

## RIO SÃO FRANCISCO E A ENERGIA DOS VENTOS

Sérgio Montenegro Fernandes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - Chesf*

DOI: 10.47168/rbe.v28i4.770

### RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar as mudanças ocorridas na matriz elétrica da Região Nordeste. Essas alterações na matriz estão relacionadas diretamente a inserção em larga escala da geração eólica, superando o potencial instalado de geração hidroelétrica na região. A participação predominante das Energias Renováveis Variáveis (ERV) tem gerado um grande desafio para a operação do sistema elétrico da região. O principal desafio é em função da sua alta variabilidade, incontornabilidade e difícil previsibilidade, que afeta a operação de todo sistema. Os resultados observados nos últimos anos, na região, demonstram a forte sinergia entre essas fontes de energia renováveis (Eólica e Hidráulica). No entanto, a integração entre estas fontes de energia altera o modo de operação das usinas hidrelétricas.

Palavras-chave: Flexibilidade; Armazenamento; Variabilidade; Sinergia.

### ABSTRACT

The aim of this paper is to present the changes that have occurred in the electrical matrix of the Northeast Region. The changes in the matrix are directly related to the large-scale insertion of wind electricity, surpassing the installed potential of hydroelectric generation in the region. The predominant participation of Variable Renewable Energies (VRE) has posed a major challenge to the electric system operation in the region. The main challenge is due to its high variability, uncontrollability and difficult predictability, which affect the operation of the entire system. The results observed in the region in recent years demonstrate the strong synergy between these renewable energy sources (wind and hydro). However, the integration between these energy sources changes the way hydroelectric plants operate.

Palavras-chave: Flexibility; Storage; Variability; Synergy.

## 1. INTRODUÇÃO

A participação das ERV na Região Nordeste é uma realidade, e o maior desafio no momento é prover da melhor forma a inserção econômica dessas fontes, devido ao seu caráter intermitente.

A inserção, em larga escala, das ERV tem causado mudanças significativas na operação das usinas hidrelétricas operadas pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - Chesf, provocando elevado número de operações liga (LIG) e desliga (DCO) de suas unidades geradoras.

A integração dessas fontes sugere a necessidade de mudanças na forma de operação e regulação das usinas hidrelétricas do Sistema Elétrico Brasileiro - SEB, com o objetivo de realizar a transição energética do nosso sistema elétrico, para uma base de energia renovável.

## 2. USINAS HIDRELÉTRICAS OPERADAS PELA CHESF

A Chesf opera um total de nove usinas hidráulicas, sendo oito na Bacia do Rio São Francisco e uma na Bacia do Rio Parnaíba, totalizando uma potência instalada de 10.208 MW, como pode ser observado na Tabela 1, abaixo.

Tabela 1 – Usinas hidrelétricas operadas pela Chesf

Usinas	Unidades Geradoras	Capacidade Instalada Total (MW)
Sobradinho	6	1.050,3
Luiz Gonzaga	6	1.479,6
Apolônio Sales	4	400,0
Paulo Afonso I	3	180,0
Paulo Afonso II	6	443,0
Paulo Afonso III	4	794,2
Paulo Afonso IV	6	2.462,4
Xingó	6	3.162,0
Boa Esperança	4	237,0

Dentre as principais usinas da Chesf, destaca-se o Reservatório de Sobradinho, que tem como principal função regularizar a vazão para as usinas a jusante, da Cascata do Rio São Francisco, caracterizando-se como a “Bateria Natural” do sistema elétrico da Região Nordeste.

Na Tabela 2 apresenta-se a energia armazenada dos principais reservatórios da Região Nordeste e o seu percentual de contribuição à Energia Armazenada Máxima (EAR<sub>máx</sub>) do Sistema Interligado Nacional - SIN.

