

## XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### **ANÁLISE DA COMPLEMENTARIDADE ENERGÉTICA HIDROEÓLICA: UM ESTUDO DE CASO**

*Izadora Cintra Soloaga<sup>1</sup>; Daniel Henrique Marco Detzel<sup>2</sup>*

**RESUMO** – O Brasil é um país que se destaca pelo seu grande potencial hidráulico, fato comprovado pela vasta rede de bacias hidrográficas e centenas de empreendimentos de geração de energia hidrelétrica. Porém, também é importante levar em conta o potencial de outras fontes renováveis no país, como a eólica. Em algumas regiões do território nacional, como o Nordeste do país, essa alternativa tem sido bastante explorada nos últimos anos. Com isso, das possibilidades de melhor aproveitamento da energia para atender as demandas da rede, uma delas é a complementaridade das fontes. Este trabalho refere-se ao estudo da complementaridade entre as energias eólica (Parque Eólico Mel 02) e hidráulica (Pequena Central Hidrelétrica Lagoa Grande), por meio da análise das energias médias geradas e usando como referência a garantia física de cada empreendimento. Foi confirmada a complementaridade dos empreendimentos entre os meses de agosto a novembro, com atingimento de 79% da demanda da PCH pelas médias de energias geradas em todo o período estudado. Assegura-se, assim, o atendimento à garantia física da pequena central hidrelétrica em grande parte dos meses analisados.

**ABSTRACT** - Brazil is a country that stands out for its great hydraulic potential, proven by the vast network of river basins and hundreds of hydroelectric power generation projects. However, it is also important to take into account the potential of other renewable sources in the country, such as wind. In some regions of the national territory, as the Northeast region, this alternative has been widely explored in recent years. With this, we analyze the possibilities of better use of energy to meet the demands of the network, considering the complementarity of sources. This work refers to the study of the complementarity between wind (Wind Farm Mel 02) and hydraulic (Small Hydroelectric Plant Lagoa Grande) energies by analyzing the generated average energies with limited values to the physical guarantee of each plant. We confirmed the complementarity of the plants between August and November, with 79% of the demand of PCH met by the averages of energies generated throughout the period studied. Thus, the fulfillment of the physical guarantee of the small hydroelectric plant was secured in most of the analyzed months.

**Palavras-Chave** – Energia hidráulica. Energia eólica. Complementaridade.

### **INTRODUÇÃO**

As usinas hidrelétricas são as maiores geradoras de energia do Brasil, decorrente da vasta oferta de recursos hídricos existente e o incentivo dessa geração no histórico do país. Atualmente, essa fonte sustenta 63% da demanda da rede (EPE, 2021), contudo, apesar dessa atual grande oferta de energia

---

1) Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA), UFPR, (41) 99709-1906, izadorasoloaga@gmail.com

2) Professor permanente no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA), UFPR, (41) 99222-9109, detzel@ufpr.br

provinha de centrais hidrelétricas, ela precisa ser complementada por outras fontes que mostram uma participação crescente na matriz de geração de energia do país.

O aumento da demanda proporciona a exploração de fontes alternativas de energia, preferencialmente as renováveis, para complementar o potencial já existente. As diferenças geográficas e climáticas do Brasil contribuem para o aproveitamento dessas fontes, sendo uma delas, a eólica. Essa fonte de energia provinda dos ventos alcançou um crescimento de 78% entre 2014 e 2015 (EPE, 2016) e até 2019 representava 9% de toda a produção de energia no Brasil (EPE, 2021).

Os ventos em alguns estados do Brasil, principalmente os da região Nordeste, têm intensidade e constância favoráveis para a produção elétrica. Isso faz com que a utilização dos parques eólicos nacionais seja eficiente, com alto rendimento (38%) em comparação com a média mundial (LOSEKANN; HALLACK, 2018).

A complementaridade das energias hidráulica e eólica pode ser alcançada de várias formas. Entre elas pode-se destacar, por exemplo, a possibilidade de se aumentar os níveis de reservatórios em épocas de pico de vento. Assim, além de atender a demanda a partir da produção de energia eólica, é possível estocar água nos reservatórios para distribuição de energia em épocas de seca (CUERVO; BOTERO, 2016).

