os resultados do cálculo do coeficiente de correlação de Pearson são apresentados na Tabela 3. Os valores apresentados correspondem à média dos anos em que foi possível a avaliação.

Tabela 3 - Resultado do Coeficiente de Pearson para cada Cenário

Cenários		pmédia	Correlação	
Cenário 1	Hídrica – Região Norte	-0.78	Forte	Complementaridade
	Eólica – Região Nordeste			
Cenário 2	Hídrica – Região Norte	-0.44	Moderada	Complementaridade
	Eólica – Região Sudeste/Centro-oeste			
Cenário 3	Hídrica – Região Norte	-0.65	Moderada	Complementaridade
	Eólica – Região Sul			
Cenário 4	Hídrica – Região Norte	-0.51	Moderada	Complementaridade
	Solar – Região Nordeste			

Tabela 3 - Resultado do Coeficiente de Pearson para cada Cenário (continuação)

Cenários		pmédia	Correlação	
Cenário 5	Hídrica – Região Norte	-0.18	Bem Fraca	Complementaridade
	Solar – Região Sudeste/Centro-oeste			
Cenário 6	Hídrica – Região Norte	0.07	Bem Fraca	Similaridade
	Solar – Região Sul			
Cenário 7	Hídrica – Região Nordeste	0.02	Bem Fraca	Similaridade
	Eólica – Região Sudeste/Centro-oeste			
Cenário 8	Hídrica – Região Nordeste	-0.65	Moderada	Complementaridade
	Eólica – Região Sul			
Cenário 9	Hídrica – Região Nordeste	-0.18	Bem Fraca	Complementaridade
	Solar – Região Sudeste/Centro-oeste			
Cenário 10	Hídrica – Região Nordeste	0.31	Fraca	Similaridade
	Solar – Região Sul			
Cenário 11	Eólica – Região Nordeste	0.19	Bem Fraca	Similaridade
	Solar – Região Sudeste/Centro-oeste			
Cenário 12	Eólica – Região Nordeste	-0.21	Fraca	Complementaridade
	Solar – Região Sul			
Cenário 13	Hídrica – Região Sudeste/Centro-oeste	-0.08	Bem Fraca	Complementaridade
	Eólica – Região Nordeste			
Cenário 14	Hídrica – Região Sudeste/Centro-oeste	-0.19	Bem Fraca	Complementaridade
	Eólica – Região Sul			
Cenário 15	Hídrica – Região Sudeste/Centro-oeste	-0.16	Bem Fraca	Complementaridade
	Solar – Região Nordeste			
Cenário 16	Hídrica – Região Sudeste/Centro-oeste	0.48	Moderada	Similaridade
	Solar – Região Sul			
Cenário 17	Eólica – Região Sudeste/Centro-oeste	0.45	Moderada	Similaridade
	Solar – Região Nordeste			
Cenário 18	Eólica – Região Sudeste/Centro-oeste	0.42	Moderada	Similaridade
	Solar – Região Sul			
Cenário 19	Hídrica – Região Sul	-0.22	Fraca	Complementaridade
	Eólica – Região Nordeste			
Cenário 20	Hídrica – Região Sul	0.50	Moderada	Similaridade
	Eólica – Região Sudeste/Centro-oeste			
Cenário 21	Hídrica – Região Sul	-0.14	Bem Fraca	Complementaridade
	Solar – Região Nordeste			
Cenário 22	Hídrica – Região Sul	0.21	Fraca	Similaridade
	Solar – Região Sudeste/Centro-oeste			

Tabela 3 - Resultado do Coeficiente de Pearson para cada Cenário (continuação)

Cenários		ρ média	Correlação	
Cenário 23	Eólica – Região Sul	0.67	Moderada	Similaridade
	Solar – Região Nordeste			
Cenário 24	Eólica – Região Sul	0.30	Fraca	Similaridade
	Solar – Região Sudeste/Centro-oeste			

Assim, dos vinte e quatro cenários pesquisados, cinco deles (cenários 1, 2, 3, 4 e 8) apresentaram resultados que demonstraram correlação de complementaridade entre as fontes no mínimo moderada, e dois deles (cenários 16 e 20) demonstraram correlação de similaridade à energia hídrica temporalmente.

