

Uma Nova Metodologia de Estudo de Fluxo de Potência que Incorpora Características de Complementariedade entre Diferentes Fontes de Energia

Paulo Vitor da Silva Dias¹, Maurilio Quirino da Silva Filho¹, Rivanildo Alves Soares¹

1 Dymmer Soluções em Engenharia

paulo.dias@dymmer.com.br, maurilio.quirino@dymmer.com.br, rivanildo.alves@dymmer.com.br

RESUMO

Este artigo apresenta uma metodologia inovadora para realizar análise de fluxo de potência e avaliar os impactos da geração eólica e solar na malha de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN). A abordagem proposta combina simulações de regiões de segurança com dados históricos de fatores de capacidade, considerando a correlação do fator de capacidade dessas fontes de energia. Um estudo de caso foi realizado para avaliar a robustez da metodologia, analisando o carregamento da LT 230 kV Lagoa Nova II - Paraíso C8 na contingência da LT 230 kV Lagoa Nova II - Paraíso C7, frente as variações de geração das usinas eólicas e solares dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará no horizonte de 2027. A metodologia proposta demonstrou sua robustez não só em estimar o tempo de exposição a sobrecargas da linha de transmissão estudada, mas também ao quantificar os potenciais desperdícios de energia, visando evitar tais sobrecargas indesejadas. Essa abordagem proporciona uma gestão mais eficiente dos recursos energéticos e contribui para o planejamento e a operação do sistema elétrico. Futuras pesquisas podem explorar a incorporação de incertezas, redes neurais para estimar a geração, considerar outras fontes de energia e avaliar a integração de sistemas de armazenamento de energia. Este estudo destaca a importância de uma metodologia para uma análise aprofundada e precisa do fluxo de potência, promovendo um setor elétrico mais sustentável, eficiente e seguro, impulsionado pela adoção de fontes de energia renovável.

Palavras-chaves:

Fluxo de potência; complementariedade de fontes renováveis; região de segurança; dados históricos de gerações renováveis.

ABSTRACT

This article presents an innovative methodology for performing power flow analysis and evaluating the impacts of wind and solar generation on the transmission grid of the National Interconnected System (SIN). The proposed approach combines security region simulations with historical data on capacity factors, considering the correlation of the capacity factor of these energy sources. A case study was conducted to evaluate the robustness of the methodology by analyzing the loading of the 230 kV Lagoa Nova II - Paraíso C8 transmission line under the contingency of the 230 kV Lagoa Nova II - Paraíso C7 transmission line, considering variations in wind and solar generation from the states of Rio Grande do Norte and Ceará in the 2027 horizon. The proposed methodology demonstrated its robustness not only in estimating the time of exposure to overloads of the studied transmission line but also in quantifying potential energy wastage, aiming to avoid such undesired overloads. This approach enables more efficient management of energy resources and contributes to the planning and operation of the electrical system. Future research can explore the incorporation of uncertainties, neural networks to estimate generation, consider other energy

sources, and assess the integration of energy storage systems. This study highlights the importance of a methodology for in-depth and accurate power flow analysis, promoting a more sustainable, efficient, and secure electricity sector driven by the adoption of renewable energy sources.

Keywords:

Power flow; complementarity of renewable sources; security region; historical data of renewable generations.

1. INTRODUÇÃO

A crescente expansão de fontes de energia renovável, como a geração eólica e solar, tem desempenhado um papel fundamental na transição para um sistema elétrico mais sustentável e com baixas emissões de carbono. No entanto, a integração em larga escala dessas fontes de energia intermitentes de forma centralizada, apresenta desafios significativos para a operação e planejamento da malha de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN). É essencial avaliar os impactos dessas fontes de energia na malha de transmissão, a fim de garantir o escoamento seguro e eficiente da energia gerada com mínima ociosidade da malha de transmissão atual e planejada.

Neste contexto, este artigo apresenta uma nova metodologia inovadora para realizar estudos de fluxo de potência de energia elétrica, com o objetivo de avaliar os impactos da geração eólica e solar na malha de transmissão do SIN. A metodologia proposta combina os artifícios computacionais de regiões de segurança estática (fluxo de potência) com dados históricos de fatores de capacidade das usinas eólicas e solares, permitindo uma análise abrangente e precisa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As análises de fluxo de potência são fundamentais para analisar e planejar sistemas elétricos de potência. Ela descreve a transferência de potência ativa e reativa entre as diferentes partes de uma rede elétrica. O objetivo é determinar as tensões e os carregamentos em equipamentos do sistema de transmissão de energia elétrica, levando em consideração as características dos elementos da rede, como linhas de transmissão, transformadores, geradores etc. (GLOVER, SARMA e OVERBYE, 2012).