No presente trabalho, a complementariedade entre as energias hidrelétrica e eólica foi investigada. Para a análise da complementariedade, escolheu-se uma pequena central hidrelétrica (PCH) e um parque eólico (EOL) de potência outorgada de ordem similar, por volta dos 20 a 25 MW. Devido a esta premissa, optou-se por escolher a PCH Lagoa Grande, que opera no estado do Tocantins, com grande proximidade ao Nordeste brasileiro e que poderia atender a análise em termos de potência outorgada. O parque eólico escolhido foi Mel 02.

O propósito desse estudo é utilizar os dados de cada usina e modelos matemáticos para comprovar a complementariedade entre as energias geradas pela PCH Lagoa Grande e a EOL Mel 02. Como premissa, as análises foram feitas de modo a garantir o atendimento da Garantia Física da PCH, contando com a complementariedade da energia eólica.

## MÉTODOS

### Características PCH Lagoa Grande

A PCH Lagoa Grande está localizada no rio Palmeiras, estado do Tocantins, entre os municípios de Dianópolis e Ponte Alta do Bom Jesus. Está situada sob classificação da ELETROBRAS (2003) na região da sub bacia 21, Rio Tocantins, Paranã, Palma e Outros e possui instaladas três unidades geradoras com potência total de 25 MW e área alagada de 11,63 km<sup>2</sup>.

Uma característica climática importante da microrregião em que está inserida a PCH é o período seco de maio a setembro, apresentando baixa umidade relativa do ar (MMA, 2006). Situação essa que potencializa o estudo de complementariedade para cumprimento da demanda no período de escassez energética.

### Características EOL Mel 02

O Parque Eólico Mel 02 está localizado no município de Areia Branca, no Rio Grande do Norte. Este Estado apresenta em sua matriz 83% de abastecimento energético pela fonte de energia eólica (ANEEL, 2021). O parque contém 10 aerogeradores de 90 metros de altura, do modelo GAMESA G90/2000. Cada aerogerador com potência de geração na ordem dos 2 MW (NEOENERGIA, 2021), totalizando assim 20 MW de potência outorgada, muito próximo à potência da PCH Lagoa Grande.

Devido à baixa precipitação durante parte do ano, essa região do semiárido tem constância nos ventos por estar localizada na faixa litorânea, atingindo velocidades ideais para geração eólica (DINIZ; PEREIRA, 2015).

A partir do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE et al., 2001) é possível encontrar valores da região proposta que são de extrema importância para o estudo. Parâmetros como rugosidade ( $z_0$ ) de 0,15 m e fator de forma adimensional ( $k$ ) de 3, quais são essenciais para cálculo da distribuição de probabilidade de Weibull utilizada neste trabalho e detalhada em item específico.

### Dados iniciais para desenvolvimento do estudo

Para esse trabalho foi necessário o cálculo de energia gerada para a PCH e a EOL, além das garantias físicas para cada uma. Dessa maneira foram utilizados os seguintes dados como base para os cálculos necessários:

- Série de velocidade do vento do posto de medição de São João (RN) entre os anos de 1994 e 2006. As informações foram obtidas do modelo climatológico global *Weather Research and Forecasting* (WRF – SKAMAROCK et al., 2008), com reanálise feita pelo sistema *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR – SAHA et al., 2010). Portanto, as medições não são diretas, mas provém de modelos matemáticos. Essas séries foram disponibilizadas pela Companhia Paranaense de Energia (Copel), a qual adquiriu os dados da empresa Vortex. Considerando os mínimos erros possíveis dos modelos, são os mais seguros para esta análise (DETZEL et al., 2016), pois não foram localizados dados de medição in loco.
- Curva de potência do aerogerador GAMESA G90/2000 obtido em Suisse Éole (2019).
- Série de vazões e dados de inventário da PCH Lagoa Grande, a qual foi obtida diretamente do Despacho de Aprovação do Projeto Básico da usina (ANEEL, 2008) para os anos de 1971 a 2006.