Tabela 2 – Energia Armazenada Máxima na Região Nordeste

Energia Armazenada Máxima dos Principais Reservatórios da Região Nordeste		
Reservatórios	EAR <sub>máx</sub> (MWmed)	% EAR <sub>máx</sub> do SIN*
Três Marias	16.013	5,5
Sobradinho	30.048	10,4
Itaparica	4.415	1,2
Boa Esperança	210	0,1

\*Relação com EAR<sub>máx</sub> do SIN, de 291 GWmês

Verifica-se na tabela acima que a Bacia do Rio São Francisco corresponde aproximadamente a 17% da energia armazenada máxima do SIN, sendo que o Reservatório de Sobradinho é responsável por 60% desse armazenamento. Porém, comparando-se a energia armazenada máxima da Bacia do Rio São Francisco com a Região Sudeste/Centro-Oeste (região responsável por cerca de 70% da energia armazenada do SIN), essa relação corresponde a 25% da energia armazenada, o que demonstra a sua importância estratégica para a operação elétrico-energética do SIN.

Em termos de atendimento energético, as Usinas Luiz Gonzaga, Paulo Afonso IV e Xingó são as que possuem a maior importância para o fornecimento de energia e regulação do sistema elétrico da Região Nordeste. Vale destacar que a capacidade instalada dessas três usinas corresponde a 50% da potência instalada da UHE Itaipu.

Atualmente, várias usinas da Chesf possuem Contrato de Prestação de Serviços Ancilares (CPSA) junto ao Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, realizando diversos serviços: Autorrestabelecimento Integral, Suporte de Reativo, Controle Secundário de Frequência (CAG) e Sistema Especial de Proteção (SEP). Além desses serviços, as usinas da Chesf participam da recomposição fluente do sistema elétrico da região, em caso de ocorrência de blecaute.

Portanto, esse conjunto de usinas, dada a sua capacidade de armazenamento de energia e potência instalada, tem um papel estratégico para a confiabilidade (controle da frequência e tensão) no atendimento eletroenergético. Logo, à medida que aumenta a participação das ERV, esse complexo de usinas passa a ter um papel ainda mais relevante, realizando regulação do sistema elétrico da região.

### 3. MUDANÇAS DA MATRIZ ELÉTRICA DA REGIÃO NORDESTE

A matriz elétrica da Região Nordeste sofreu forte alteração nos últimos anos, conforme observa-se na Figura 1, que mostra a capacidade instalada por fonte de energia, comparando-se os períodos em 31/12/2006 e 31/12/2021.

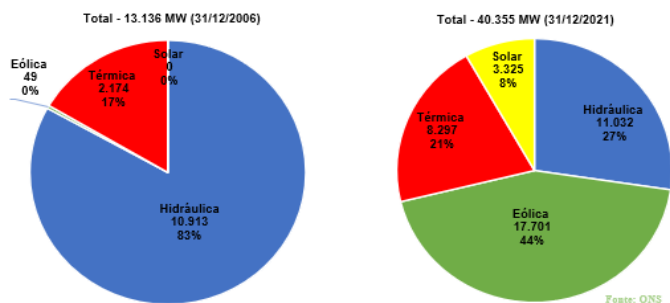


Figura 1 - Capacidade instalada por fonte de energia ano em 31/12/2006 e 31/12/2021

Ressalta-se que, passados 15 anos, houve um incremento de 27 GW à capacidade instalada da Região Nordeste. A geração eólica foi a fonte de energia que mais cresceu neste período, saindo de uma participação irrelevante no ano de 2006 (49 MW), para a fonte de maior capacidade instalada da região, com 17.701 MW ao final do ano de 2021. Houve expansão, também, da capacidade instalada de geração térmica, passando de 17% em 2006 para 21% em 2021, e o surgimento da geração solar, com a participação de 8%, em 2021. A geração hidráulica, predominantemente das usinas da Chesf, reduziu a sua participação, passando de 83% para 27% da capacidade instalada na região.

A entrada da geração eólica na região foi tão expressiva que o índice de penetração de eólica no Nordeste no ano de 2021 foi de 64%. Esse índice é elevado, principalmente comparado com os países que lideram ranking mundial desse indicador, como a Dinamarca (44%), seguida da Irlanda (31%), Portugal (26%), Espanha (24%), Alemanha (23%) e Grã-Bretanha (22%), para resultados verificados no ano de 2021 (WIND EUROPE, 2022). Portanto, caso o Nordeste fosse considerado um país, estaria liderando o ranking mundial neste índice.