Desafios da Integração de Fontes de Energia Renovável na Malha de Transmissão

A integração de fontes de energia renovável, como a geração eólica e solar, na malha de transmissão, apresenta desafios significativos. Essas fontes são caracterizadas pela sua variabilidade e intermitência, o que pode afetar a estabilidade e a segurança do sistema elétrico. Um dos principais desafios é a gestão do fluxo de potência no sistema de transmissão, considerando as flutuações na geração das fontes renováveis. A variação na produção de energia eólica e solar pode causar desequilíbrios entre a geração e a demanda, levando a problemas como sobrecarga ou falta de energia em determinadas áreas da rede (ARULKUMAR, PALANISAMY e VIJAYAKUMAR, 2016).

Superar esses desafios é essencial para promover uma transição bem-sucedida para um sistema elétrico mais sustentável, com uma maior participação de fontes de energia renovável. Isso requer o desenvolvimento de estratégias de integração eficientes, investimentos em infraestrutura de transmissão e o avanço contínuo das tecnologias de controle e operação do sistema elétrico.

Regiões de Segurança

A simulação de regiões de segurança é uma técnica utilizada para avaliar os limites operacionais de uma rede elétrica. Essa análise tem como objetivo identificar as combinações de geração e carga que podem levar a problemas de estabilidade, sobrecarga, violação e/ou restrições operacionais (JARDIM, NETO e KWASNICKI, 2004) e (JARDIM, NETO e SANTOS, 2006).

No mercado, já estão disponíveis programas computacionais especializados, como o ANAREDE desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e o ORGANON desenvolvido pela High Performance Power Systems Applications (HPPA). Essas ferramentas possibilitam a modelagem do

sistema elétrico levando em consideração as características dos elementos da rede, as restrições operacionais e os dados de geração e carga. Com base nesse modelo, é possível realizar simulações para diversos cenários e identificar as regiões de segurança, onde a rede opera de maneira segura e dentro dos limites operacionais estabelecidos (CEPEL, 2022).

Essa abordagem é importante para identificar os limites do sistema, auxiliar no planejamento da expansão da rede, na definição de políticas de despacho de geração e na avaliação dos impactos de novas fontes de energia, como a geração eólica e solar que possuem fortes características de intermitência, na segurança e estabilidade do sistema elétrico. Ao delimitar a região de segurança, são estabelecidos limites operacionais que indicam as condições em que o sistema pode operar de forma estável e confiável. A simulação de regiões de segurança fornece subsídios valiosos para a tomada de decisões e o desenvolvimento de estratégias para o setor elétrico.

Complementariedade Eólica e Sola da Região Nordeste do Brasil

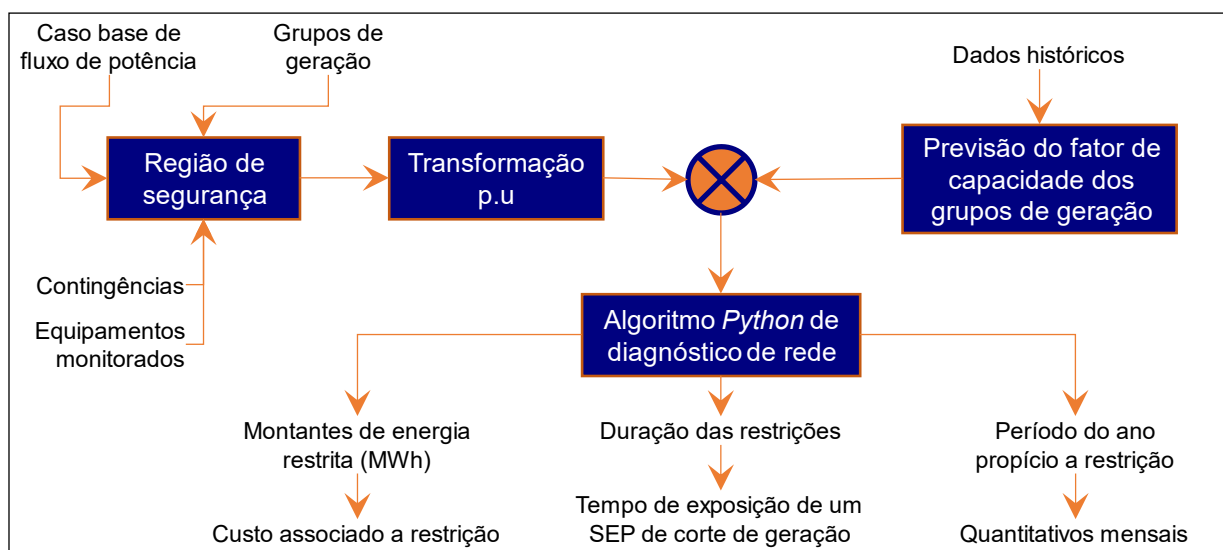
A região Nordeste do Brasil apresenta um potencial significativo para o desenvolvimento de energia renovável, em particular, a complementariedade entre as fontes eólica e solar se destaca como uma vantagem estratégica. A região possui condições climáticas favoráveis, com altos índices de radiação solar e ventos fortes, o que torna possível a geração de eletricidade a partir dessas fontes de forma complementar. A localização geográfica privilegiada permite uma alta incidência de radiação solar durante todo o ano. A complementariedade entre a energia solar e eólica é notável, pois enquanto a geração solar é mais intensa durante o dia, a geração eólica atinge seu pico durante a noite. Isso cria um equilíbrio na geração de energia renovável ao longo do dia (BARROS, DIAS, et al., 2021).