Devido à diferença entre os períodos de dados disponíveis de séries de vazões e de velocidade de vento, para fins de cálculo neste trabalho, optou-se pelo intervalo coincidente de dados dos dois empreendimentos, entre 1994 a 2006 (13 anos).

### Cálculo de Energia média gerada pela PCH Lagoa Grande

Foram calculadas as energias geradas mensalmente pela PCH Lagoa Grande nos treze anos de análise. Para atingir os valores, foi considerada a conversão de energia potencial da água em energia elétrica (Equação 1) de acordo com a série de vazões disponível para análise.

$$P = \eta \cdot g \cdot Q_t \cdot H_L \quad (1)$$

Sendo  $P$  a potência gerada na usina em kW,  $\eta$  o rendimento do conjunto turbina/gerador,  $g$  a constante gravitacional,  $Q_t$  a vazão turbinada pela usina em  $m^3/s$  e  $H_L$  a queda líquida em metros, esta última representada pela diferença entre os níveis de reservatório e do canal de fuga, descontada da perda de carga do circuito hidráulico.

Com o valor de energia gerada para cada mês do período determinado, foi feita a média geral para análise de comportamento anual da PCH.

## Cálculo da Garantia Física para PCH

Segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE, 2016), a Garantia Física (GF) define a quantidade máxima que um equipamento de geração de energia pode comercializar. Pode-se admitir, assim, a GF como demanda a ser atingida pela complementaridade.

Conforme a Portaria nº 463/2009 do Ministério de Minas e Energia (MME, 2009) a garantia física de Pequenas Centrais Hidrelétricas é calculada pela Equação 2.

$$GF = \left( \sum_{i=1}^n \min\{[Q_i - (q_r - q_u)] \cdot 9,81 \cdot H_L \cdot \eta, P\} \right) \cdot (1 - \lambda_{con}) \cdot (1 - TEIF) \cdot (1 - IP) \cdot \frac{1}{1000n} - C_{int} \quad (2)$$

Sendo  $n$  o tamanho da série histórica,  $Q_i$  a vazão observada no mês  $i$ ,  $q_r$  a vazão remanescente da usina ( $m^3/s$ ),  $q_u$  a vazão de usos consuntivos ( $m^3/s$ ),  $H_L$  a queda líquida da PCH em metros,  $\eta$  o rendimento do conjunto turbina-gerador,  $P$  a potência do aproveitamento (kW),  $\lambda_{con}$  as perdas elétricas até o ponto de conexão (%),  $TEIF$  a taxa de indisponibilidade forçada,  $IP$  a taxa de indisponibilidade programada e  $C_{int}$  o consumo interno na usina (MW médio).

## Cálculo de Energia média gerada pela EOL Mel 02

Inicialmente é necessário salientar a falta de dados de velocidade de vento a certas alturas, rara disponibilidade de informação e poucos postos de medição no Brasil, principalmente em Areia Branca (RN). Assim, foi necessário escolher um posto de medição (São João) próximo ao local de estudo, em São Bento do Norte (RN).

Para início da análise de energia gerada no parque eólico, uma opção muito utilizada é aplicar a Distribuição de Weibull (Equação 3) e calcular o valor da potência acumulada para cada velocidade. Com a velocidade média para cada mês ( $\alpha$ ), fator de forma ( $\beta$ ) e a velocidade do vento ( $x$ ) é possível chegar ao valor de probabilidade de ocorrência ( $F$ ) em cada estágio da velocidade.

$$F_x(x; \alpha; \beta) = 1 - e^{-(x/\beta)^\alpha} \quad (3)$$

Com o valor da potência acumulada é possível calcular o fator de capacidade do aerogerador (Equação 4), que retornará um valor adimensional representando a potência média gerada pela turbina num intervalo de tempo.

$$F_C = \frac{E}{P \cdot t} \quad (4)$$

Sendo  $F_C$  o Fator de capacidade,  $E$  a energia gerada em um intervalo de tempo  $t$  (kWh),  $P$  a potência nominal do aerogerador (kW) e  $t$  o intervalo de tempo considerado (no caso, um mês).

Com o fator de capacidade definido, multiplica-se diretamente pelo número de aerogeradores e têm-se o valor de geração médio do parque eólico. Este procedimento repetiu-se para cada mês dos treze anos estudados, a fim de alcançar uma curva de geração média anual para o parque eólico.

