LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

Ampliando Horizontes em Energia Renovável: Expansão de Amostras com Geração de Valores Utilizando Teoria de Cópulas

Tuany Barcellos[1], Rafaela Ribeiro[1], Gustavo Melo[1], Paula Maçaira[1], Fernando Cyrino[1], Bruno Fanzeres[1]
tuanybarcellos@aluno.puc-rio.br, rafaelamaribeiro@aluno.puc-rio.br, gustavomelo@aluno.puc-rio.br, paulamacaira@puc-rio.br, cyrino@puc-rio.br, bruno.santos@puc-rio.br
[1]Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janaeiro
Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea, Rio de Janeiro, Brasil

RESUMO

A teoria de cópulas é uma abordagem estatística que permite modelar de forma conjunta as dependências entre variáveis aleatórias, ultrapassando as medidas tradicionais de correlação ao capturar estruturas de dependência multivariada. Este estudo utiliza a teoria de cópulas para expandir uma base de dados de energia renovável, com ênfase na interação entre o fator de capacidade (FC) da Usina eólica do Tianguá e a Energia Natural Afluente (ENA) do Reservatório Equivalente de Energia (REE) do Nordeste em diferentes fases do fenômeno El Niño-Southern Oscillation (ENSO). Inicialmente, foram coletados dados históricos do fator de capacidade e ENA, segmentados conforme as fases do ENSO e subdivididos mensalmente. Contudo, essa segmentação reduziu significativamente as observações disponíveis, exigindo a geração de dados simulados para ampliar a base de dados. A teoria de cópulas possibilitou a modelagem conjunta do fator de capacidade e ENA para todas as subdivisões da base inicial, resultando em um conjunto expandido representativo do histórico dessas variáveis para uma análise da interação entre essas variáveis sob diferentes fases do fenômeno ENSO.

KEYWORDS. Cópulas, Energia Renovável, Expansão Amostral.

Tópicos (EST&MP – Estatística e Modelos Probabilísticos, EN&PG – PO na Área de Energia, Petróleo e Gás)

ABSTRACT

Copula theory is a statistical approach that allows for the joint modeling of dependencies between random variables, surpassing traditional correlation measures by capturing multivariate dependency structures. This study employs copula theory to expand a renewable energy database, emphasizing the interaction between a wind turbine's capacity factor and Afluent Natural Energy (ANE) across various phases of the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) phenomenon. Initially, historical data of capacity factor and ANE were collected, segmented according to ENSO phases, and subdivided monthly. However, this segmentation significantly reduced available observations, necessitating the generation of simulated data. Copula theory facilitated the joint modeling of the capacity factor and ANE for all subdivisions of the initial dataset, resulting in an expanded and representative dataset for an efficient analysis of the interaction between these variables under different ENSO phases and months.

KEYWORDS. Copulas, Renewable Energy, Sample Expansion

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193529
https://proceedings.science/p/193529?lang=pt-br

1. Introdução

Nos últimos anos, o Brasil tem se destacado como um dos principais atores no cenário global de energia renovável, especialmente no setor de energia eólica. Impulsionado por políticas governamentais favoráveis, avanços tecnológicos e a abundância de recursos naturais, a capacidade instalada de energia eólica cresce exponencialmente [RISUS, 2019]. Desde os primeiros parques eólicos implantados no início dos anos 2000, o Brasil passou a ocupar a liderança na América Latina, consolidando-se como o maior mercado da região e um dos dez maiores do mundo [Bezerra, 2021].

A geração de cenários eólicos correlacionados com outras fontes, especialmente a hídrica, é fundamental para o setor energético no Brasil, dado o caráter complementar e estrutura de dependência entre essas fontes de energia. A energia eólica, embora intermitente, pode ser harmoniosamente integrada com a energia hídrica, facilitando o planejamento energético e reduzindo a intermitência dos sistemas elétricos [Prado, 2021]. Durante períodos de seca, quando a geração hídrica é reduzida, os ventos, particularmente fortes nas regiões Nordeste e Sul do Brasil, podem suprir a demanda energética de maneira eficaz. Essa estrutura complementar não apenas melhora a estabilidade e a segurança do sistema elétrico nacional, mas também otimiza a utilização dos recursos naturais, reduzindo a necessidade de acionamento de termelétricas, mais caras e poluentes. Além disso, a complementariedade entre as fontes eólica e hídrica permite melhor gestão dos reservatórios, assegurando uma distribuição mais equilibrada e sustentável da energia ao longo do ano. Portanto, a integração dessas fontes renováveis é vital para promover a diversificação da matriz energética brasileira, aumentar a resiliência do sistema elétrico e avançar na direção de um futuro energético mais sustentável e menos dependente de combustíveis fósseis [Siciliano, 2010].

Outro fator importante a ser ressaltado é relacionado a fenômenos climáticos, particularmente o *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO), o qual exerce uma influência significativa nos recursos renováveis. As diferentes fases do ENSO - Neutra, El Niño e La Niña - alteram os padrões de vento e precipitação nas diferentes regiões do Brasil e do mundo, impactando diretamente a geração de energia [Nunes et al., 2023].