Aproveitar a complementariedade entre a energia eólica e solar na região Nordeste do Brasil é uma estratégia promissora para a diversificação da matriz energética e redução das emissões de gases de efeito estufa. A combinação dessas fontes renováveis contribui para uma maior estabilidade e segurança do sistema elétrico, além de impulsionar o desenvolvimento sustentável da região.

3. METODOLOGIA DO ESTUDO

A metodologia proposta neste trabalho visa realizar estudos de fluxo de potência para avaliar os impactos da geração eólica e solar na malha de transmissão do SIN de forma mais rica e detalhada. A abordagem consiste em combinar simulações de regiões de segurança com dados históricos de fatores de capacidade das usinas eólicas e solares, permitindo uma análise abrangente e precisa dos despachos de geração. A **Figura 3.1** ilustra o fluxograma da metodologia proposta.

Figura 3.1: Fluxo de trabalho da metodologia proposta



Fonte: próprio autor

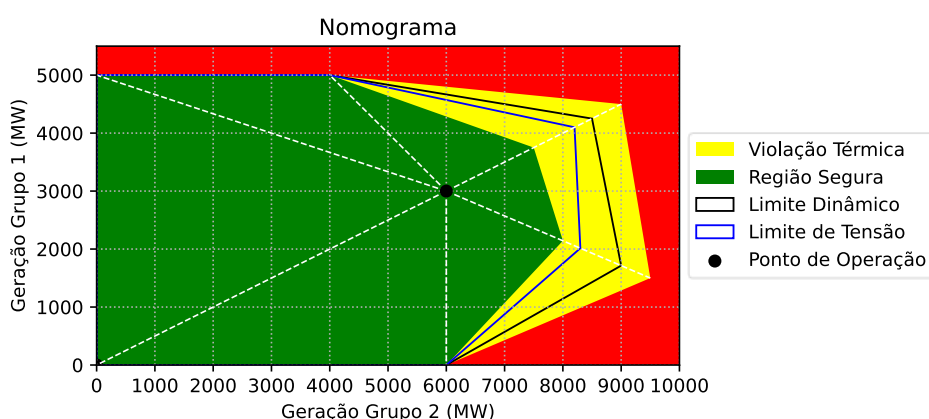
A metodologia é dividida em duas etapas principais: simulação de regiões de segurança e processamento dos dados históricos. Cada etapa é detalhada a seguir, assim como a combinação de ambas.

Simulação de Região de Segurança

Na primeira etapa, a região de segurança é realizada por meio de simulações computacionais utilizando programas específicos, como por exemplo o ANAREDE e ORGANON desenvolvidos por (CEPEL) e (HPPA) respectivamente.

Como pode ser observado através da **Figura 3.2**, o nomograma é a projeções da região de segurança de um par de grupo geração. Dessa forma, cada eixo do nomograma representa o montante total de geração de potência ativa para cada cenário de transferência de geração de potência. Além disso, o nomograma destaca a localização do ponto de operação do caso base (ponto preto) e o quão distante está da primeira violação dentre as grandezas monitoradas (tensão, fluxo e estabilidade dinâmica) (CEPEL, 2022).

Figura 3.2: Nomograma típico de programas computacionais como ANAREDE e ORGANON



Fonte: próprio autor a partir de (CEPEL, 2022).

A **Figura 3.2** também destaca a legenda e a nomenclatura das áreas, caracterizando a violação das grandezas elétricas monitoradas durante a solução automática e formação da região de segurança, a saber (CEPEL, 2022):

- Área verde (região segura): representa a região segura que o sistema pode operar, ou seja, tanto a solução do fluxo de potência para o caso base do cenário de transferência de geração, quanto a solução do fluxo de potência com o sistema sob contingência, não violou nenhuma das grandezas monitoradas.
- Área delimitada pela linha azul (limite de tensão): a solução do fluxo de potência para o caso base do cenário de transferência de geração, quanto a solução do fluxo de potência com o sistema sob contingência, não violou o limite de tensão do sistema elétrico.
- Área Amarela (violação térmica): esta área destaca a região que há violação do limite de carregamento de pelo menos um circuito do sistema. Esta violação pode ocorrer na solução do fluxo de potência para o caso base de transferência de geração ou para alguma contingência estudada.
- Área delimitada pela linha preta (limite dinâmico): a solução do fluxo de potência para o caso base do cenário de transferência de geração, quanto a solução do fluxo de potência com o sistema sob contingência, não violou o limite de estabilidade dinâmica.
- Região Vermelha: Nesta área, a solução do fluxo de potência obtida através da avaliação de pelo menos uma contingência, foi não convergente ou divergente, ou seja, nesta área, não foi encontrado solução de fluxo de potência.

