

## **ANÁLISE DOS IMPACTOS DO FENÔMENO EL NIÑO OSCILAÇÃO SUL CICLO 2023/2024 NO CENÁRIO HIDROLÓGICO E CONSUMO NO SIN**

Rodrigo da Rosa Azambuja<sup>1</sup>  
André Frazão Teixeira<sup>1</sup>  
Nelson Bernardo Rodrigues Cavalcante<sup>1</sup>  
Felipe Tartaro Pereira<sup>1</sup>  
Guilherme Matussi Ramalho<sup>1</sup>  
Francisca Lanai Ribeiro Torres<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>Câmara de Comercialização de Energia Elétrica*

DOI: 10.47168/rbe.v30i3.943

### **RESUMO**

O El Niño Oscilação Sul (ENOS) tem seus impactos amplamente documentados em termos de precipitação e temperatura em diferentes regiões do Brasil. Na fase positiva do ENSO, El Niño, comumente é registrado um aumento das chuvas no Sul do Brasil, déficits de precipitação na faixa Norte/Nordeste do país e aumento das temperaturas no Sudeste. Enquanto na fase negativa do ENOS, La Niña, é esperado déficit de precipitação no Sul do Brasil e aumento das chuvas na faixa Norte/Nordeste do país. Nos últimos 12 anos foram observadas fases positivas e negativas do ENOS, impactando diretamente em importantes variáveis do setor elétrico. Este trabalho tem o objetivo de avaliar os impactos do ENOS 2023/2024 no setor elétrico brasileiro. Os ciclos dos períodos úmidos de 2021/2022 e 2022/2023 apresentaram precipitações expressivas e afluências amplamente favoráveis nos submercados Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte; conseqüentemente, foi registrado um replecionamento do SIN, com armazenamento chegando a 85% do volume útil no final de março de 2023. O fenômeno El Niño esteve configurado a partir do trimestre AMJ/2023; diante desse contexto, as precipitações passaram a ser deficitárias na faixa Norte e Nordeste e a apresentar valores expressivos no Sul do país. Ademais, as temperaturas passaram a apresentar anomalias positivas na maior parte do país e com episódios de ondas de calor. Diante desse cenário, este trabalho apresenta uma análise das conseqüências do ENOS ciclo 2023/2024 em termos de precipitação, vazão e armazenamento do SIN, relação entre o aumento das temperaturas e acréscimo do Consumo.

Palavras-chave: ENOS; Temperatura; Consumo; Precipitação; Armazenamento.

## ABSTRACT

Meteorological scenario at different spatial and temporal scales affects variables that influence the electricity sector in Brazil. El Niño Southern Oscillation (ENSO) causes impacts on precipitation, temperature, and other meteorological variables in different regions of Brazil. In the positive phase of ENSO - El Niño - precipitation increases in South of Brazil; reduces in the North/Northeast and increases temperatures in the Southeast. Negative phase of ENSO - La Niña - reduces precipitation in the South of Brazil and increases in the North/Northeast. There have been positive and negative phases of ENSO in the last 12 years, impacting important meteorological variables for the electricity sector in Brazil. El Niño was formed in April, May and June 2023; precipitation reduced in the North/Northeast and increased in the South of Brazil; and temperatures had positive anomalies in most of Brazil. The main goal of this work is to analyze the impacts of ENSO 2023/2024 on the electricity sector in Brazil.

Keywords: ENSO; Temperature; Demand; Precipitation; Storage.

## 1. INTRODUÇÃO

Eventos meteorológicos e climáticos em escala global, como o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS), são conhecidos por afetar o cenário meteorológico brasileiro (CAVALCANTI, 2016). O ENOS é um fenômeno atmosférico-oceânico caracterizado por anomalias positivas (El Niño), negativas (La Niña) ou neutralidade da temperatura da superfície do mar (TSM) no Oceano Pacífico equatorial. As oscilações da TSM no Oceano Pacífico equatorial causam alterações em diferentes circulações atmosféricas, impactando o cenário meteorológico de diferentes regiões do Brasil (AZAMBUJA, 2017). A caracterização do El Niño é feita através de índices ou anomalias da TSM para diferentes regiões do Oceano Pacífico equatorial: Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4. A região do pacífico equatorial em que a anomalia da TSM está mais bem correlacionada com impactos no Brasil é a Niño 3.4 (BUNGE; CLARKE, 2009). A caracterização do ENOS é definida pela média móvel trimestral da anomalia da TSM para a região do Niño 3.4, com valores de anomalias superiores a  $0,5^{\circ}\text{C}$  para eventos de El Niño, e inferiores a  $-0,5^{\circ}\text{C}$  para eventos de La Niña.

Os impactos mais conhecidos do fenômeno ENOS são o aumento (redução) das chuvas no Sudeste da América do Sul, área que cobre o Sul do Brasil, na fase positiva (negativa), El Niño (La Niña) (GRIMM et al. 2000). Entretanto a faixa Norte/Nordeste do país passa por déficits de precipitação na fase de El Niño e aumento das chuvas na fase de La Niña. Dado que as chuvas durante período de El Niño ficam restritas ao Sul, o avanço de massas de ar frio associadas a

frentes frias também se mantém no Sul, podendo elevar de maneira expressiva as temperaturas no Sudeste e região central do país. Em meados de 2023 o fenômeno El Niño foi configurado, implicando alterações de variáveis meteorológicas que impactam o setor elétrico brasileiro, como a precipitação e temperatura.