Compreendendo os impactos significativos dos fenômenos climáticos, especialmente do ENSO, na geração de energia renovável, torna-se evidente a necessidade de abordagens analíticas avançadas para modelar a complexa relação entre energia eólica e hídrica [Marengo et al., 2008]. A variação nas fases do ENSO não apenas afeta diretamente os padrões de vento e precipitação em diferentes regiões, como também influencia a disponibilidade e a demanda por energia [Bezerra, 2023]. Nesse contexto, a teoria de cópulas emerge como uma ferramenta capaz de capturar a dependência entre essas fontes de forma precisa. Tal abordagem é eficaz na análise da estrutura de dependência entre variáveis, especialmente quando se trata de relacionamentos complexos, como os existentes entre energia eólica e hídrica [Pereira, 2023]. Ao aplicar a teoria de cópulas, pode-se identificar a natureza da dependência entre essas variáveis, compreender como elas se relacionam em diferentes cenários e contextos. Isso se deve à capacidade das cópulas de correlações lineares e não lineares, assimetrias e até mesmo dependências condicionais, fornecendo uma visão abrangente e realista da interação entre as fontes. Essa abordagem permite analisar padrões de complementaridade e das influências de fatores externos, como o ENSO, na dinâmica dessas fontes de energia [dos Anjos et al., 2004].

Isto posto, neste estudo, são consideradas as variáveis de fator de capacidade eólica do Parque Eólico Ventos de Tianguá, localizado no estado do Ceará, e a Energia Natural Afluente (ENA) do Reservatório de Energia Equivalente (REE) do Nordeste durante o mês de agosto, abrangendo o período de 1980 a 2021, ou seja, todos os meses de agosto ao longo desses anos. Essas variáveis foram submetidas a um processo de filtragem com base nas fases do fenômeno ENSO,

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193529
https://proceedings.science/p/193529?lang=pt-br

englobando as fases Neutra, El Niño e La Niña. Contudo, constatou-se uma redução significativa nos dados disponíveis após a aplicação desse filtro temporal e climático. Diante desse contexto, tornou-se necessário recorrer a ferramentas que possibilitassem a expansão da amostra, garantindo assim a fidelidade das gerações futuras de cenários, em conformidade com a estrutura de dependência e a relação entre as variáveis. Isso conduziu à adoção da teoria de cópulas para a ampliação da base de dados, uma vez que essa abordagem permite expandir a amostra sem comprometer as características de dependência e relação entre as variáveis, resultando em simulações futuras mais sólidas e representativas.

Este trabalho está dividido em cinco seções: Introdução, Referencial Teórico, Metodologia, Resultados e Discussões, e, por fim, Conclusões. A seção de Referencial Teórico discute os fundamentos teóricos, a Metodologia detalha os procedimentos utilizados, os Resultados e Discussões apresentam as análises realizadas, e a Conclusão sintetiza as descobertas do estudo e suas implicações futuras. Essa estrutura proporciona uma análise abrangente e organizada do tema tratado.

2. Referencial Teórico

No cenário energético brasileiro, a energia eólica tem desempenhado um papel significativo como uma fonte limpa e renovável de eletricidade. O Brasil possui um vasto potencial eólico, especialmente em regiões costeiras e em áreas de grande altitude, proporcionando condições favoráveis para o desenvolvimento de parques eólicos de alta capacidade. Essa abundância de recursos eólicos tem impulsionado investimentos no setor, resultando em um crescimento substancial da capacidade instalada nos últimos anos [MME, 2020].

De acordo com GWEC (2024), o setor eólico brasileiro se destaca como um dos mais promissores do mundo, ocupando a sexta posição em termos de capacidade instalada global, com 17,9 GW de potência em 2023. Essa posição consolidada é resultado do crescimento exponencial da geração eólica no país nos últimos anos, impulsionado por diversos fatores determinantes, como por exemplo o potencial eólico abundante do Brasil, estimado em 140 GW de capacidade técnica [GWEC, 2024]. A vasta disponibilidade de recursos naturais favoráveis ao vento possibilita a expansão do setor, garantindo a viabilidade de projetos de grande porte e reforçando a atratividade de investimentos nesse segmento.

Abordando sobre a matriz elétrica brasileira, pode-se destacar a presença crescente da energia eólica, que se soma à significativa participação das usinas hidrelétricas na geração de eletricidade. A expansão da energia eólica tem sido significativa, contribuindo de maneira substancial para a manutenção de uma matriz elétrica majoritariamente renovável. O crescimento expressivo da capacidade instalada de parques eólicos reflete não apenas o potencial eólico abundante do Brasil, mas também a crescente competitividade e atratividade dessa fonte de energia em relação a outras formas de geração [EPE, 2024].

Ressalta-se, que pesquisas no contexto brasileiro têm explorado o uso da teoria de cópulas para modelar a relação entre fontes eólicas e hídricas. Avila (2021) [Ávila et al., 2021] aplicou cópulas para avaliar a complementariedade entre essas fontes no Brasil, demonstrando que a modelagem por meio de cópulas oferece uma representação mais precisa da dependência entre variáveis e aprimora a eficiência na geração de cenários para planejamento energético. Esta abordagem é importante para a otimização dos recursos renováveis e para assegurar uma oferta energética estável e sustentável [Ávila et al., 2021].

Yoo et al. (2023) [Yoo et al., 2023] desenvolveram um método de geração de cenários de produção de energia eólica baseado em funções de cópula e erros de previsão. O estudo, realizado na Coreia do Sul, utilizou dados de produção de energia eólica e previsões meteorológicas. Os autores aplicaram cópulas para modelar a dependência entre os erros de previsão e a produção de energia,

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193529
https://proceedings.science/p/193529?lang=pt-br

gerando cenários mais realistas que refletem as incertezas inerentes às previsões. Esta metodologia é útil na avaliação de riscos e na tomada de decisões em sistemas de energia que incorporam grandes proporções de energia renovável.

A teoria de cópulas tem se revelado eficaz na geração de cenários que consideram a relação entre fontes eólicas e hídricas, proporcionando uma compreensão mais aprofundada da complementariedade entre essas fontes. Estudos recentes demonstram que as cópulas são capazes de capturar a complexa dependência entre variáveis de produção de energia, permitindo simulações mais realistas [Zhang et al., 2018]. Zhang et al. (2018) aplicaram cópulas para analisar a complementariedade entre energia solar e eólica, encontrando resultados que aprimoram a previsibilidade e a gestão da geração de energia renovável.