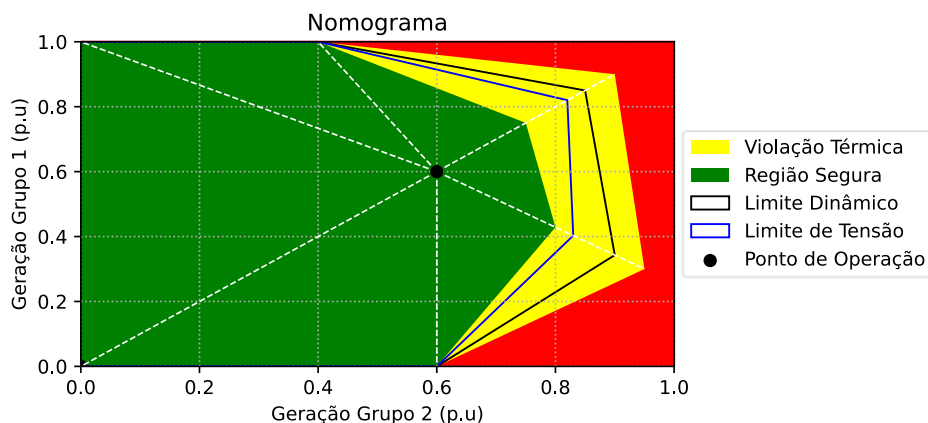
Transformação p.u da Regiões de Segurança

A transformação por unidade (p.u) é uma técnica amplamente utilizada para simplificar e padronizar os cálculos e análises em sistemas elétricos de potência. Essa abordagem permite expressar as grandezas

elétricas em termos de valores relativos em relação a uma base pré-determinada, eliminando a necessidade de considerar unidades absolutas.

No caso particular de normalização de região de segurança, as grandezas são normalizadas em relação a duas bases pré-definida, que deve ser escolhida de acordo da capacidade instalada dos grupos de geração que formam a região de segurança, ou seja, cada eixo do nomograma da **Figura 3.2** será normalizado de acordo com a capacidade máxima de geração do grupo (potência instalada do grupo), resultando no nomograma da **Figura 3.3**.

Figura 3.3: Nomograma normalizado em p.u ($BASE_{G1max} = 5.000 \text{ MW}$ e $BASE_{maxG2}=10.000 \text{ MW}$)



Fonte: próprio autor

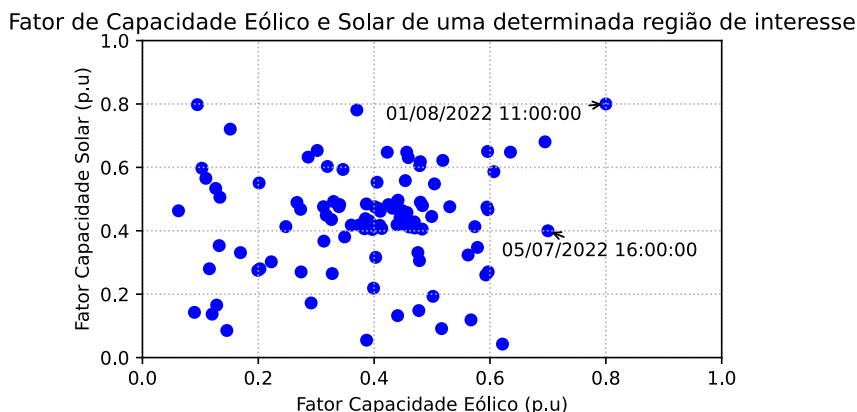
Uma vez que todas as grandezas estão na mesma base, torna-se mais fácil comparar e analisar o comportamento do sistema, já que os dados de fator de capacidade dos grupos de geração abordados na subseção seguinte, também estarão em p.u. Além disso, a transformação p.u simplifica a representação das grandezas, tornando-as adimensionais e reduzindo a complexidade dos cálculos.

Processamento dos Dados Históricos

A segunda etapa da metodologia envolve o processamento dos dados históricos de fatores de capacidade das usinas eólicas e solares. Esses dados foram obtidos no portal de Dados Abertos do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) que contém informações registradas de hora em hora das usinas em operação de 2019 até o momento.

Utilizando um algoritmo desenvolvido em linguagem *Python*, filtra-se os dados de geração eólica e solar de conjuntos de geração de uma região de interesse. Com os dados de geração e a capacidade instalada desses conjuntos, obtém-se os fatores de capacidades para de geração eólica e solar, também discretizados de hora em hora. Vale ressaltar que, como os fatores de capacidade eólico e solar estão discretizados de hora em hora, naturalmente, esses dados estão temporalmente correlacionados. O gráfico da **Figura 3.4** mostra o formato dos dados de fatores de capacidade eólico e solar temporalmente correlacionados.