## Cálculo da Garantia Física para EOL

A Equação 5 descreve o método de cálculo da GF das usinas eólicas, de acordo com o método descrito na Nota Técnica 072/2013, publicada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2013).

$$GF = \frac{P90_{ac} \cdot (1 - TEIF) \cdot (1 - IP) - \Delta P}{8760} \quad (5)$$

Sendo  $P90_{ac}$  a produção anual de energia equivalente ou superada com 90% de probabilidade de ocorrência (MW),  $TEIF$  a Taxa de indisponibilidade forçada (%),  $IP$  a taxa de indisponibilidade programa (%),  $\Delta P$  a soma entre consumo interno e as perdas até o ponto de conexão (MWh/ano). Esse último valor foi desconsiderado pela insuficiência de dados.

Como o valor  $P90_{ac}$  é uma estimativa futura, a EPE recomenda que o cálculo do valor seja feito pela Equação 6 (EPE, 2013).

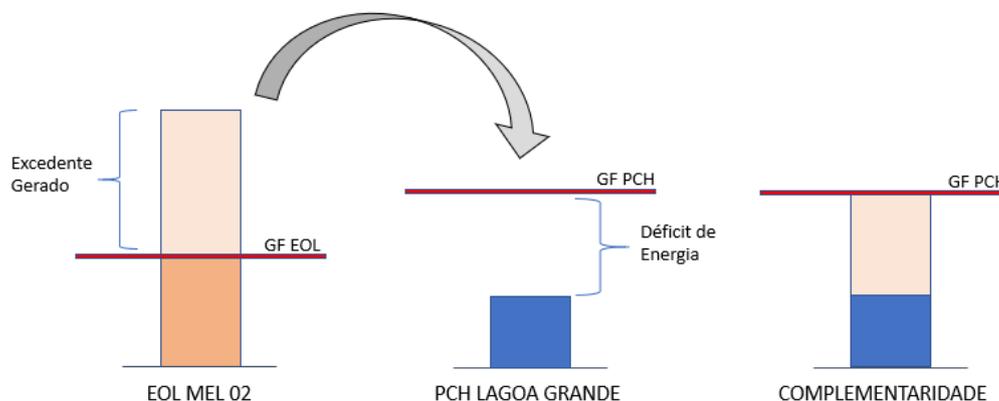
$$P90_{ac} = P50_{ac} \cdot \left[ 1 - \left( 1,2855 \cdot \frac{\sigma}{100} \right) \right] \quad (6)$$

Sendo  $P50_{ac}$  a mediana da série anual de energia (MW) e  $\sigma$  a incerteza padrão (%). Fazendo-se o uso das mesmas premissas do estudo de Santo et al. (2010), para esse trabalho foram adotados os valores de  $TEIF$  de 1%,  $IP$  de 2,5% e  $\sigma$  de 14%.

### Transferência de energia da EOL para PCH

A complementaridade analisada neste trabalho admite como premissa a PCH ser o empreendimento principal, recebendo energia no caso de produção excedente por parte da usina eólica. Dessa maneira, somente após o atingimento da própria garantia física pela EOL, poderá ocorrer transferência de energia para a PCH, como demonstrado na Figura 1.