Além disso, a aplicação da teoria de cópulas em estudos de energia renovável tem sido recomendada para análises que visam compreender a relação de dependência entre dados de diferentes fontes. As cópulas são especialmente adequadas para modelar dependências extremas e para gerar distribuições conjuntas que preservam as características das distribuições marginais [Genest e Favre, 2007]. Essa capacidade é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento de risco e planejamento de sistemas de energia, particularmente em regiões com alta variabilidade climática [Aas et al., 2009].

2.1. Relação Eólica/ENA e a influência do fenômeno ENSO

A análise da complexa relação entre a geração de energia eólica e hídrica, juntamente com a influência do fenômeno ENSO nas gerações energéticas do Brasil, é fundamental para a compreensão eficaz do sistema elétrico nacional, sendo essencial para a geração de cenários coerentes com a realidade. A interação dinâmica entre essas fontes de energia, influenciada por fatores climáticos como ventos e precipitação, e pelos padrões de variação do ENSO, desempenha um papel crucial na estabilidade e na diversificação da matriz energética brasileira [Reis et al., 2011].

A energia eólica, devido à sua dependência direta dos padrões de vento, e a energia hídrica, que está intimamente ligada aos níveis de precipitação, possuem características complementares que podem ser intensificadas ou reduzidas conforme as fases do fenômeno ENSO. Durante períodos de El Niño, é frequente observar alterações nos padrões de vento e precipitação, influenciando de maneiras diversas a geração de energia eólica e hídrica. Essas variações climáticas têm o potencial de afetar não apenas a quantidade total de energia gerada, mas também a sua distribuição temporal e espacial [Cavalcanti et al., 2020].

Ao compreender a complexidade dessas relações e a influência do ENSO nas gerações energéticas, torna-se possível desenvolver estratégias mais eficientes de planejamento e operação do sistema elétrico brasileiro. Isso inclui a utilização de modelos matemáticos, como a teoria de cópulas, para capturar a dependência entre as variáveis climáticas e as gerações de energia.

2.2. Escassez de Dados

Tal como informado na Introdução (Seção 1), a base de dados inicial consiste em dados mensais de Janeiro de 1980 a Dezembro de 2021, ou seja, 42 anos de dados mensais. Como o objetivo é analisar esses dados considerando os meses e as fases ENSO, ao final do pré-processamento haviam pouquíssimos dados disponíveis para futuras simulações. Como os dados foram discretizados, primeiramente, por mês, foram obtidos 42 dados para cada mês do ano, o que já não caracteriza grande variedade. Após este processo, foi-se necessário discretizar os dados novamente. O mês de agosto será considerado como exemplo para a explicação deste processo.

Sabe-se que há 42 dados referentes ao mês de Agosto do Parque Eólico Ventos de Tianguá e que há três possíveis fases do fenômeno ENSO – El Niño, quando as águas do Oceano Pacífico esquentam; La Niña, quando as águas do Oceano Pacífico esfriam; e Neutro, quando as águas do Oceano Pacífico não apresentam alteração significante em sua temperatura. Sabe-se que essas

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193529
https://proceedings.science/p/193529?lang=pt-br

anomalias têm influências diretas no comportamento dos ventos, principalmente no Brasil [Pinto, 2005]. Segundo [dos Santos e Santos e Silva, 2013], o El Niño é responsável pela diminuição da intensidade dos ventos alísios, enquanto que a La Niña aumenta a intensidade dos ventos alísios, mostrando que as duas fases tem efeitos opostos no comportamento do vento.

Como cada fase do fenômeno ENSO apresenta características distintas, essa divisão dos dados mostrou-se necessária para o processo de simulação. Durante 23 dos 42 anos, o mês de Agosto foi caracterizado pela fase Neutra, deixando menos da metade dos dados para cada uma das outras duas classes. A La Niña ocorre em 11 anos e o El Niño apenas em oito anos, tornando muito difícil a identificação do comportamento temporal dos dados.

2.3. Teoria de Cópulas

A Teoria de Cópulas, originalmente desenvolvida por [Sklar, 1959], emergiu como um pilar fundamental para a compreensão da interdependência entre variáveis aleatórias. No âmbito da Probabilidade e Estatística, a Teoria de Cópulas oferece um arcabouço robusto e matematicamente sofisticado para modelar a dependência entre variáveis aleatórias, possibilitando lidar de maneira eficiente com complexidades nas relações entre variáveis, especialmente quando as distribuições marginais dessas variáveis apresentam variações significativas.

Ao fornecer métodos avançados de análise, a Teoria de Cópulas permite uma abordagem mais precisa na quantificação das inter-relações entre variáveis, superando as limitações das tradicionais medidas de associação. Isso se torna especialmente relevante em contextos onde as relações entre variáveis não podem ser adequadamente descritas por métodos lineares ou univariados. Portanto, a utilização da Teoria de Cópulas abre caminho para uma compreensão mais aprofundada das estruturas de dependência em conjuntos de dados complexos e variados, possibilitando análises mais abrangentes nas mais diversas áreas de pesquisa [Joe, 1997].

De acordo com [Nelsen, 2006] a teoria de cópulas tem como premissa básica o fato de que qualquer distribuição conjunta, multivariada, pode ser decomposta em componentes constituintes fundamentais:

1. **Distribuições Marginais:** representam o comportamento de cada variável aleatória de forma isolada, descrevendo suas características individuais sem considerar as interações entre elas.