Ao observar a geração média no Nordeste verificada por fonte de energia elétrica nos últimos 15 anos, conforme apresentado na Figura 2, evidencia-se mais uma vez a mudança radical na matriz elétrica da região, passando de um sistema elétrico Hidrotérmico para uma matriz Hidro-Eólica-Térmico-Solar.

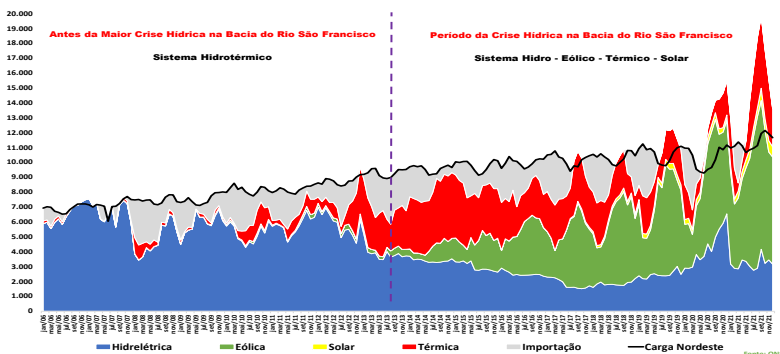


Figura 2 - Geração por fonte na Região Nordeste do ano de 2006 a 2021 – [MW médio]

Destaca-se que a geração hidrelétrica da Chesf era responsável por mais de 70% do atendimento energético da Região Nordeste. Porém, a partir do ano de 2013, devido à crise hídrica na Bacia do Rio São Francisco e o processo contínuo de expansão da geração eólica na região, os papéis se inverteram, e a geração eólica passou a ser a principal fonte de energia, tornando a região exportadora líquida de energia elétrica.

A forte penetração da geração eólica na região provocou mudanças significativas no padrão de operação das unidades geradoras hidrelétricas da Chesf, com incremento substancial de entrada (LIG) e saída (DCO) de unidades geradores para fazer frente a variabilidade da geração eólica. Na Figura 3 apresenta-se a relação entre número de eventos LIG-DCO de unidades geradoras e o percentual de produção de energia fornecida pela Chesf em relação a carga do Nordeste, para os anos de 2006 a 2021.

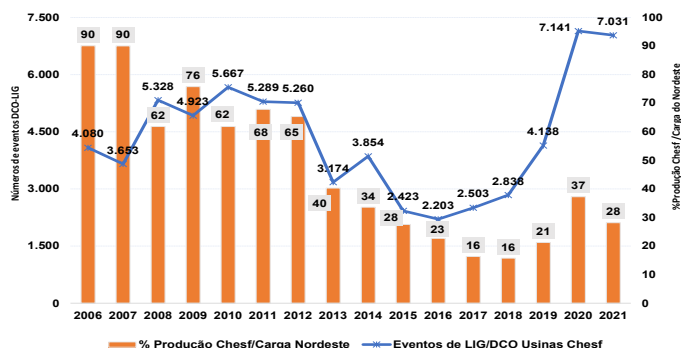


Figura 3 - Número de eventos DCO-LIG de unidades geradoras das usinas hidrelétricas da Chesf e produção de energia pela Chesf em relação a carga da Região Nordeste (%)

Ao longo dos anos de 2006 a 2021 tem-se três momentos distintos da operação das usinas da Chesf na Região Nordeste, conforme descrito abaixo:

- 2006 a 2012: A geração hidrelétrica da Chesf como principal provedora do atendimento a carga da região, com percentual acima de 70%, mantendo média de 4.886 eventos de manobras de LIG-DCO;
- 2013 a 2018: Com a crise hídrica na Bacia do São Francisco, a geração hidrelétrica perdeu protagonismo no atendimento a carga da região, e houve redução do número de manobras de unidades geradoras;
- 2019 a 2021: Como a recuperação do estoque armazenado no Reservatório de Sobradinho, e a participação elevada da geração eólica na região, as unidades geradoras das usinas da Chesf passaram a realizar um elevado número de manobras de LIG-DCO (média de 6.103 eventos), superior ao período pré-crise hídrica (aumento de 25%), porém, com baixa participação no atendimento da carga da região (da ordem de 29%).