Os resultados de complementaridade analisados no Cenário 1 (geração hidrelétrica no Norte e a eólica no Nordeste) e apresentados na Figura 1, indicam complementariedade potencial na maioria dos meses do ano, durante o período de 10 anos. A Região Nordeste brasileira possui um enorme potencial eólico a ser explorado, e Simas & Pacca (2013, p.111) afirmam que: “a energia eólica é uma fonte nova no planejamento de ampliação do sistema elétrico brasileiro, apesar do grande potencial de exploração, e um sistema hidroeólico no Brasil pode oferecer energia ambientalmente sustentável e suficiente para suprir a previsão de demanda nas próximas décadas”.

Adicionalmente, houve um significativo aumento da geração eólica em 2015, incentivado pelo PROINFA, como é ressaltado por Caneppele em uma entrevista ao Jornal da USP (2021): “os resultados positivos, com os recordes de produção de energia eólica e fotovoltaica do Nordeste em julho deste ano, são resultado de políticas públicas iniciadas há 20 anos com o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas”.

Os resultados para os anos de 2009 (ρ Valor = -0,86), 2010 (ρ Valor = -0,72), 2011 (ρ Valor = -0,74), 2012 (ρ Valor = -0,80), 2013 (ρ Valor = -0,86), 2015 (ρ Valor = -0,78), 2017 (ρ Valor = -0,89) e 2018 (ρ Valor = -0,83) indicam forte complementaridade potencial entre as fontes. O ano de 2016 (ρ Valor = -0,54) indica uma complementaridade moderada, enquanto o ano de 2014 (ρ Valor = -0,91) apresenta uma complementaridade muito forte. Entende-se que, em geral, o Cenário 1 apresenta forte correlação de complementaridade (ρ média = -0,78).

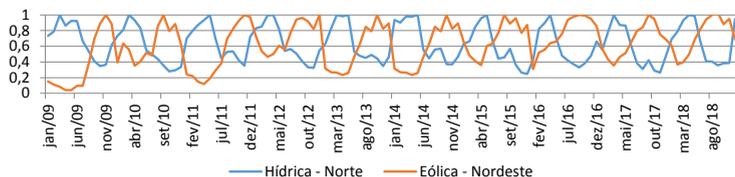


Figura 1 - Cenário 1: Hidrelétrica – Norte & Eólica – Nordeste

Os resultados do Cenário 2 são apresentados na Figura 2, e ele corresponde à comparação entre a geração hidrelétrica na Região Norte e a eólica da Região Sudeste/Centro-Oeste. Os resultados são para o período de quatro anos, uma vez que a geração eólica no Sudeste e Centro-Oeste foi integrada ao SIN, apenas em 2015. Os resultados mostram uma correlação de contrariedade, ou seja, indicam complementariedade. Em 2016 (ρ Valor = -0,19) a correlação é muito fraca, mas em 2015 (ρ Valor = -0,74), 2017 (ρ Valor = -0,80) e 2018 (ρ Valor = -0,73) os resultados indicam correlação moderada. Pela média dos resultados, este cenário apresenta uma correlação de complementariedade moderada (ρ média = -0,44).

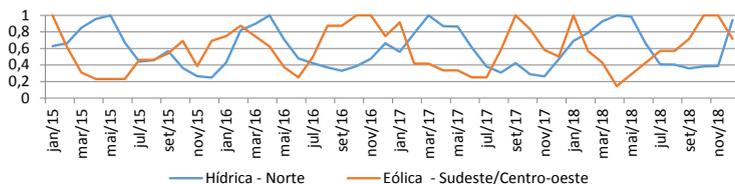


Figura 2 - Cenário 2: Hidrelétrica – Norte & Eólica – Sudeste/Centro-oeste

A Figura 3 mostra resultados do Cenário 3, que compara a geração hidrelétrica no Norte e a eólica no Sul, em um período de 10 anos. Destaca-se aqui o potencial eólico da região Sul que fica apenas atrás da região Nordeste e Sudeste, apresentando potencial estimado de 22,8 GW para vento médio anual igual ou superior a 7,0 m/s; a Região Nordeste apresenta potencial de 75GW e Sudeste com potencial de 29,7 GW (CRESESB, 2001). Os resultados dos anos 2011 (ρ Valor = -0,78),