2. **Cópula:** elemento que captura e expressa a estrutura de dependência existente entre as variáveis aleatórias, funcionando independentemente das formas das distribuições marginais.

Assim, o cerne da teoria de cópulas é encapsulado pelo Teorema de Sklar (1959) (1), que afirma que pode-se tratar uma distribuição multivariada pela sua estrutura de dependência, a cópula, e suas marginais.

Teorema 1. *Então, tendo uma distribuição conjunta n-dimensional denotada por F de um vetor de variáveis aleatórias $\boldsymbol{X} = (X_1, ..., X_n) \in \mathbb{R}^n$ com marginais $F_1(x_1), ..., F_n(x_n)$, existe uma função cópula C tal que:*

$$F(x_1, ..., x_n) = C(F_1(x_1), ..., F_n(x_n)) \tag{1}$$

Caso, $F_1, ..., F_n$ sejam contínuas, a C é única.

A partir do resultado da equação, obtêm-se a função cópula, sendo representada por C.

$$C(u_1, ..., u_n) = F(F_1^{-1}(u_1), ..., F_n^{-1}(u_n)),\ \forall\ u = (u_1, ..., u_n)\ \in\ [0, 1]^n \tag{2}$$

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193529
https://proceedings.science/p/193529?lang=pt-br

Sendo, F_i^{-1}, uma função inversa generalizada, ou seja, $F_1^{-1}(u_1), ..., F_n^{-1}(u_n)$, são as funções inversas de $F_1(x_1), ..., F_n(x_n)$.

Desta maneira, a distribuição multivariada das variáveis transformadas é denominada de cópula. A densidade associada a uma cópula é definida pelas derivadas parciais em relação a **u** da função $C(u_1, ..., u_n)$:

$$c(u_1, ..., u_n) = \frac{\partial C^n(u_1, ..., u_n)}{\partial u_1 ... \partial u_n} \tag{3}$$

Com isto, de acordo com o Teorema de Sklar (1959) (1), a densidade do vetor aleatório **X** pode ser escrita da seguinte forma:

$$f(x_1, ..., x_n) = c(u_1, ..., u_n) \prod_{i=1}^{n} f_i(x_i) \tag{4}$$

No qual, $u_1 = F_1(x_1; \theta_1), ..., u_n = F_n(x_n; \theta_n)$, sendo θ_i os vetores p_i dimensionais dos parâmetros das marginais, $i = 1, 2, ..., n$

Isto posto, a seleção de uma cópula apropriada é determinada pela natureza específica da dependência entre as variáveis em análise. Diversas famílias de cópulas, incluindo as Gaussiana, Clayton, Gumbel e Frank, foram desenvolvidas para capturar distintos padrões de dependência, cada uma com suas próprias características e aplicações preferenciais [Shi et al., 2021] [Joe, 2014].

Em suma, a Teoria de Cópulas se estabelece como uma ferramenta analítica de grande potência e versatilidade, permitindo a modelagem de relações complexas entre variáveis aleatórias de maneira eficaz [Chen et al., 2023]. Nesse sentido, emerge como um instrumento analítico para a simulação de dados multivariados, destacando-se, particularmente, quando o objetivo é gerar amostras ampliadas que exibam atributos específicos [Bedford e Cooke, 2002].

Deste modo, a Teoria de Cópulas se sobressai como uma metodologia avançada para a simulação de dados, e, no âmbito deste estudo, será aplicada para capturar a relação de dependência entre os recursos renováveis de uma usina eólica e a ENA do REE mais próximo da mesma. A partir das cópulas estimadas, valores serão sorteados para preencher a base dados de recursos com mais elementos, visando ampliar a base de dados.

3. Metodologia

Nesta seção, será apresentada a metodologia aplicada no estudo. O fluxograma da metodologia pode ser visualizado na Figura 1, onde a parte de pré-processamento já foi previamente explicada. Em seguida, temos a segunda fase, que consiste na simulação dos dados a partir da Teoria de Cópulas. Por fim, são apresentados os gráficos que auxiliam na visualização e análise dos resultados.

O primeiro passo da análise consistiu na identificação da distribuição probabilística marginal mais adequada para as variáveis de interesse – Fator de Capacidade (FC) e a ENA do REE Nordeste –, considerando as diferentes fases do fenômeno *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO) – Neutra, El Niño e La Niña – especificamente para o mês de agosto. Para essa determinação, foi empregado o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov para cada uma das variáveis, levando em conta cada fase climática e mês, totalizando assim a análise de seis distribuições referentes ao mês de agosto.

A metodologia adotada foi desenvolvida especificamente para enfrentar o desafio da escassez de dados após a aplicação de filtros mensais e por fase do fenômeno climático. Inicialmente, as distribuições marginais foram analisadas antes da filtragem, identificando que a distribuição beta representava adequadamente o Fator de Capacidade e a distribuição log-normal adequava-se à Energia Natural Afluente (ENA). Com essas distribuições determinadas a priori, foram realizadas novas

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193529
https://proceedings.science/p/193529?lang=pt-br