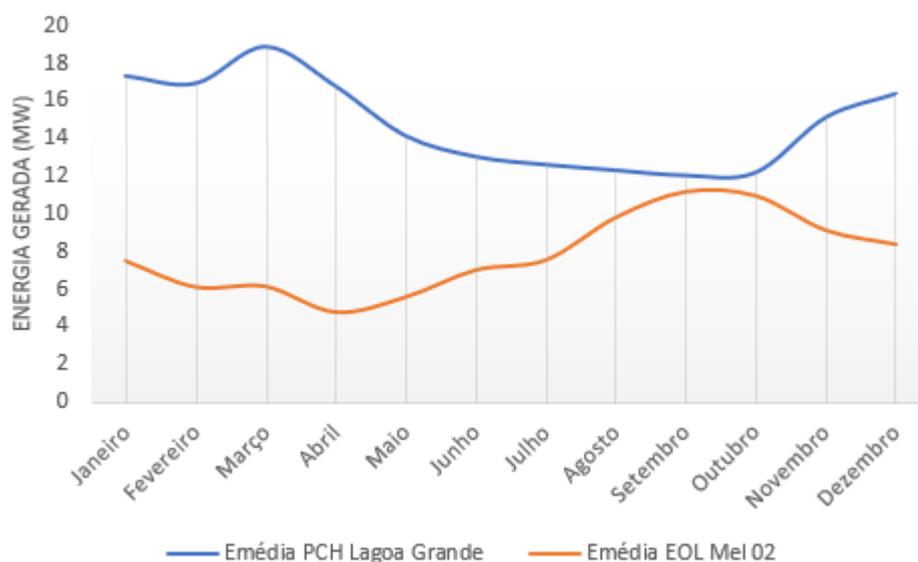
Figura 1 – Esquema representativo da transferência de energia entre as usinas consideradas.



## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos métodos de cálculo evidenciados é possível obter os valores de médias mensais de energia gerada para cada empreendimento, PCH Lagoa Grande e EOL Mel 02 representados na Figura 2.

Figura 2 – Energias médias mensais geradas pela PCH Lagoa Grande e EOL Mel 02

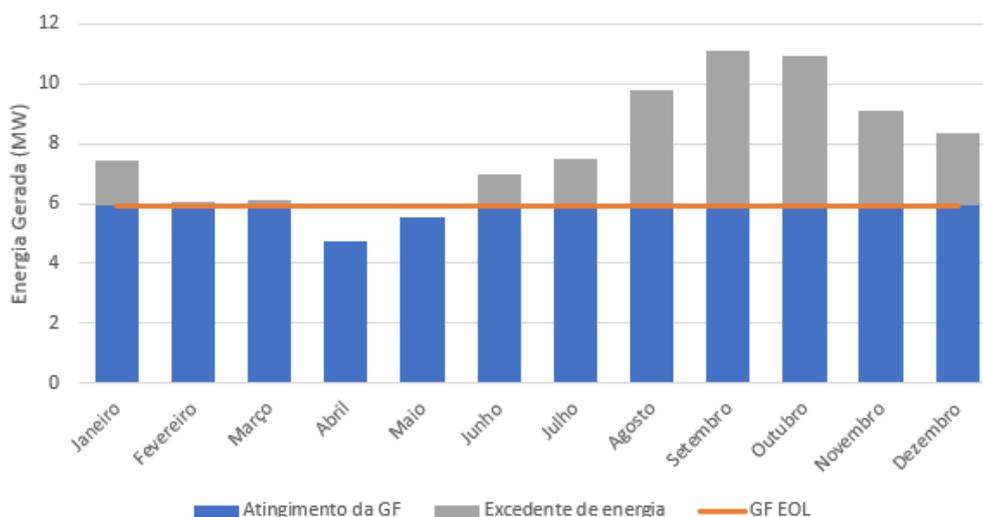


Conforme as curvas de geração apresentadas no gráfico, os empreendimentos apresentam picos de geração não coincidentes, principalmente nos meses de julho a novembro. Este tipo de característica evidencia a possibilidade de uma complementaridade entre as fontes.

Em relação às garantias físicas, os valores calculados para a PCH e para a EOL estudadas foram 14,44 MWmédio e 5,92 MWmédio, respectivamente.

