

## ANÁLISE DO IMPACTO DO AUMENTO DA INSERÇÃO DE FONTES EÓLICAS NO PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Vinícius Lopes Vilhena (IC), Fabrício Silveira Chaves (PQ)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá

**Palavras-chave:** Fonte renovável intermitente. Geração eólica. Planejamento da operação.

### Introdução

O mundo todo tem passado por mudanças energéticas consideráveis ao longo dos anos, principalmente no que se tange ao momento crítico do planeta em relação a poluição ambiental, no qual as fontes renováveis estão possuindo cada vez mais espaço e abundância. O Brasil possui um caso particular, por apresentar uma vasta extensão territorial e climas favoráveis, e foi alvo de intensas pesquisas energéticas no final do século XX e mudanças significativas nos últimos anos [1].

O Brasil, ao longo da história, apresentou e ainda apresenta a geração hidrelétrica como principal fonte de geração de energia elétrica. Além disso, grande parte dessas usinas são a fio d'água, as quais não possuem capacidade de armazenamento de água suficiente para promover a regularização da vazão para geração em meses mais secos. Essa possível falta de respostas à demanda das usinas hidrelétricas em períodos específicos, juntamente com a dependência dela, fizeram com que o país sofresse com apagões devido a crises hídricas entre os anos de 2001 e 2002 [2].

Todos esses motivos, somados ao fato da necessidade de descarbonização do planeta, das condições climáticas e territoriais favoráveis do Brasil, fizeram com que gerações renováveis, principalmente fotovoltaicas e eólicas, fossem cada vez mais estudadas e utilizadas no Sistema Elétrico Brasileiro (SEB). A geração eólica, por exemplo, teve um aumento percentual de 1.141%, comparando os anos de 2013 e 2022, segundo o Balanço Energético Nacional de 2023, estudo realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [3].

A integração dessas fontes intermitentes traz desafios e impactos significativos, tanto pela complexidade do SEB, que é todo interligado, quanto pelas próprias fontes em si. As fontes intermitentes apresentam imprevisibilidade em sua geração, são encontradas em regiões específicas do Brasil, afastadas dos grandes centros de consumo, além

de possuírem baixa inércia, o que não garante a robustez do sistema em situações de perturbação por exemplo.

O objetivo desta pesquisa é justamente analisar os impactos causados pela inserção dessas fontes, com ênfase na geração eólica, por meio de ferramentas computacionais de análise de regime permanente.

Para atingir os objetivos, a pesquisa foi dividida em três fases. A primeira consistiu em uma extensa revisão bibliográfica sobre geração eólica no Brasil e seus desafios operativos, além de estudos sobre planejamento da operação do Sistema Interligado Nacional (SIN). A segunda fase focou no aprofundamento teórico do método de fluxo de potência e na ferramenta computacional ANAREDE. E por fim, a terceira e última fase aplicou o conhecimento adquirido, por meio da obtenção de dados de geração e carga, modelagem desses dados no sistema IEEE-14 Barras, e simulação e análise de diversos cenários operativos com diferentes patamares de carga e geração, cenários esses, utilizados para representar situações que ocorrem no subsistema do Nordeste do Brasil.

Para se analisar os dados de geração e carga obtidos, cruciais para atingir os objetivos, foram realizadas simulações no ANAREDE e, posteriormente, relatados em planilhas do Excel.

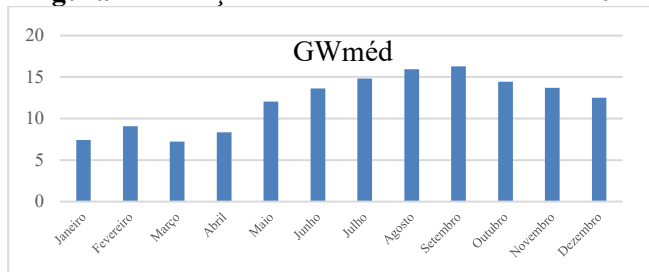
### Metodologia

Para iniciar a coleta dos dados necessários para se realizar as simulações, foram coletadas as informações das gerações eólicas médias em todos os meses de 2024 no Brasil no site do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [5], apresentadas na Figura 1.