Logo, observa-se, que a partir da recuperação do Reservatório de Sobradinho (bateria da região), as usinas da Chesf passaram a trabalhar na função de regulação do sistema, realizando parte do amortecimento da variabilidade da geração eólica da região.

Esse trabalho de regulação da variabilidade da geração eólica ocorreu nos dois sentidos, seja para prover geração no momento de falta da geração eólica, ou com redução da geração hídrica no momen-

to de excesso eólico. Como ilustração, essa dinâmica da modulação da geração das usinas da Chesf pode ser observada na Figura 4.

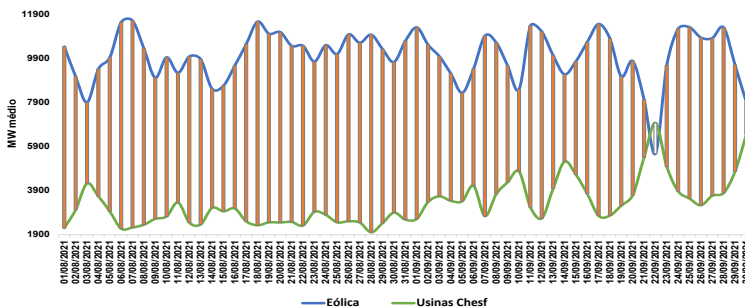


Figura 4 - Geração média diária eólica no Nordeste e das usinas da Chesf, nos meses de Agosto e Setembro do ano de 2021 - [MW médio]

Percebe-se que existe uma forte complementariedade entre as curvas das gerações eólica no Nordeste e das usinas da Chesf, mesmo nos meses de melhor desempenho da geração eólica na região (agosto e setembro).

A modulação da geração das usinas da Chesf ocorre também de forma não programada, como pode ser observada na Figura 5, que indica redução da geração nas usinas da Chesf no ano de 2021. Essas reduções foram motivadas por razões energética, elétrica e de atendimento a requisitos de confiabilidade elétrica do sistema (ONS, 2021).

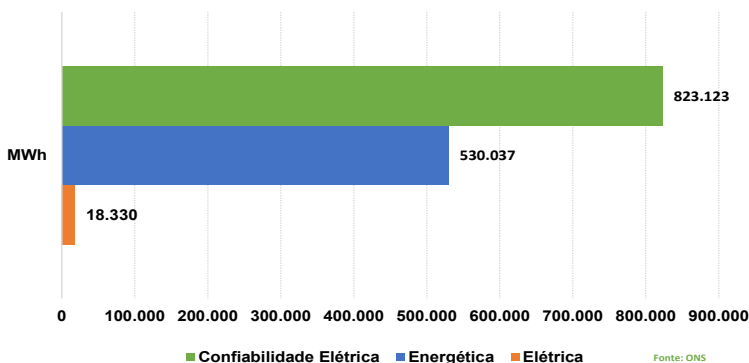


Figura 5 - Reduções da geração nas usinas da Chesf no ano de 2021 [MWh]

Na Figura 6, como ilustração, observa-se que as curvas de geração possuem uma correlação inversa, uma vez que quando a eólica cresce a geração das usinas da Chesf diminui, e vice-versa. Neste dia específico (21/09/2021), a variação da geração eólica foi 7.185 MW médio, em um intervalo de 12 horas, enquanto a modulação de geração das usinas da Chesf foi da ordem de 4.609 MW médio, valor que corresponde a 1,4 vez a capacidade instalada da UHE Xingó, a maior usina do sistema elétrico do Nordeste.

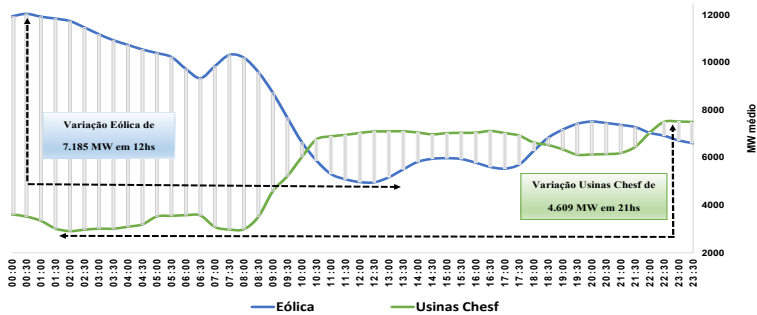


Figura 6 - Geração verificada, eólica no Nordeste e das usinas Chesf no dia 21/09/2021 – [MW médio]

No ano de 2021 a modulação média da geração das usinas da Chesf (diferença entre a geração máxima e mínima), foi da ordem de 1,9 GW médio, conforme apresentado na Figura 7.