2012 (ρ Valor = -0,80), 2014 (ρ Valor = -0,79) e 2018 (ρ Valor = -0,81) indicam forte correlação de complementaridade; no entanto, nos anos 2009 (ρ Valor = -0,54), 2010 (ρ Valor = -0,60), 2013 (ρ Valor = -0,61), 2015 (ρ Valor = -0,69) e 2017 (ρ Valor = -0,51) os resultados indicam correlação moderada de complementaridade, enquanto no ano 2016 (ρ Valor = -0,38) o resultado é de baixa correlação de complementaridade. Em geral, a indicação baseada no histórico de 10 anos é que as fontes podem se complementar moderadamente (ρ média = -0,65).

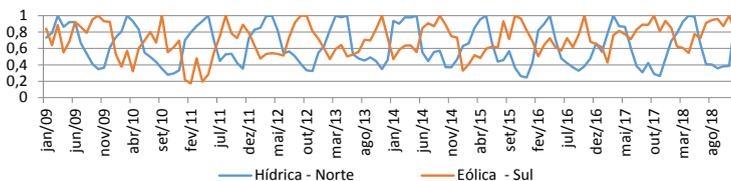


Figura 3 - Cenário 3: Hidrelétrica – Norte & Eólica – Sul

O Cenário 4 explora a relação entre a geração hidrelétrica na Região Norte e a solar na Região Nordeste, e só foi possível analisar os dados a partir de 2015, quando a energia solar foi integrada ao SIN. Resultados são mostrados na Figura 4. No período houve significativa variabilidade da geração solar na Região Nordeste, e isso se reflete nos resultados. No ano de 2016 (ρ Valor = -0,05) a correlação é muito fraca, porém em 2018 (ρ Valor = -0,44) a correlação é moderada, e em 2015 (ρ Valor = -0,77) e em 2017 (ρ Valor = -0,78) as correlações são fortes. Dos resultados da análise da série histórica relativamente curta, conclui-se que potencialmente a correlação entre as duas alternativas de geração é moderada (ρ média = -0,51).

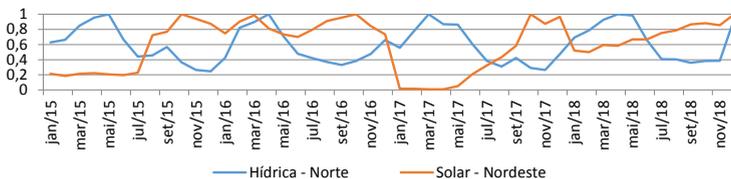


Figura 4 - Cenário 4: Hidrelétrica – Norte & Solar – Nordeste

No caso do Cenário 8, foi possível realizar a análise ao longo de todo o período de 10 anos. A Figura 5 mostra os resultados que indicam a complementaridade temporal, potencial, entre as fontes hidrelétrica e eólica, respectivamente nas regiões Nordeste e Sul do Brasil. O ano de 2016 (ρ Valor = -0,60) indica uma complementaridade fraca, enquanto para os anos de 2010 (ρ Valor = -0,60), 2013 (ρ Valor = -0,61), 2015 (ρ Valor = -0,69) e 2017 (ρ Valor = -0,51) as correlações indicam complementaridade moderada. Já para 2011 (ρ Valor = -0,78), 2012 (ρ Valor = -0,80), 2014 (ρ Valor = -0,79) e 2018 (ρ Valor = -0,81) os resultados indicam forte correlação de complementaridade. No período, os resultados da comparação feita no Cenário 8 mostram uma potencial complementaridade moderada (ρ média = -0,65).