De posse de todos os dados, foram selecionados os meses de maior geração (setembro), de menor geração (março), e o mês de geração mais próxima da média aritmética de todos os outros (maio).

*“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”*

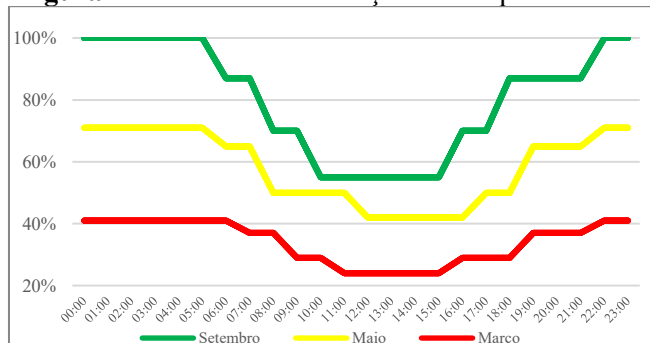
**Figura 1 - Geração Eólica Média do Brasil em 2024**



Fonte: Autoria Própria.

Após a obtenção desses dados, foram coletadas as gerações eólicas horárias médias de cada um dos três meses escolhidos de forma a se obter um perfil médio diário de geração eólica para cada mês. Esses perfis obtidos foram divididos em quatro patamares – geração máxima, alta, média e baixa. O patamar de geração máxima do mês de setembro foi considerado como a referência percentual de 100%. A porcentagem dos outros patamares foi calculada com base nesta referência, chegando-se as curvas de geração eólica horária apresentadas na Figura 2.

**Figura 2 - Patamares de Geração Eólica para um Dia**



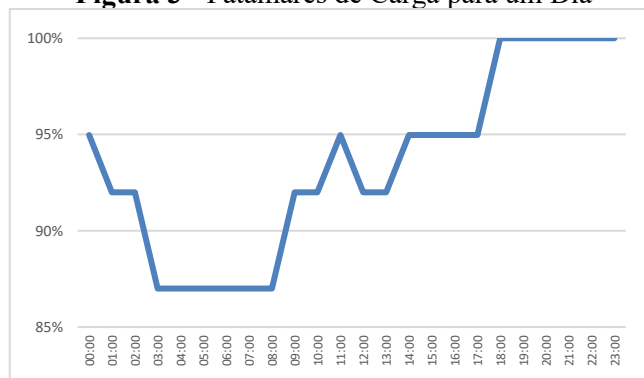
Fonte: Autoria Própria.

Foram obtidos também os dados de carga no Nordeste em 2024, inicialmente analisando a carga horária média de cada mês da região. Dessa análise, foi criada uma única curva que representasse a carga horária média no Nordeste de todo o ano de 2024, fazendo a média horária de carga de todos os meses. Utilizando a mesma metodologia da geração eólica, essa curva média foi dividida em quatro patamares de carga – máxima, alta, média e baixa, como mostrado na Figura 3.

Essa curva de carga foi sobreposta com cada uma das três curvas de geração. Cada combinação diferente de patamares de carga e geração foi considerado um caso de estudo. Ao todo foram elaborados 34 casos de estudo, detalhados na Tabela 1. Esses casos representam

diferentes comportamentos específicos de carga e geração que vão se alterando ao longo do dia, como por exemplo o horário da noite que apresenta altos valores de geração eólica e carga.

**Figura 3 - Patamares de Carga para um Dia**



Fonte: Autoria Própria.