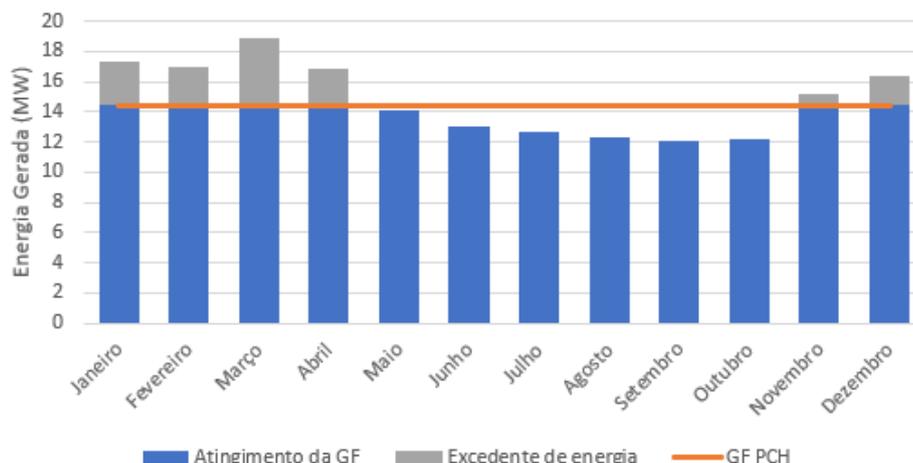
A garantia física para usinas eólicas apresenta valor inferior justamente pelo fato de o vento ser um elemento de difícil aproveitamento, principalmente pelas inconstâncias de velocidade durante o dia. A partir dos resultados de geração de energia para cada empreendimento e garantia física para o período estudado, é possível cruzar os gráficos e verificar a complementaridade das fontes. O excedente de energia eólica pode ser verificado na Figura 3.

Figura 3 – Excedente de energia eólica com potencial de uso pela PCH.



Conforme o gráfico há excedente em praticamente todo o período de estudo, apresentando déficit de energia apenas nos meses de abril e maio. Considerando esse comportamento da curva de geração, é viável realizar a transferência de energia da EOL para a PCH. A geração de energia da PCH em comparação com sua garantia física apresenta períodos maiores de escassez do que a EOL, como é demonstrado na Figura 4.

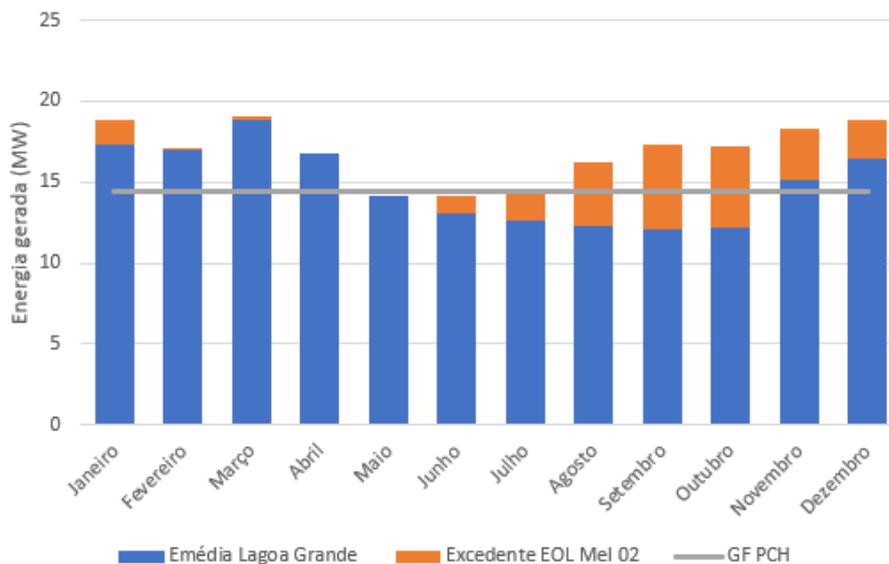
Figura 4 – Excedente de energia hidráulica da PCH.



De acordo com o gráfico, o período de déficit energético da PCH Lagoa Grande corresponde aos meses de maio a novembro, intensificando a necessidade de complementaridade energética para o período evidenciado.

Sendo assim, o resultado da complementaridade é mostrado pela Figura 5, qual associa a geração de energia média da PCH Lagoa Grande com o excedente energético da EOL Mel 02 tendo como parâmetro base a GF da PCH.

Figura 5 – Complementaridade entre a PCH Lagoa Grande e a EOL Mel 02.