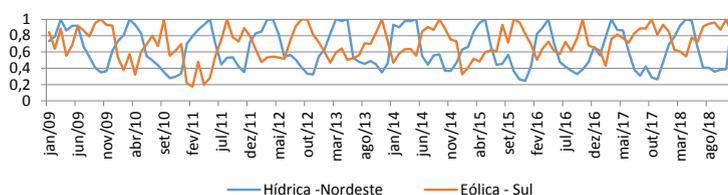


Figura 5 - Cenário 8: Hidrelétrica – Nordeste & Eólica – Sul

O Cenário 16, cujos resultados são mostrados na Figura 6, permitiu a análise da geração hidrelétrica no Sudeste/Centro-Oeste e solar no Sul, ao longo de quatro anos, pelo fato da geração solar no Sul ter sido integrada ao SIN somente a partir de 2015. Neste cenário há correlação de similaridade em todos os anos analisados; na média anual a correlação é muito fraca em 2016 (ρ Valor = 0,07), fraca em 2015 (ρ Valor = 0,39), moderada em 2017 (ρ Valor = 0,59), e forte em 2018 (ρ Valor = 0,86). Assim, este cenário não indica complementaridade, mas sim similaridade moderada entre as duas alternativas de geração (ρ média = 0,48).

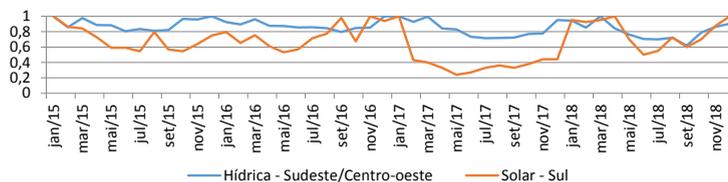


Figura 6 - Cenário 16: Hidrelétrica – Sudeste/Centro-oeste & Solar – Sul

No Cenário 20 o que é explorado é a possível integração da geração eólica na região Sudeste/Centro-Oeste com a geração hidrelétrica na região Sul, e isso só foi possível com a análise de dados a partir de 2015 (quatro anos). Os resultados são apresentados na Figura 7, e no Cenário 20 não há correlação de complementaridade. Em 2015 (ρ Valor = 0,83) e 2018 (ρ Valor = 0,81) a correlação de similaridade é forte, mas no ano de 2016 (ρ Valor = 0,21) a correlação de similaridade é baixa, enquanto em 2017 (ρ Valor = 0,14) a correlação de similaridade é muito fraca. Assim, a conclusão é que no Cenário 20 há correlação de similaridade moderada entre as alternativas de geração analisadas (ρ média = 0,50).

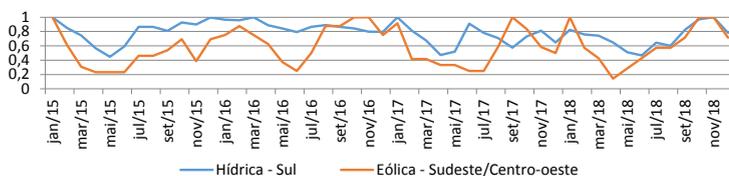


Figura 7 - Cenário 20: Hidrelétrica –Sul & Eólica – Sudeste/Centro-oeste

Assim, a pesquisa demonstrou que os Cenários 01, 02, 03, 04 e 08 apresentam razoável complementaridade temporal, sendo eles, respectivamente: Hidrelétrica - Norte e Eólica - Nordeste; Hidrelétrica - Norte e Eólica - Sudeste/Centro-Oeste; Hidrelétrica - Norte e Eólica - Sul; Hidrelétrica - Norte e Solar - Nordeste; Hidrelétrica - Nordeste e Eólica - Sul.

Entende-se, então, que os cenários que indicam o potencial de complementaridade às fontes hídricas (principalmente na Região Norte) demonstram que o Brasil pode otimizar o uso dos reservatórios, minimizando os riscos dos períodos de estiagem. Além disso, esses resultados demonstram que a geração eólica deve ser mais explorada nas regiões Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste e Sul, em parte porque há complementaridade com a hidrelétrica e, também, porque o aproveitamento da eólica ainda não atingiu a metade do potencial de geração. Esse potencial é estimado em cerca de 500 GW, segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), suficiente para atender o triplo da demanda atual de energia no Brasil (ZAPAROLLI, 2019).