Figura 3.4: Fatores de capacidade eólico e solar temporalmente correlacionados



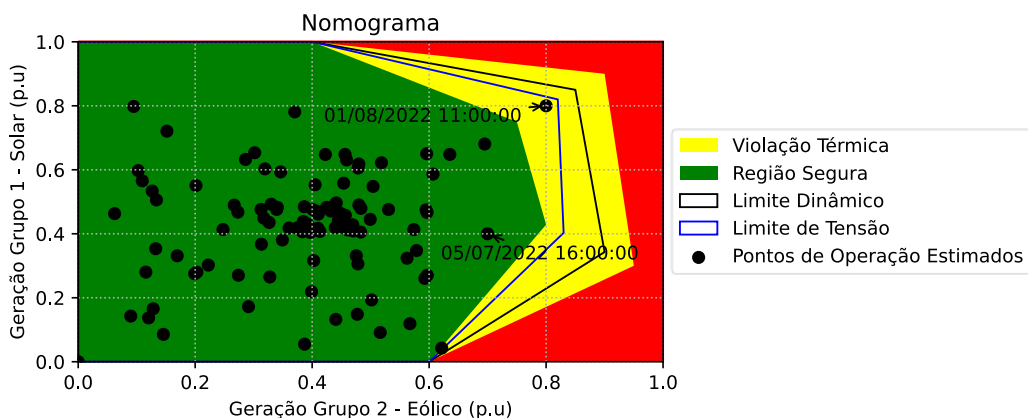
Fonte: próprio autor

Combinação das Etapas

Os dados então são utilizados para gerar as coordenadas sobre a região de segurança simulada. A combinação desses pontos forma a representação gráfica da região de segurança, na qual os pontos posicionados na área verde indicam combinações seguras de despacho de geração eólica e solar, enquanto os pontos posicionados na área amarela indicam as combinações de geração eólica e solar que podem causar problemas de sobrecarga na malha de transmissão.

Dessa forma, ao combinar as simulações de regiões de segurança (**Figura 3.3**) com os dados históricos de fatores de capacidade (**Figura 3.4**), obtém-se uma região de segurança (**Figura 3.5**) que permite uma análise abrangente dos despachos de geração eólica e solar baseada em dados históricos e de fatores limitantes do sistema elétrico.

Figura 3.5: Região de segurança combinada com os dados de fator de capacidade eólica e solar



Fonte: próprio autor

Na próxima seção, apresentaremos os resultados de um estudo de caso realizado utilizando a metodologia proposta.

4. RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO

Nesta seção, apresentaremos os resultados de um estudo de caso utilizando a metodologia proposta. O objetivo deste estudo de caso é avaliar o impacto gerado pela produção de energia nas usinas situadas nos estados do Rio Grande do Norte e Ceará, em relação ao carregamento da linha de transmissão de 230 kV Lagoa Nova II - Paraíso C8, durante a contingência da linha de transmissão de 230 kV Lagoa Nova II - Paraíso C7 (circuito em paralelo), considerando o horizonte de 2027.

Estudo de Caso

A análise realizada contempla a configuração de rede referente a dezembro de 2027, no cenário Nordeste exportador, carga média, considerando a base de dados (casos de fluxo de potência) do Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo do SIN – PAR/PEL 2023, Ciclo 2023-2027. Essa base de dados encontra-se disponível em (ONS).

Durante a simulação, foi realizado o monitoramento da linha de transmissão LT 230 kV Lagoa Nova II - Paraíso C8 em face da contingência ocorrida na linha de transmissão LT 230 kV Lagoa Nova II - Paraíso C7.

Foram empregados grupos específicos de geração, cujos detalhes podem ser encontrados na **Tabela 4-1**. Esses geradores foram selecionados devido ao impacto significativo que exercem sobre o carregamento do circuito monitorado.

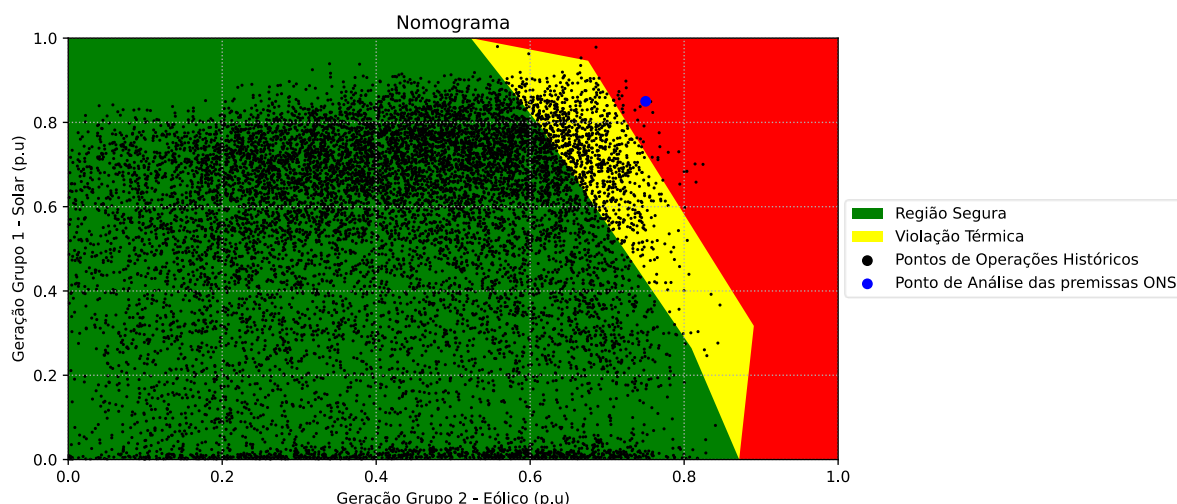
Tabela 4-1: Grupos de geração utilizados no estudo de caso