## CONCLUSÕES

O Brasil observa uma fase crescente de desenvolvimento tecnológico e socioeconômico. Para garantir que essa grande demanda energética será atendida futuramente, é preciso estudar formas de complementaridade de fontes e preferencialmente investir em energias renováveis. Neste trabalho, apresentou-se um estudo de complementaridade energética entre a PCH Lagoa Grande e a EOL Mel 02. Adotou-se a garantia física como uma meta de geração energética para os empreendimentos. Sendo assim, com o atingimento desse parâmetro, é possível avaliar a possibilidade de transferência energética de forma a complementar o déficit de energia não gerada por outro empreendimento.

O estudo permitiu concluir que há complementaridade entre as fontes dos meses de julho a novembro. Dessa forma, assegurou-se o atingimento da GF da PCH durante boa parte dos meses dos 13 anos analisados, diminuindo cerca de 65% do déficit energético da PCH.

Entende-se que uma análise mais detalhada e ampla da complementaridade em questão é fator imprescindível para estudos mais aprofundados sobre o tema, não apenas considerando energia hidráulica e eólica, mas também levando em conta a complementaridade de outras fontes renováveis a fim de atender a demanda da rede.

## REFERÊNCIAS

AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L (2001). *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. Brasília.

ANEEL (2008). Despacho no 3.119 de 21 de agosto de 2008., p. 2.

ANEEL (2021). *SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL*. Disponível em: <<https://bit.ly/2IGf4Q0>>. Acesso em: 30/05/2021.

CCEE (2016). *Regras de Comercialização - Garantia Física.*, pp. 1–73.

CUERVO, F. I.; BOTERO, S. B. (2016). *Wind power reliability valuation in a Hydro-Dominated power market: The Colombian case*. Elsevier Ltd. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Maio 2016, 1., pp. 1359-1372.

DETZEL, D. H. M.; MEDEIROS, L. DE (2016). *Seleção Inteligente de Portfólios de Projetos Eólicos e de Pequenas Centrais Hidrelétricas*.

DINIZ, M. T. M.; PEREIRA, V. H. C (2015). *Climatologia do estado do Rio Grande do Norte, Brasil: sistemas atmosféricos atuantes e mapeamento de tipos de clima*. *Boletim Goiano de Geografia*, v. 35, núm. 3, pp. 488-506.

ELETROBRAS (2003). *Sistema de informação do potencial hidrelétrico brasileiro - SIPOT*. Rio de Janeiro.

EPE (2013). *Cálculo da Garantia Física de Empreendimentos Eólicos considerando o P90*. Nota Técnica nº EPE-DEE-NT-072/2013-r0. Brasília: EPE.

EPE (2016). *Relatório Síntese*. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-126/topico-92/Relat%C3%B3rio\\_S%C3%ADntese\\_2016.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-126/topico-92/Relat%C3%B3rio_S%C3%ADntese_2016.pdf)>. Acesso em: 30/05/2021.

EPE (2021). *Anuário estatístico de energia elétrica 2021*. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/EPEFactSheetAnuario2021.pdf>>. Acesso em: 30/05/2021.

LOSEKANN, L. D.; HALLACK, M. (2018). *Novas energias renováveis no Brasil: desafios e oportunidades*. Disponível em: <<https://observatoriodaenergia.files.wordpress.com/2020/07/novas-energias-renovaveis-no-brasil-desafios-e-oportunidades.pdf>>. Acesso em: 30/05/2021.

MMA (2006). *Caderno da Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia*.

MME (2009). *Portaria MME nº 463 de 03/12/2009*.

NEOENERGIA (2021). *Parque eólico Mel II*. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/pt-br/sobre-nos/linhas-de-negocios/renovaveis/renovaveis-eolica/Paginas/mel-II.aspx>>. Acesso em: 30/05/2021.

SAHA, S. ET AL. (2010). *The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. Bulletin of the American Society*, v. 91, pp. 1015–1057.

SKAMAROCK, W. C. ET AL. (2008). *Description of the Advanced Research WRF Version 3*”, *NCAR Technical Note 475+STR*. Boulder: National Center for Atmospheric Research.

SUISSE ÉOLE (2019). *GAMESA G90/2000*. Disponível em: <[https://www.thewindpower.net/turbine\\_en\\_47\\_gamesa\\_g90-2000.php](https://www.thewindpower.net/turbine_en_47_gamesa_g90-2000.php)>. Acesso em: 12/11/2019.