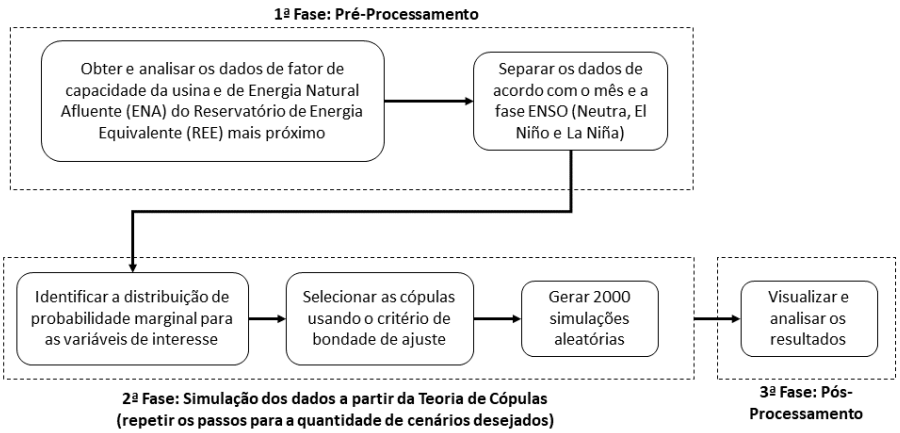


Figura 1: Fluxograma da metodologia de simulação de dados a partir da Teoria de Cópulas

análises após a filtragem e redução da base de dados. Os resultados dos testes indicaram que, mesmo com o número reduzido da amostras, as distribuições beta e log-normal continuavam a representar de maneira estatisticamente significativa as variáveis em questão para o mês de agosto e todas as fases climáticas. Esta abordagem foi fundamental para garantir a precisão dos resultados, mesmo diante da limitação de dados.

Com as distribuições marginais definidas a priori, avançou-se para a seleção das cópulas. Este processo é embasado, primordialmente, no critério de bondade de ajuste, utilizado para avaliar a capacidade de diferentes famílias de cópulas de capturar a estrutura de dependência subjacente aos dados. Tal critério é feito por meio de testes estatísticos específicos como os testes de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling ou Cramér-von Mises [Rémillard, 2017], que permitem quantificar o quão bem uma dada cópula se ajusta aos pares de dados observados.

4. Resultados e Discussões

Na presente seção, serão apresentadas as análises e resultados derivados da aplicação da teoria de cópulas para estimar novas observações destinadas a complementar a base de dados do Parque Eólico Ventos de Tianguá, localizado no município de Tianguá, estado do Ceará. Este parque possui uma potência instalada de 25,35 MW, integrando o Complexo Eólico Ventos de Tianguá, juntamente com outras unidades. O parque faz parte de uma importante iniciativa no contexto das energias renováveis no Nordeste brasileiro e está operando desde setembro de 2016.

Ressalta-se que a dependência temporal é contemplada através da consideração da série temporal de fenômeno climático (ENSO), que atua como um filtro fundamental para a nossa avaliação, juntamente com a divisão mensal. Esta abordagem permite capturar e incorporar a variação temporal dos dados climáticos, assegurando que a análise considere as flutuações e padrões sazonais que influenciam as variáveis de interesse. Ao integrar essas informações temporais, garantimos uma representação mais precisa das dinâmicas climáticas, permitindo uma modelagem mais eficaz da dependência entre as variáveis de interesse.

A base de dados utilizada contém duas variáveis principais: o fator de capacidade da usina e a Energia Natural Afluente (ENA) do Reservatório de Energia Equivalente (REE) mais próximo, neste caso, o REE Nordeste. A metodologia de cópulas foi aplicada para identificar as estruturas de dependência entre essas variáveis ao longo das três fases do fenômeno ENSO (Neutra, El Niño e La Niña) no período de janeiro de 1980 a dezembro de 2021, especificamente no mês de agosto. Essa abordagem permitiu uma análise mais profunda da interação entre o fator de capacidade e a ENA, considerando as diferentes condições climáticas ao longo do tempo. Dentre as análises realizadas, é apresentada a seguir a relação anual entre elas. Na Figura 2, apresentam-se as médias mensais

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193529
https://proceedings.science/p/193529?lang=pt-br

do histórico da usina e da ENA do REE associado/mais próximo. A complementaridade sazonal entre ambas é evidente. Enquanto nos meses iniciais do ano a ENA atinge seus níveis mais altos, a geração da usina está em seu menor patamar. Conforme o ano avança, os valores da ENA decrescem e o fator de capacidade aumenta, até atingir a média máxima.

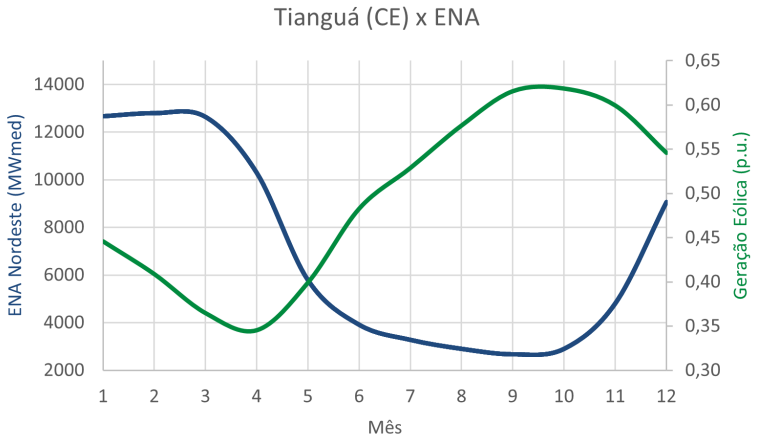


Figura 2: Média mensal da geração eólica da usina Tianguá e do REE mais próxima.

Como é explicado em [EPE, 2023], há diversas formas de complementariedade naturais entre as diversas fontes de energia. Todas ocorrem devido ao comportamento sazonal inerente das fontes, como por exemplo a relação entre energia eólica e térmica de biomassa, onde uma atinge o ápice no declínio da outra, e vice versa. O artigo [Scherner et al.] também encontra um comportamento de correlação negativa entre eólicas e hidrelétricas no Nordeste do Brasil, o mesmo que encontramos na Figura 2. Esse comportamento se mostra importante para o atendimento da demanda, já que fontes de energia renováveis não são constantes ao longo do ano. Assim, quando o REE apresenta menor vazão, a intensidade do vento da mesma região se mostra em alta, e vice versa, garantindo que uma fonte consegue complementar a outra.