**Tabela 1 – Casos de Estudos Analisados**

Tipo de Caso	Mês Analisado		
	Setembro (max.)	Mai (med.)	Março (min.)
Carga Alta – Geração Máxima	Caso 1	Caso 12	Caso 24
Carga Média – Geração Máxima	Caso 2	Caso 13	Caso 25
Carga Baixa – Geração Máxima	Caso 3	Caso 14	Caso 26
Carga Baixa – Geração Alta	Caso 4	Caso 15	Caso 27
Carga Baixa – Geração Média	Caso 5	Caso 16	-
Carga Média – Geração Média	Caso 6	Caso 17	Caso 28
Carga Média – Geração Baixa	Caso 7	Caso 19	Caso 30
Carga Alta – Geração Baixa	Caso 8	Caso 20	Caso 29
Carga Alta – Geração Média	Caso 9	Caso 18	Caso 31
Carga Máxima – Geração Alta	Caso 10	Caso 22	Caso 33
Carga Máxima – Geração Máxima	Caso 11	Caso 23	Caso 34
Carga Máxima – Geração Média	-	Caso 21	Caso 32

Fonte: Autoria Própria.

Após a coleta de dados, foi obtida a composição da geração média do Nordeste em 2024 para diferentes tipos de usinas. Esses tipos de usinas foram divididos em três grupos: geração eólica (G1), geração térmica e solar (G2) e geração hidrelétrica (G3). Para esses grupos, foram calculadas a porcentagem de participação de cada um, considerando a geração média total. Também foi criado um novo grupo, referente ao intercâmbio de energia entre outras regiões (G4), seu cálculo foi feito considerando que o intercâmbio é a carga média subtraída da geração e que atualmente há apenas exportação de energia do Nordeste para outras regiões.

**“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**

Os dados dos quatro grupos de gerações foram agrupados, usando como referência percentual a geração total do Nordeste para os grupos 1, 2 e 3, e para a carga total o grupo 4, obtendo a Tabela 2.

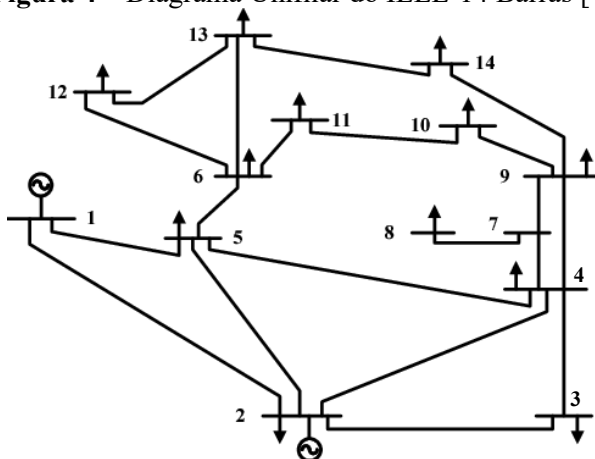
**Tabela 2 – Porcentagem de Cada Grupo de Geração**

Tipo de Geração	Geração Média (MWméd)	Porcentagem (%)	
Eólica (G1)	11.190	60,89	100
Térmica e Solar (G2)	3.580	19,48	
Hidrelétrica (G3)	3.606	19,62	
Intercâmbio (G4)	5.196	39,42	

Fonte: Autoria Própria.

O próximo passo foi inserir no sistema IEEE-14 barras modelado no ANAREDE (Figura 4) todos os dados obtidos e, assim, realizar as simulações, considerando os 34 casos construídos anteriormente. Para deixar o sistema IEEE-14 barras mais próximo do limite, foram realizadas algumas adaptações, incluindo uma carga ativa total de 500 MW distribuída entre as barras de carga, aumento de 83,5% da carga padrão do sistema. Para obter a porcentagem do intercâmbio de energia (G4), a geração total do sistema precisou ser aumentada para 697,44 MW que é o valor da carga ativa total multiplicado por 139,42%.

**Figura 4 – Diagrama Unifilar do IEEE-14 Barras [4]**



O valor de geração total foi dividido entre três barras do sistema e cada uma dessas barras foi utilizada para representar um dos grupos de geração, considerando a porcentagem descrita na Tabela 2. As barras 2, 3 e 13 receberam, respectivamente, as gerações G3, G2 e G1. O intercâmbio (G4) foi representado pela geração ou consumo da barra 1 que é a barra slack do sistema.