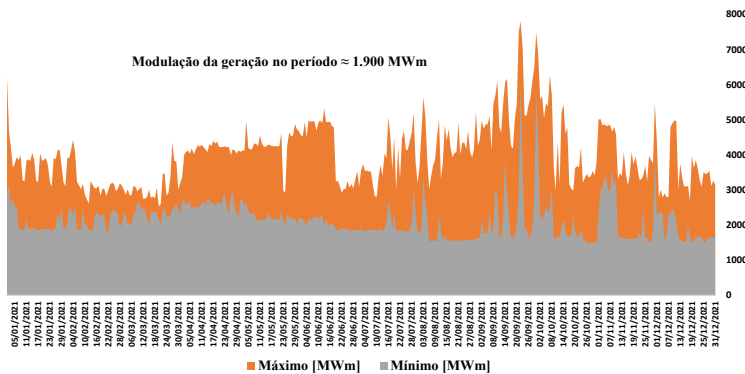


Figura 7 - Modulação da geração das Usinas da Chesf no ano de 2021 – [MW médio]



Uma forma de valorar esse serviço realizado pelas usinas da Chesf é calculando o custo total dessa operação, caso esse serviço fosse realizado pela geração térmica instalada no Nordeste, despachada centralizadamente pelo ONS, conforme o Programa Mensal de Operação de Dezembro/2021, que apresenta elevado custo e é inflexível, conforme pode ser observado na Figura 8.

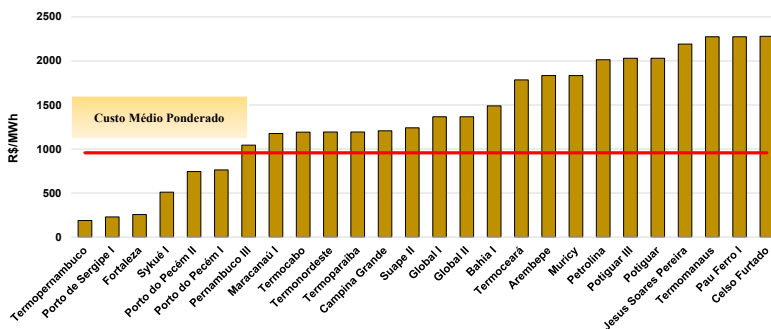


Figura 8 - Custo Variável Unitário (CVU) das usinas térmicas despachadas pelo ONS no Nordeste [R\$/MWh]

A estimativa toma como referência apenas 40% do custo médio ponderado das usinas térmicas do Nordeste, no valor de 382 R\$/MWh, e usa esse mesmo critério para a modulação total de geração realizada pelas usinas da Chesf, no valor de 760 MW. Assim, o custo total de operação no ano de 2021, para fazer o *backup* da geração eólica no Nordeste, utilizando geração térmica, seria de 2,5 bilhões R\$.

Portanto, não há dúvida que a melhor forma de inserção em larga escala das ERV de forma sustentável no SEB é através da integração com a geração hidroelétrica. Em particular, para a Região Nordeste é fundamental a preservação do armazenamento do Reservatório de Sobradinho, para garantir a melhor regulação do sistema elétrico ao um menor custo.

#### 4. O PAPEL DAS HIDRELÉTRICAS NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DO SEB

É fato que o SEB é internacionalmente conhecido pela sua capacidade de geração de energia elétrica renovável em larga escala com a utilização da fonte hidráulica. A priorização dessa fonte de energia está atrelada a alguns fatores, que diferenciam o SEB dos demais

sistemas elétricos mundiais: abundância de recursos hídricos, geografia dos rios, a dimensão continental do país, a malha do sistema de transmissão e a diversidade de climas.