Assim, a partir da metodologia proposta foram estimadas diversas famílias de cópulas para a usina por fase e por mês, sendo que o mês de agosto foi escolhido para este estudo de caso, por ser considerado um dos meses com as melhores velocidades de vento da região. A Tabela 1 apresenta as cópulas estimadas para o Complexo Eólico Ventos de Tianguá no mês de agosto, considerando as fases Neutra, El Niño e La Niña do fenômeno ENSO.

Tabela 1: Cópulas estimadas para o Complexo Eólico Ventos de Tianguá - Agosto

Fase	**Cópula**	**Parâmetros**	**Tau**
Neutra	t	$\theta = 0.37, \nu = 30$	0.24
El Niño	Rotated Joe 270°	$\theta = -1.8$	-0.31
La Niña	Gaussian	$\rho = 0.66$	0.46

Fonte: Elaboração própria com base nos dados analisados.

Para a fase Neutra, a cópula estimada foi a t-student com parâmetros $\theta = 0,37$ e $\nu = 30$, resultando em um coeficiente de correlação de 0,24. A cópula t é uma distribuição de t-Student que captura a dependência entre as variáveis, sendo especialmente sensível a caudas pesadas e *outliers* nos dados, sendo mais flexível do que outras cópulas para lidar com essas características. Essa cópula é uma escolha comum em análises estatísticas quando se deseja modelar a dependência entre variáveis que possuem comportamento semelhante à distribuição t-Student.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193529
https://proceedings.science/p/193529?lang=pt-br

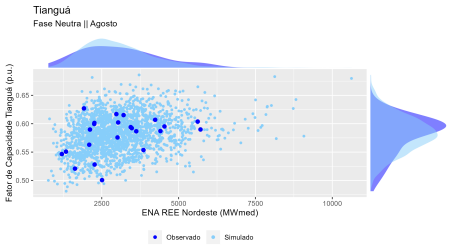
No caso da fase El Niño, a cópula estimada foi a Rotated Joe 270° com parâmetro $\theta = -1,8$ e coeficiente de correlação -0,31. A cópula Rotated Joe é uma variação da cópula Joe, utilizada para modelar dependências negativas e assimétricas. A rotação de 270 graus indica que a cópula foi girada para melhor ajuste aos dados. Ela é especialmente útil para descrever relações onde a dependência entre as variáveis é mais forte em extremos opostos das distribuições marginais. A cópula Rotated Joe 270° é aplicada em situações onde há uma relação inversa entre as variáveis, ou seja, quando uma aumenta, a outra tende a diminuir, e vice-versa.

Por fim, para a fase La Niña, a cópula estimada foi a Gaussian com parâmetro $\rho = 0,66$ e correlação de 0,46. A cópula Gaussian, também conhecida como cópula normal, é amplamente utilizada para modelar dependências lineares entre variáveis, a mesma pertence à família das cópulas arquimedianas. Essa cópula é especialmente útil para modelar situações em que as variáveis estão linearmente relacionadas, ou seja, quando uma mudança em uma variável está associada a uma mudança proporcional na outra variável.

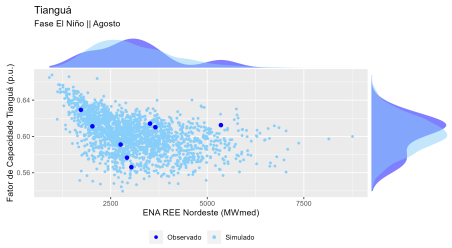
Esses resultados evidenciam a diversidade de estruturas de dependência encontradas nas diferentes fases climáticas, demonstrando a importância de considerar tais aspectos na modelagem e análise dos dados do Complexo Eólico Ventos de Tianguá.

A partir de cada cópula estimada, procedeu-se à geração de 2000 simulações aleatórias. Cada simulação corresponde a um par das duas variáveis analisadas. A seguir, ainda acerca do estudo de caso da Usina Tianguá no mês de agosto, são apresentadas e analisadas visualizações gráficas dos resultados obtidos.

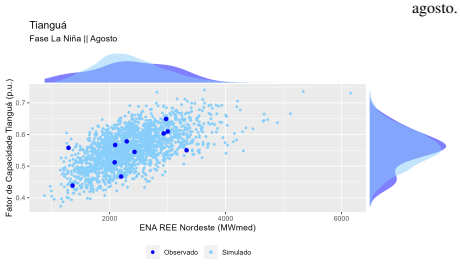
As Figuras 3a, 3b e 3c trazem os gráficos de dispersão (*scatter plot*) dos dados para as três fases. Em azul claro, tem-se os dados simulados a partir das cópulas, e em azul escuro os dados observados. Ademais, no eixo superior do gráfico, são apresentadas as densidades da ENA no REE Nordeste para ambos os dados simulados e observados, mantendo a relação das cores. Da mesma forma, ao lado direito, são apresentadas as densidades do Fator de Capacidade.



(a) Distribuição de densidade para a fase Neutra de agosto.



(b) Distribuição de densidade para a fase El Niño de agosto.



(c) Distribuição de densidade para a fase La Niña de agosto.

Figura 3: Distribuição de densidade para cada fase no mês de agosto.

Observa-se que, de forma geral, para as três fases, os dados simulados seguem as distribuições históricas. É importante mencionar que não foram identificados valores irreais, como fator de capacidade fora do intervalo [0,1], ou valores negativos para ambas as variáveis FC e ENA.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193529
https://proceedings.science/p/193529?lang=pt-br

Destacam-se, também, relações inversas entre ENA e FC sobretudo nas fases El Niño do fenômeno climático. Vale ressaltar que as densidades dos dados simulados e dos dados observados seguem perfis similares, sendo a densidade dos dados simulados um pouco mais suave.