Grupo de geração	Usinas	Capacidade Instalada (MW)
GRUPO 1	Eólicas do Rio Grande do Norte e Ceará no horizonte de 2027	12.886,8
GRUPO 2	Solar do Rio Grande do Norte e Ceará no horizonte de 2027	6.205,0
GRUPO 3 (SWING)	Hidroelétricas da Bacia do Grande, Bacia do Paranaíba e do Rio São Francisco	26.539,0

Fonte: próprio autor

Com base nos dados históricos de 2020 a 2022 disponibilizados em (ONS), foi possível determinar a curva de fator de capacidade da geração eólica e solar nos estados do Rio Grande do Norte e Ceará ao longo desses três anos. Além disso, foram selecionados os dados referentes ao período das 7h às 18h, que corresponde ao horário de geração solar. A **Figura 4.6** apresenta a combinação da região de segurança com os dados de fator de capacidade.

Figura 4.6: Região de segurança combinada com os dados de fatores de capacidade eólico e solar



Fonte: próprio autor

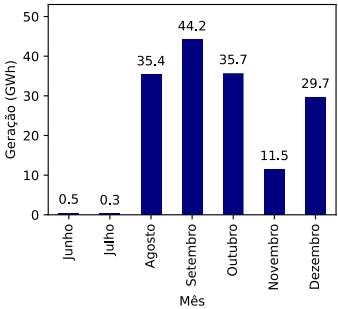
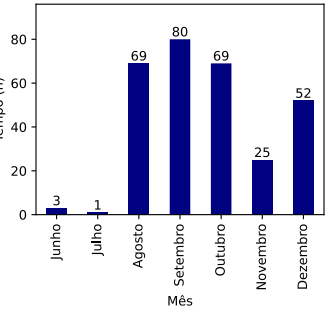
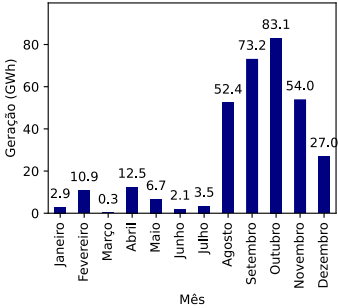
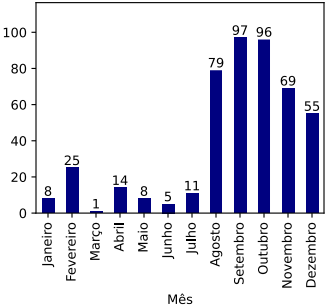
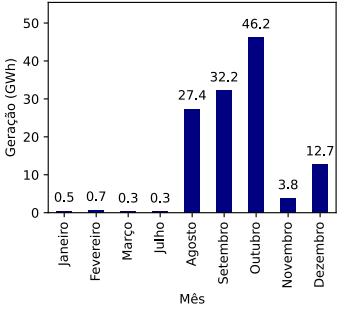
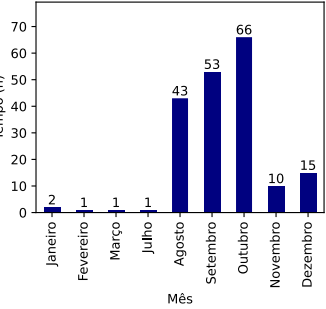
Diagnóstico de Rede

A **Figura 4.6** apresenta a combinação da região de segurança com os dados de fator de capacidade, demonstrando visualmente a relação entre a geração de energia eólica e solar e a capacidade de

transmissão da linha monitorada. Essa representação gráfica é fundamental para identificar as possíveis restrições na geração devido à contingência na linha de transmissão.

Ao utilizar o nomograma da **Figura 4.6** e um algoritmo em Python para classificar os pontos das curvas de fator de capacidade de geração eólica e solar, foi possível determinar quais pontos estão na região segura ou não. Isso permitiu estimar os montantes energéticos em GWh que podem ser restritos nas gerações eólica e solar dos grupos analisados devido à contingência estudada. Os gráficos da **Figura 4.7.a**, da **Figura 4.7.c** e da **Figura 4.7.e** apresentam os montantes estimados restritos para cada mês do ano, utilizando os dados históricos de 2020, 2021 e 2022, respectivamente. Esses gráficos fornecem uma visão geral das possíveis restrições ao longo do tempo.