No entanto, a hidroeletricidade é variável, e esse problema da variabilidade da produção da energia hidráulica foi resolvido através da combinação de alguns fatores, descritos abaixo:

- Grande capacidade de armazenamento de energia – construção de grandes reservatórios nas cabeceiras das bacias hidrográficas integrantes do SIN (baterias naturais);
- Grande número de unidades geradoras hidráulicas – fonte de energia que apresenta os melhores atributos para o backup das fontes intermitentes – flexível, resposta rápida, e despachável;
- Um sistema elétrico interligado geograficamente, possibilitando absorver a geração onde existe disponibilidade, e desta forma, enviar para outra região que esteja com déficit de geração.

Logo, com a inserção das ERV, o sistema elétrico terá que ter maior flexibilidade espacial (rede) e temporal (estoque, despacho flexível, resposta rápida), para o controle das fontes (FERRAZ, 2020). No entanto, o SEB possui os melhores atributos para inserção das ERV, como é apontado no trabalho coordenado pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE, com o título “Sistemas Energéticos do Futuro: Integrando Fontes Variáveis de Energia Renovável na Matriz Energética do Brasil”, que indica que o SIN tem capacidade de suportar a inserção massiva das ERV, devido a nossa base hidráulica.

Além da flexibilidade operativa do sistema, os reservatórios das usinas do SIN têm capacidade de armazenamento de energia da ordem de 291 GWmês, um dos maiores do mundo (ONS, 2021). Essa capacidade de armazenamento dos reservatórios, interligados por extensas linhas de transmissão, é capaz de reservar água equivalente a cinco meses de consumo de energia elétrica em todo o país (D’ARAUJO, 2022).

## 5. CONCLUSÃO

Face ao exposto, a exemplo do que vêm ocorrendo na Região Nordeste, temos um modelo que pode ser seguido para todo o SIN.

Para futuras pesquisas sobre o tema, sugerimos o aprofundamento sobre o processo da transição energética no SEB, que trará grandes impactos em toda cadeia produtiva do setor elétrico, seja de ordem econômica, regulatória e tecnológica, visto que ainda não existe uma arquitetura definida.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

D'ARAUJO, R. P. Eletrobras na marca do pênalti. *Jornal dos Economistas*, Rio de Janeiro, n. 392, p. 14, abr. 2022. Disponível em: <http://www.corecon-rj.org.br/anexos/FED3BD479F666D51C5B6B23E04FDD0B9.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2022.

FERRAZ, C. C. M. Transição Energética Mundial. In: *Seminário do Instituto de Desenvolvimento Estratégico do Setor Elétrico - Transição Energética e o Papel do Estado*, 2020, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=AtXCoCNKKbk>. Acesso em: 20 jan. 2021.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Acompanhamento das Reduções de Geração – Dezembro de 2021*. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: [https://sintegre.ons.org.br/sites/2/53/Produtos/546/Redu%C3%A7%C3%B5es%20de%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20por%20Raz%C3%B5es%20Energ%C3%A9ticas\\_EI%C3%A9tricas%20-%202021-12\\_v0.pdf](https://sintegre.ons.org.br/sites/2/53/Produtos/546/Redu%C3%A7%C3%B5es%20de%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20por%20Raz%C3%B5es%20Energ%C3%A9ticas_EI%C3%A9tricas%20-%202021-12_v0.pdf). Acesso em: 17 mar. 2022.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Plano da Operação Energética 2021/2025 - PEN 2021*. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: [https://sintegre.ons.org.br/sites/8/43/76/\\_layouts/15/WopiFrame.aspx?sourcedoc={FB1A2331-40E7-45C5-A553-0BB8E09F6C69}&file=Relat%C3%B3rio%20PEN%202021.pdf&action=default](https://sintegre.ons.org.br/sites/8/43/76/_layouts/15/WopiFrame.aspx?sourcedoc={FB1A2331-40E7-45C5-A553-0BB8E09F6C69}&file=Relat%C3%B3rio%20PEN%202021.pdf&action=default). Acesso em: 03 fev. 2022.

VELLOSO, J. P. R. (coordenador). *Opção pela Energia Hidroelétrica (e outras energias renováveis)*. Rio de Janeiro: INAE, 2012.

WIND EUROPE. *Wind energy in Europe. Bélgica: 2021 Statistics and the outlook for 2022-2026*. 2022.