É importante ressaltar que os casos criados são baseados nos dados da carga e da geração eólica do Nordeste, desta forma, considerou-se que as gerações G2 e G3 permanecem constantes durante toda a análise. A barra 1 teve seu valor adaptado automaticamente para cada um dos casos, visto que se trata de uma barra slack. As únicas mudanças realizadas durante as simulações dos casos foram relacionadas à barra de geração eólica (barra 13), e às cargas ativas e reativas das barras.

As simulações foram feitas para cada um dos 34 casos, e os valores de tensão e potência, tanto das barras quanto das linhas, foram registrados em uma pasta de trabalho no Excel com uma aba para cada caso.

### Resultados e discussão

Inicialmente foram analisadas as linhas do sistema em todos os casos. Observou-se que não houve extrapolação dos limites de potência em nenhuma simulação, exceto nos casos de geração eólica máxima no mês de setembro, na linha entre as barras 6 e 13, lembrando que a barra 13 se trata da barra de geração eólica. O limite de carregamento da linha é 200 MVA e foi excedido nos casos 1, 2, 3 e 11 nas porcentagens descritas na Tabela 3.

**Tabela 3 – Carregamento da Linha 6-13**

Caso	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 11
Carregamento (%)	104,45	115,36	116,16	114,10

Fonte: Autoria Própria.

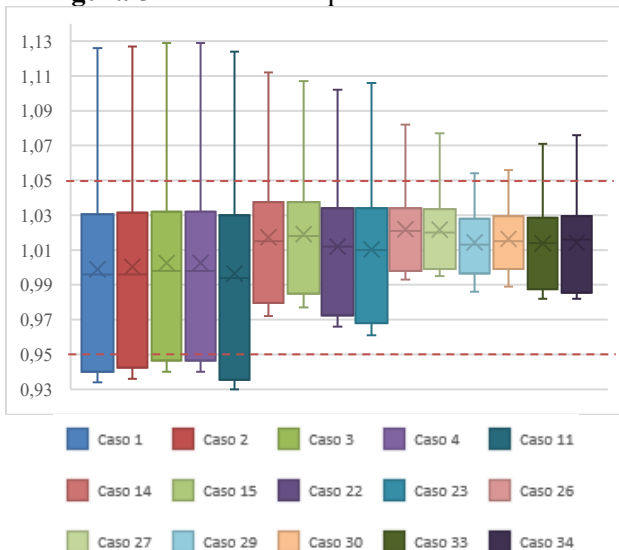
Outra análise realizada se refere às barras do sistema, observando o perfil de tensão em todos os casos. Verificou-se que os comportamentos dos casos foram muito semelhantes. A Figura 5 apresenta as tensões em p.u. de todas as barras apenas dos casos de maior relevância, considerando tensão máxima, mínima e desvio padrão. Constatou-se uma grande diferença no valor das tensões entre os três meses analisados, inclusive extrapolando os limites mínimos e máximos de tensão de 0,95 a 1,05 p.u..

A Figura 6 apresenta, para os mesmos casos da Figura 5, os perfis de potência ativa em MW da carga total (curva em azul) e da geração eólica (curva em vermelho) e o intercâmbio (gráfico em barras) dos casos estudados. Verifica-se que há exportação de energia (valores negativos de intercâmbio) quando a geração eólica possui seus maiores valores, sendo o pico de exportação de 186,5 MW no Caso 3. Com a diminuição de geração