Em relação ao resultado apontado no Cenário 4, que mostra a complementaridade entre a geração hidrelétrica na região Norte e a

geração solar na região Nordeste, é importante ressaltar que o Nordeste tem o maior potencial de energia solar em relação às demais regiões, pois possui um maior nível de irradiância no plano inclinado (média anual de 5,52 kWh/m²/dia) e menor variabilidade interanual durante o ano (PEREIRA et al., 2017 apud. BEZERRA, 2018, p. 11), sendo esses indicativos do potencial a ser explorado na matriz energética.

Os resultados obtidos apontam correlações de similaridade moderada com a geração hidrelétrica, no Cenário 16: Hidrelétrica - Sudeste/Centro-Oeste e Solar - Sul, e no Cenário 20: Hidrelétrica - Sul e Eólica - Sudeste/Centro-Oeste. A razoável similaridade indica a possibilidade de gerenciamento dos reservatórios das hidrelétricas, em anos secos, com maior geração das fontes indicadas nos dois cenários.

Os Cenários 16 e 20 são muito interessantes porque as fontes hídricas no Sudeste e Sul já se encontram quase totalmente esgotadas, e a fonte solar na Região Sul se apresenta como uma opção alternativa para a diversificação da matriz. Entende-se que a região Sul possui boa capacidade de geração de energia solar, embora seja a mais distante do Equador. “No entanto, a maioria da população brasileira e as atividades socioeconômicas do país estão localizadas em regiões mais distantes do Equador. [...] Desta forma, para maximizar o aproveitamento da radiação solar, pode-se ajustar a posição do coletor ou painel solar de acordo com a latitude local e o período do ano em que é necessária mais energia” (ANEEL, 2002, p. 7).

4. CONCLUSÃO

A extensão territorial brasileira e sua diversidade climática permitem explorar um significativo potencial de complementaridade entre as fontes renováveis de energia, dada a sua variabilidade sazonal entre as regiões. Nesta pesquisa, o coeficiente de Pearson foi utilizado para identificar potenciais cenários de complementaridade e similaridade com a geração hidrelétrica. Apenas os cenários que apresentaram pelo menos uma correlação moderada foram analisados.

Nos cenários 01, 02, 03, 04 e 08 foram identificadas potencial complementariedade com a geração hidrelétrica. São eles: Hidrelétrica - Norte e Eólica - Nordeste; Hidrelétrica - Norte e Eólica - Sudeste / Centro-Oeste; Hidrelétrica - Norte e Eólica - Sul; Hidrelétrica - Norte e Solar - Nordeste; Hidrelétrica - Nordeste e Eólica - Sul. Adicionalmente, os cenários 16 e 20 apresentaram correlação de similaridade com a geração hidrelétrica; são eles: Hidrelétrica - Sudeste/Centro-Oeste e Solar - Sul e Hidrelétrica - Sul e Eólica - Sudeste/Centro-Oeste.

Os resultados mostram que é possível diversificar a geração de energia elétrica e garantir a segurança de suprimento no Brasil, re-

duzindo a dependência da fonte hídrica. Este trabalho, objetivou contribuir com os estudos sobre a expansão do setor elétrico brasileiro, em escala macro, por meio de dados de geração nos últimos anos, identificando a potencial sinergia entre a geração hidrelétrica e as fontes alternativas eólica e solar fotovoltaica.

Nessa pesquisa, foram identificadas algumas limitações, devido à falta de dados de algumas fontes ou período de geração insuficiente para análise. Ressalta-se também que a metodologia utilizada avaliou apenas correlações sobre os dados da geração disponibilizadas pela ONS. No entanto, esse fato não afetou o objetivo final da pesquisa, e sugere-se dar continuidade a mesma, incorporando as fontes e locais de geração suprimidos nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Atlas de energia elétrica do Brasil. 1ª edição. Brasília, 2002. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/livro_atlas.pdf>. Acesso em: may. 2020.