Ressalta-se que após a geração de 2.000 simulações, foi conduzido o teste de Kolmogorov-Smirnov para avaliar a congruência entre a distribuição dos dados simulados e a distribuição dos dados históricos. Este teste foi realizado para cada fase do fenômeno ENSO, empregando um nível de significância de 1%. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, pois nas simulações das três fases do fenômeno, a hipótese nula não foi rejeitada, indicando que a distribuição dos dados simulados segue a mesma distribuição que os dados históricos. Essa análise evidencia a consistência da metodologia proposta em replicar a distribuição dos dados observados ao longo do tempo.

A Tabela 2 apresenta um resumo das métricas para a usina de Tianguá durante a fases do fenômeno no mês de agosto, comparando os valores históricos (Hist) com os valores simulados (Sim). As métricas analisadas incluem o fator de capacidade e a ENA (Afluência Natural Efetiva). Ao analisar os dados históricos, observa-se que o fator de capacidade máximo foi de $0,65$, enquanto na simulação esse valor foi de $0,74$. Da mesma forma, a ENA máxima histórica foi de $5.712,80$, enquanto na simulação alcançou $10.624,80$. Esses valores indicam uma tendência positiva na simulação, onde conseguiu-se manter o comportamento geral do histórico.

Analisando as médias, mínimos e medianas, percebe-se uma consistência entre os dados históricos e simulados. Os valores estão muito próximos entre si, refletindo uma boa capacidade da simulação em reproduzir as condições observadas. Mesmo nas métricas de assimetria, onde há uma discrepância entre os dados históricos e simulados, essa diferença não compromete a qualidade geral da simulação, pois os valores permanecem em níveis próximos.

Tabela 2: Resumo das métricas para Tianguá nas três fases em agosto

Métricas	FC Neutro	ENA Neutro	FC El Nino	ENA El Nino	FC La Nina	ENA La Nina
Máx - Hist	0,63	5712,8	0,63	5353,3	0,65	3328,0
Max - Sim	0,69	10624,8	0,67	8759,4	0,74	6156,8
Discrepância	10%	86%	6%	64%	14%	85%
Média - Hist	0,58	3075,6	0,6	3124,2	0,55	2363,6
Média - Sim	0,58	3040,13	0,6	3091,7	0,55	2353,3
Discrepância	0%	1%	0%	1%	0%	0%
Min - Hist	0,50	1201,2	0,57	1727,6	0,44	1290,5
Min - Sim	0,48	762,1	0,54	911,8	0,37	878,1
Discrepância	4%	37%	5%	47%	16%	32%
Mediana - Hist	0,59	3012,8	0,61	2977,6	0,56	2295,1
Mediana - Sim	0,58	2857,6	0,6	2903,1	0,55	2286,5
Discrepância	2%	5%	2%	3%	2%	0%
DP - Hist	0,032	1245,2	0,021	1117,8	0,061	661,7
DP - Sim	0,032	1166,2	0,019	1063,1	0,058	601,3
Discrepância	0%	6%	10%	5%	5%	9%
Assimetria - Hist	-0,90	0,5	-0,52	0,8	-0,42	-0,2
Assimetria - Sim	-0,02	1,2	-0,01	0,9	-0,03	-0,7
Discrepância	98%	140%	98%	13%	93%	250%

Fonte: Elaboração própria com base nos dados analisados.

5. Conclusões

Em síntese, a aplicação da teoria de cópulas demonstrou ser uma estratégia eficiente para ampliar o tamanho das amostras de dados em energia renovável, especialmente no contexto do estudo de caso do Parque Eólico Ventos de Tianguá. A análise das estruturas de dependência entre o fator de capacidade e a ENA ao longo das diferentes fases do fenômeno ENSO revelou padrões distintos de comportamento, destacando a importância de considerar esses aspectos climáticos na modelagem e análise dos dados. A escolha das cópulas adequadas, como a t-Student, Rotated Joe 270°, e Gaussian, permitiu capturar diferentes tipos de dependência, desde relações lineares até assimetrias e caudas pesadas, refletindo a complexidade das interações entre as variáveis estudadas.

Os resultados das simulações geradas a partir das cópulas estimadas mostraram uma consistência com os dados históricos, evidenciando a capacidade do modelo em replicar fielmente o comportamento observado. Isso sugere que a abordagem de cópulas é uma ferramenta promissora para expandir base de dados no setor de energia renovável. Além disso, a análise das métricas

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193529
https://proceedings.science/p/193529?lang=pt-br

comparativas entre dados simulados e históricos, como médias, máximos, mínimos e assimetrias, reforça a qualidade e a validade das simulações como uma ferramenta de análise confiável.

É importante ressaltar que este estudo contribui não apenas para o entendimento da interação entre o fator de capacidade e a ENA em um contexto específico, mas também para a ampliação do conhecimento sobre a aplicação da teoria de cópulas em análises de energia renovável. As informações obtidas podem servir de base para futuras pesquisas e aplicações práticas no setor, incluindo aprimoramentos em modelos de previsão de produção eólica, otimização e estratégias de gerenciamento de riscos em cenários climáticos variáveis.

Por fim, o presente estudo destaca a importância de abordagens estatísticas avançadas, como as cópulas, na análise e modelagem de dados complexos em energia renovável. A capacidade de capturar a dependência multivariada entre variáveis críticas para a geração de energia, considerando as nuances das condições climáticas, oferece uma visão mais completa e precisa do funcionamento desses sistemas.