## “Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

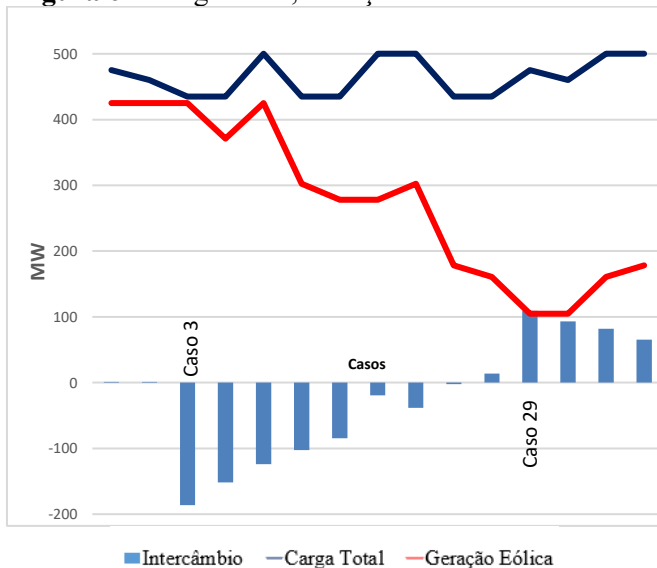
eólica, o sistema começa a importar energia, obtendo o máximo de 109,2 MW no Caso 29.

Figura 5 – Tensões em p.u. de todas as barras



Fonte: Autoria Própria.

Figura 6 – Carga Total, Geração Eólica e Intercâmbio



Fonte: Autoria Própria.

### Conclusões

Este trabalho analisou os impactos em regime permanente da inserção de geração eólica no sistema elétrico teste IEEE-14 barras, através da simulação de 34 cenários operativos distintos que representam diferentes condições de carga e geração ao longo de um ano. A metodologia de extração e consolidação automatizada de dados mostrou-se fundamental para

viabilizar a análise comparativa entre os múltiplos casos, permitindo a identificação de tendências e condições críticas de operação.

A análise dos resultados demonstrou a forte influência do perfil de geração eólica no comportamento da rede. Notavelmente, os cenários correspondentes ao mês de setembro, caracterizados pela máxima geração eólica, apresentaram um perfil de tensão mais inconstante, com maiores valores máximos e uma variação mais acentuada da tensão entre as barras do sistema. Além disso, um impacto crítico observado nesses mesmos cenários de alta geração foi o sobrecarregamento da linha de transmissão 6-13 que excedeu seu limite de potência nominal devido ao intenso escoamento da energia gerada na barra 13.

Conclui-se, portanto, que embora a geração eólica contribua positivamente para a matriz energética, sua elevada penetração e concentração em pontos específicos da rede pode levar a violações de limites operativos de tensão e carregamento, exigindo estudos de planejamento detalhados para garantir a segurança e a confiabilidade do sistema. Para trabalhos futuros, sugere-se a análise de soluções para mitigar as sobrecargas identificadas, como expansão e reforço da malha de transmissão e inserção de sistemas de armazenamento de energia.

### Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Prof. Fabrício Silveira Chaves, pela orientação e suporte fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa, e à Universidade Federal de Itajubá (Unifei) pela oportunidade, infraestrutura e pelo fomento direto à pesquisa através da bolsa do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) da Unifei. Estendo minha gratidão à minha família e amigos pelo apoio e incentivo constantes.

### Referências

- [1] Amarante, O. A. C.; Zack, M. B. J; Sá, A.L. **Atlas Do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília, 2001.
- [2] GOMES, M. de O. **Gestão de crise e o “apagão” em 2001: um estudo de caso**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Gestão Pública). UFRJ, Rio de Janeiro, 2023.
- [3] EPE – Empresa de Pesquisa Energética, **Balanco Energético Nacional (BEN) 2023**: Ano base 2022.
- [4] JIANG, H. *et al.* Spatial-temporal characterization of synchrophasor measurement systems... *In*: ASILOMAR CONFERENCE ON SIGNALS, SYSTEMS AND COMPUTERS, 48., 2014. **Anais [...]**. IEEE, 2014. p. 750-754.
- [5] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Histórico da Operação**. Rio de Janeiro: ONS, 2025.