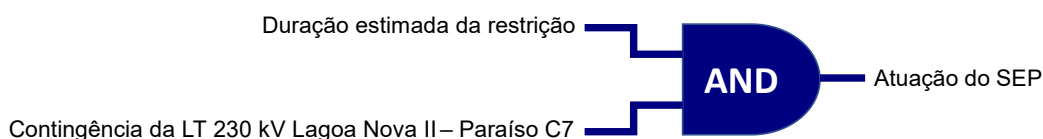
Figura 4.7: Quantitativos energéticos e tempos estimados de restrição – Análise das 7h às 18h

Figura 4.7.a Quantitativos energético restritos estimados em 2028 a partir dos dados de fator de capacidade de 2020 	Figura 4.7.b Tempo de restrição estimado em 2028 a partir dos dados de fator de capacidade de 2020 	Restrição estimada: 157.2 GWh (0.4%) Capacidade de geração estimada: 35303.3 GWh (100%) Duração estimada da restrição: 299 h (6.8%) Quantidade de horas analisadas: 4392 h (100%) Capacidade Instalada Eólica RN e CE: 12886.8 MW Capacidade Instalada Solar RN e CE: 6205.1 MW
Figura 4.7.c Quantitativos energético restritos estimados em 2028 a partir dos dados de fator de capacidade de 2021 	Figura 4.7.d Tempo de restrição estimado em 2028 a partir dos dados de fator de capacidade de 2021 	Restrição estimada: 328.5 GWh (0.8%) Capacidade de geração estimada: 40803.2 GWh (100%) Duração estimada da restrição: 468 h (10.7%) Quantidade de horas analisadas: 4380 h (100%) Capacidade Instalada Eólica RN e CE: 12886.8 MW Capacidade Instalada Solar RN e CE: 6205.1 MW
Figura 4.7.e Quantitativos energético restritos estimados em 2028 a partir dos dados de fator de capacidade de 2022 	Figura 4.7.f Tempo de restrição estimado em 2028 a partir dos dados de fator de capacidade de 2022 	Restrição estimada: 124.0 GWh (0.3%) Capacidade de geração estimada: 35895.8 GWh (100%) Duração estimada da restrição: 192 h (4.4%) Quantidade de horas analisadas: 4380 h (100%) Capacidade Instalada Eólica: 12886.8 MW Capacidade Instalada Solar: 6205.1 MW

Fonte: próprio autor

Além disso, a metodologia permitiu estimar o tempo em horas que essas restrições poderão ocorrer. Os gráficos da **Figura 4.7.b**, **Figura 4.7.d** e **Figura 4.7.f** mostram os tempos estimados associados as restrições para cada mês do ano a partir dos dados históricos de 2020, 2021 e 2022 respectivamente. Essa estimativa é relevante para subsidiar estudos de esquemas especiais de proteção (SEP) de corte de geração, a fim de evitar possíveis sobrecargas no sistema elétrico. O tempo das restrições está associado às possíveis atuações desses SEP, evidenciando a vulnerabilidade do sistema e a necessidade de medidas preventivas (**Figura 4.8**).

Figura 4.8: Vulnerabilidade devido a atuação de SEP



Fonte: próprio autor

Portanto, os resultados obtidos por meio desta metodologia robusta fornecem informações valiosas para a gestão e o planejamento do sistema elétrico, permitindo uma melhor compreensão dos impactos das contingências nas gerações eólica e solar. A estimativa dos montantes energéticos restritos e dos tempos de restrição auxilia na tomada de decisões estratégicas, como a implementação de esquemas especiais de proteção e o desenvolvimento de medidas de mitigação.

5. CONCLUSÕES E DIREÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Neste estudo, apresentamos uma metodologia inovadora para a análise do fluxo de potência de energia elétrica, focada em avaliar os impactos da geração eólica e solar na malha de transmissão do SIN frente as características de complementariedade dessas fontes. A abordagem proposta combina simulações de regiões de segurança com dados históricos de fatores de capacidade, permitindo uma análise abrangente e precisa dos despachos de geração, levando em consideração a correlação temporal entre essas fontes de energia.

A confiabilidade e a segurança do sistema elétrico são questões críticas, especialmente diante da crescente participação da geração eólica e solar. A análise e a compreensão dos impactos dessas fontes de energia renovável na malha de transmissão são essenciais para garantir um fornecimento estável de eletricidade.

O estudo de caso realizado demonstrou a eficácia da metodologia proposta, fornecendo insights valiosos sobre as restrições na geração devido a contingências na rede de transmissão. A estimativa dos montantes energéticos restritos e dos tempos de restrição contribui para o planejamento e a operação eficientes do sistema elétrico, permitindo a implementação de medidas de proteção e a redução dos impactos negativos.

É importante destacar que a metodologia desenvolvida pode ser aplicada a diferentes cenários e configurações de rede, fornecendo uma ferramenta poderosa para a análise e a gestão da geração eólica e solar. Além disso, é recomendado o contínuo aprimoramento da metodologia, considerando a inclusão de outros parâmetros relevantes, como a previsão de demanda e a análise de diferentes cenários climáticos.

Diante desses resultados, fica evidente que a metodologia proposta traz benefícios significativos para o setor elétrico. Ao levar em consideração a correlação entre os despachos de geração eólica e solar, é possível explorar o potencial dessas fontes de energia de forma mais eficiente, garantindo a segurança operacional da malha de transmissão.