Referências

Aas, K., Czado, C., Frigessi, A., e Bakken, H. (2009). Pair-copula constructions of multiple dependence. *Insurance: Mathematics and Economics*, 44(2):182–198.

Ávila, L., Mine, M. R., Kaviski, E., e Detzel, D. H. (2021). Evaluation of hydro-wind complementarity in the medium-term planning of electrical power systems by joint simulation of periodic streamflow and wind speed time series: A brazilian case study. *Renewable Energy*, 167:685–699.

Bedford, T. e Cooke, R. M. (2002). Vines–a new graphical model for dependent random variables. *The Annals of Statistics*, 30(4):1031–1068.

Bezerra, B. P. d. S. (2023). Impactos dos eventos de el niño e la niña fortes no regime de precipitação no nordeste brasileiro: Uma revisão. *Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas. Bacharelado em Meteorologia*.

Bezerra, F. D. (2021). Energia eólica no nordeste. *Caderno Setorial Etene*, 6(200).

Cavalcanti, E. P., da Silva, B. B., da Silva, V. d. P. R., e Chaves Filho, J. B. (2020). Variabilidade da velocidade do vento e influências oceânicas: Uma abordagem para fins de geração de energia elétrica no nordeste do brasil. *Anuario do Instituto de Geociencias*, 43(1):273–285.

Chen, J., Mao, C., Liu, Z., Ma, C., Sha, G., Duan, Q., Fan, H., Qiu, S., e Wang, D. (2023). Stochastic planning of integrated energy system based on correlation scenario generation method via copula function considering multiple uncertainties in renewable energy sources and demands. *IET Renewable Power Generation*, 17(12):2978–2996.

dos Anjos, U. U., Ferreira, F. H., Kolev, N. V., e Mendes, B. V. M. (2004). Modelando dependências via cópulas. *Revista Brasileira de Estatística*.

dos Santos, A. T. S. e Santos e Silva, C. M. (2013). Seasonality, interannual variability, and linear tendency of wind speeds in the northeast brazil from 1986 to 2011. *The Scientific World Journal*.

EPE (2023). Fortalecimento da resiliência do setor elétrico em resposta às mudanças climáticas. Technical report, Energy Research Office – Brazil.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193529
https://proceedings.science/p/193529?lang=pt-br

EPE (2024). Matriz energética e elétrica. Technical report, Energy Research Office – Brazil. URL https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica.

Genest, C. e Favre, A.-C. (2007). Everything you always wanted to know about copula modeling but were afraid to ask. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(4):347–368.

GWEC (2024). Global wind report 2024. Technical report, Global Wind Energy GWEC. URL https://gwec.net/wp-content/uploads/2024/04/GWR-2024_digital_version_final-1.pdf.

Joe, H. (1997). Multivariate models and dependence concepts. *Monographs on Statistics and Applied Probability*, p. 1–424.

Joe, H. (2014). *Dependence Modeling with Copulas*. CRC Press, Boca Raton.

Marengo, J. A. et al. (2008). Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do brasil. *Parcerias estratégicas*, 27:149–175.

MME (2020). Energia eólica no brasil: Potencial, desenvolvimento e perspectivas. Technical report, Ministério de Minas e Energia do Brasil.

Nelsen, R. B. (2006). *An introduction to copulas*. Springer.

Nunes, T. G. A., Ungaretti, C. R., Di Marco, G. M. R., e de Mendonça, M. A. A. (2023). Os financiamentos chineses em energias renováveis na américa latina e os desafios das mudanças climáticas. Technical report, Texto para Discussão.

Pereira, G. A. d. A. (2023). Modelos de cópulas para simulação de cenários hidrológicos. *Revista de Modelagem Hidrológica*. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Pinto, E. J. d. A. (2005). *Estudo de Indicadores Climáticos para a Previsão de Longo Prazo de Vazões na Bacia do Alto São Francisco*. PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.

Prado, K. C. D. (2021). Análise da complementaridade hidro-eólica e seus impactos no mercado de energia elétrica brasileiro. *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro*.

Reis, L. M. et al. (2011). *Mudanças de regime no processo de geração de ventos no Brasil*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rémillard, B. (2017). Goodness-of-fit tests for copulas of multivariate time series. *Econometrics*, 5 (1):13.

RISUS (2019). Wind energy in brazil: Evolution, challenges and perspectives. *RISUS - Journal on Innovation and Sustainability*, 10(1). ISSN 2179-3565. Avaliação: Melhores práticas editoriais da ANPAD.

Scherner, N., Lima, J. M., Lima, L. M., e de Queiroz, A. *Avaliação da Complementaridade das Usinas Hidráulicas e Eólicas frente às Mudanças Climáticas*. PhD thesis.

Shi, S. S., Zhang, Y., e Li, X. (2021). A comparative study of copula functions for modeling dependence structure in multivariate data. *Journal of Multivariate Analysis*, 181.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193529
https://proceedings.science/p/193529?lang=pt-br

Siciliano, G. C. d. C. S. (2010). Estratégias de compra de contratos em leilões multiproduto de fontes renováveis. *Dissertação de Mestrado, PUC - Rio*.

Sklar, M. (1959). Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges. In *Annales de l'ISUP*, volume 8, p. 229–231.

Yoo, J., Son, Y., Yoon, M., e Choi, S. (2023). A wind power scenario generation method based on copula functions and forecast errors. *Sustainability*, 15(23):16536.

Zhang, L., Zhao, Y., Wang, Z., e Li, X. (2018). Assessment of wind-solar power complementarity in china using copula. *Energy*, 164:1151–1161.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193529
https://proceedings.science/p/193529?lang=pt-br