BEZERRA, F. D. Nordeste: Futuro promissor para energia solar. Caderno Setorial ETENE; ano 3, nº31; maio/2018. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/documents/80223/3365127/solar_31-2018-FINAL.pdf/2c59b789-02ee-9a5a-3d8c-e5b95a0e3cb7>. Acesso em: may. 2019.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO - CRESESB. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, Brasília 2001. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf>. Acesso em: may. 2019.

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY – CIA. The World Factbook - South America: Brazil. Disponível em: <<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/br.html>>. Acesso em: may. 2020.

GOLDEMBERG, J. Energia e Sustentabilidade. Revista Cultura e Extensão USP, v.14, p.33-43, 30 nov. 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2316-9060.v14i0p33-43>

GOLDEMBERG, J. & MOREIRA, J.R. Política energética no Brasil. Estudos Avançados, v.19, n.55, p.215-228, set./dez. 2005. doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142005000300015>

HUNT, J.D.; STIPEN, D.; FREITAS, M.A.V. A review of the causes, impacts and solutions for electricity supply crises in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.88, p.208-222, mai. 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.030>

JORNAL DA USP. Recorde de produção de energia limpa do Nordeste não pode beneficiar outras regiões do País; Publicado: 27/08/2021. Available in: <https://jornal.usp.br/?p=448263>. Acesso em: sep. 2021.

LATRUBESSE, E.M.; ARIMA, E.Y.; DUNNE, T.; PARK, E.; BARKER, V.R.; D'HORTA, F.M.; WIGHT, C.; WITTMANN, F.; ZUANON, J.; BARKER, P.; RIBAS, C.C.; NORGAARD, R.B.; FILLIZOLA, N.; ANSAR, A.; FLYYBIERG, B.; STEVAUX, J.C. Damming the rivers of the Amazon basin. *Nature*, v.546, p.363–369, 15 jun. 2017. doi: <https://doi.org/10.1038/nature22333>

MYSZCZUK, A. & SOUZA, A. O Setor Elétrico Brasileiro e Alguns Conflitos Entre as Políticas Públicas de Proteção ao Meio Ambiente e de Desenvolvimento Econômico. *Desenvolvimento em Questão*, v.16, n.43, p.200-233, 22 mai. 2018. doi: <https://doi.org/10.21527/2237-6453.2018.43.200-233>

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. Geração de Energia. Disponível em: http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx. Acesso em: may. 2020.

PERON, A.M. Análise da complementaridade das gerações intermitentes no planejamento da operação eletro-energética da região nordeste brasileira. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil na área de Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2017. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/330465>. Acesso em: may. 2020.

QUEIROZ, R.; GRASSIL, P.; LAZZARE, K.; KOPPE, E.; TARTAS, B.R.; KEMERICH, P.D.C. Geração de energia elétrica através da energia hidráulica e seus impactos ambientais. *Revista Eletrônica em Gestão - REGET, Educação e Tecnologia Ambiental*, v.13, n.13, p.2774-2784, mai./ago. 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.5902/223611709124>

ROCHA, V.M.; CORREIA, F.W.S.; FIALHO, E.S. A Amazônia frente às mudanças no uso da terra e no clima global e a importância das áreas protegidas na mitigação dos impactos: Um estudo de modelagem numérica da atmosfera. *ACTA Geográfica*, p.31-48, jul. 2012. doi: [10.5654/actageo2012.0002.0002](https://doi.org/10.5654/actageo2012.0002.0002)

SIMAS, M.S. & PACCA, S. Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável. *Estudos Avançados*, v.27, n.77, p.99-115, abr. 2013. doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142013000100008>

SINIMBU, F. Energias renováveis e eficiência energética são metas para o Brasil. EBC - Agência Brasil, Brasília, 15 jun. 2017. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/pesquisa-e-inovacao/noticia/2017-06/energias-renovaveis-e-eficiencia-energetica-sao-metas-para-o>>. Acesso em: may. 2020.

ZAPAROLLI, D. Ventos promissores a caminho. *Revista Pesquisa FAPESP*, São Paulo, edição 275, jan. 2019. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/2019/01/10/ventos-promissores-a-caminho/>>. Acesso em: may. 2020.