No entanto, este estudo também abre espaço para pesquisas futuras e aprimoramentos na metodologia proposta. Algumas direções possíveis para pesquisas futuras são:

- Incorporação de incertezas: A metodologia proposta poderia ser estendida para considerar incertezas associadas aos fatores de capacidade das usinas eólicas e solares. A incorporação de modelos de previsão de geração mais precisos, como por exemplo, redes neurais e técnicas de análise de incerteza poderiam fornecer estimativas mais confiáveis dos impactos na malha de transmissão.
- Consideração de outras fontes de energia: Além da geração eólica e solar, outras fontes de energia, como hidrelétrica, térmica e biomassa, também desempenham um papel importante no sistema elétrico. Seria interessante investigar como a metodologia proposta poderia ser estendida para incluir essas fontes e avaliar os efeitos combinados na malha de transmissão.
- Análise de outros cenários e sistemas: O estudo de caso realizado neste trabalho focou em uma região específica do Brasil. No entanto, a metodologia proposta pode ser aplicada em diferentes cenários e sistemas elétricos. Seria relevante explorar como a abordagem se comporta em outros contextos, considerando características regionais, diferentes capacidades de geração e configurações de rede.
- Integração de sistemas de armazenamento de energia: Com o crescente interesse em sistemas de armazenamento de energia, seria interessante investigar como a metodologia proposta poderia ser estendida para considerar a presença e o uso de armazenamento de energia, avaliando seu impacto na segurança operacional da malha de transmissão.

Dessa forma, a metodologia proposta neste estudo apresenta resultados promissores e abre caminho para avanços significativos na análise do fluxo de potência de energia elétrica, especialmente no contexto da geração eólica e solar. A consideração da correlação entre essas fontes e o uso de dados históricos de fatores de capacidade permitem uma análise mais precisa e eficiente dos despachos de geração, resultando em um melhor aproveitamento da malha de transmissão. As direções sugeridas para pesquisas futuras têm o potencial de aprimorar ainda mais a metodologia e contribuir para a evolução do setor elétrico rumo a um sistema mais sustentável, seguro e eficiente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo, propusemos uma nova metodologia para estudar o fluxo de potência de energia elétrica e avaliar os impactos da geração eólica e solar na malha de transmissão do SIN. A metodologia desenvolvida combina simulações de regiões de segurança com dados históricos de fatores de capacidade, levando em consideração a correlação entre as fontes de energia renovável.

Em suma, este trabalho destaca a importância de uma análise aprofundada e precisa do fluxo de potência no contexto da geração eólica e solar. A metodologia proposta apresenta uma abordagem inovadora e eficiente para avaliar os impactos dessas fontes de energia na malha de transmissão, considerando a correlação entre os despachos e levando em conta dados históricos de fatores de capacidade.

No futuro, espera-se que essa metodologia seja aprimorada e aplicada em diferentes contextos e sistemas elétricos, considerando incertezas e a integração de outras fontes de energia, como hidrelétrica, térmica e biomassa, além da avaliação do impacto do armazenamento de energia. Com essas contribuições, avançaremos em direção a um setor elétrico mais sustentável, eficiente e seguro, impulsionado pela ampla adoção de fontes de energia renovável.

REFERÊNCIAS

ARULKUMAR, K.; PALANISAMY, K.; VIJAYAKUMAR, D. **Recent Advances and Control Techniques in Grid Connected Pv System – A Review**. In: International Journal of Renewable Energy Research, 2016.

BARROS, A. M. L. et al. **Complementariedade entre a Geração Eólica e Solar do Interior do Nordeste e seus Impactos nos Estudos Elétricos**. In: Brazil Windpower, 2021. p. 69–81.

CEPEL. **Programa de Análise de Redes V11.06.02**. Manual do Usuário. [S.l.]. 2022.

CEPEL. ANAREDE: **Análise de sistemas elétricos de potência em regime permanente**. Disponível em: <<https://www.cepel.br/produtos/anared-2/>>. Acesso em: 27 junho 2023.

GLOVER, J. D.; SARMA, M. ; OVERBYE, T.. **Power System analysis and design**. 5ª. ed. Stamford: CENGAGE Learning, 2012.

HPPA. **High Performance Power Systems Applications**. Products. Disponível em: <<https://www.hppa.com.br/>>. Acesso em: 27 junho 2023.

JARDIM, J. L.; NETO, C. S.; KWASNICKI, W. T. **Design features of a dynamic security assessment system**. In: Power Systems Conference and Exposition. IEEE PES. [S.l.: s.n.], 2004. p. 446–452.

JARDIM, J. L.; NETO, C. S.; SANTOS, M. G. D. **Brazilian system operator online security assessment system**. In: IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. [S.l.: s.n.], 2006. p. 7–12.

ONS. PLANEJAMENTO ELÉTRICO. **AValiação Técnica do Acesso e Contratação do MUST**. Disponível em: <<https://sintegre.ons.org.br/sites/8/42/58/paginas/servicos/historico-de-produtos.aspx?produto=>>>. Acesso em: 27 junho 2023.

ONS. **Portal de Dados Abertos**. Disponível em: <<https://dados.ons.org.br/>>. Acesso em: 27 junho 2023.