Este trabalho apresentará uma análise dos impactos do ENOS ciclo 2023/2024 em termos de: (1) relação entre o aumento das temperaturas e acréscimo do consumo, principalmente para os Ambientes de Contratação Regulado (ACR) e Livre (ACL); (2) precipitação, vazão e armazenamento do SIN. O trabalho é um compilado de estudos e análises apresentadas em eventos e/ou boletins pela Câmara de Comercialização Elétrica (CCEE) ao longo de 2023 e início de 2024.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Características gerais

A primeira seção apresenta uma análise do comportamento, ciclos do fenômeno ENOS nos últimos 12 anos. A Figura 1 indica o comportamento da anomalia da TSM na região do Niño 3.4 entre o trimestre dezembro, janeiro e fevereiro de 2012 (DJF) e março, abril e maio de 2024 (MAM). Nos últimos 12 anos tivemos períodos de neutralidade e fases de El Niño e La Niña, destacando o período recente, no qual tivemos uma fase de La Niña na maior parte dos meses entre junho, agosto e setembro de 2020 (JAS/20) e dezembro, janeiro e fevereiro de 2023 (DJF/23), precedendo uma fase de El Niño no histórico recente, configurado a partir de abril, maio e junho de 2023 (AMJ/23). Dado esse cenário do fenômeno ENOS, no segundo semestre de 2023 e início de 2024 estivemos em um período com viés de aumento das chuvas no Sul e déficit de precipitação na faixa norte/nordeste do país, sendo esse período posterior a uma fase com um viés contrário, redução de chuvas no Sul e aumento na faixa norte/nordeste do país.

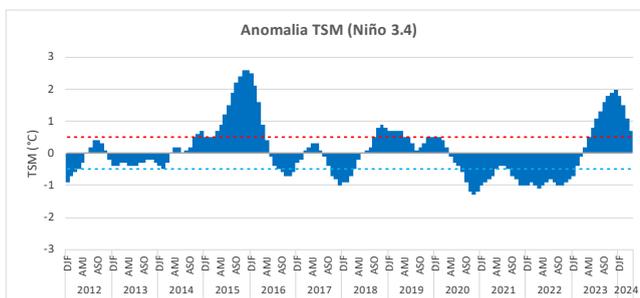


Figura 1 - Anomalia trimestral da TSM na região do Niño 3.4 com limites de temperatura que definem períodos de El Niño (vermelho) e La Niña (azul)

Na tentativa de avaliar o viés da hidrologia em termos de Energia Natural Afluente (ENA) associada a fase do fenômeno ENOS, a Figura 2 relaciona a ENA média do SIN com as classes de anomalias da TSM. Em termos médios, o gráfico evidencia um cenário favorável de ENA nas classes positivas de TSM, ou seja, associado ao fenômeno de El Niño (anomalias positivas), enquanto as menores ENAs estão na fase de La Niña (anomalias negativas).

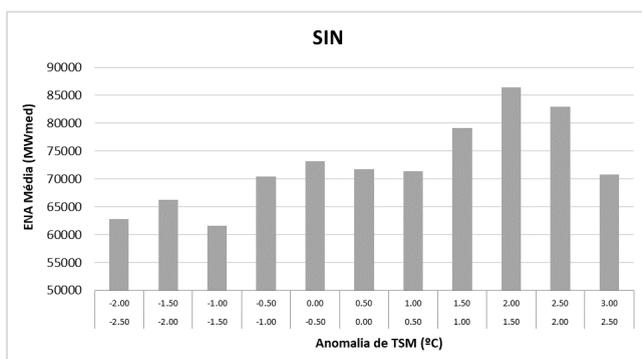


Figura 2 - ENA média no SIN por classe de anomalia da TSM na região do Niño 3.4 (período: 1950 a 2023)

## 2.2 Temperatura e consumo

Conforme previamente apresentado, o ciclo de ENOS com fase positiva, El Niño, foi configurado a partir do trimestre AMJ de 2023 e um dos possíveis efeitos esperados do fenômeno foi observado, ou seja, o aumento das temperaturas no Sudeste e faixa central do país. Dado que as chuvas associadas a passagem de frentes frias ficam restritas a região Sul do país, o mesmo acontece com o avanço das massas de ar frio. O mosaico mostrado na Figura 3 mostra as anomalias de temperaturas máximas observadas entre setembro e dezembro de 2023. Nesse quadrimestre de El Niño, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) registrou diversos episódios de ondas de calor, evidenciados pelas anomalias de temperatura máxima expressivas no período, mostrados na Figura 3 (a) a (d). O quadrimestre anterior era de fenômeno La Niña, estando essas temperaturas máximas em 2023 muito superiores ao mesmo período do ano anterior, principalmente da região Sudeste e central do país. Segundo o INMET, a temperatura média no Brasil em 2023 foi de 24,92°C, sendo 0,69°C acima da média histórica, que é de 24,23°C. Em 2022, sob atuação do La Niña, a média anual foi de 24,07°C, 0,16°C abaixo da média histórica.

A região do país com temperaturas iguais e/ou abaixo da média

histórica foi o extremo Sul, área que cobre os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, nos meses de outubro e novembro de 2023. Comparando com o ano anterior, no Rio Grande do Sul elas estiveram iguais e/ou abaixo dos valores de 2022 em outubro, novembro e dezembro. Essas temperaturas são reflexo do fenômeno El Niño em curso no período, com chuvas e redução de temperaturas no Sul. A fonte dos dados de temperatura é a reanálise do *Climate Prediction Center do National Centers for Environmental Prediction (CPC/NCEP)* (CHEN et al. 2008).

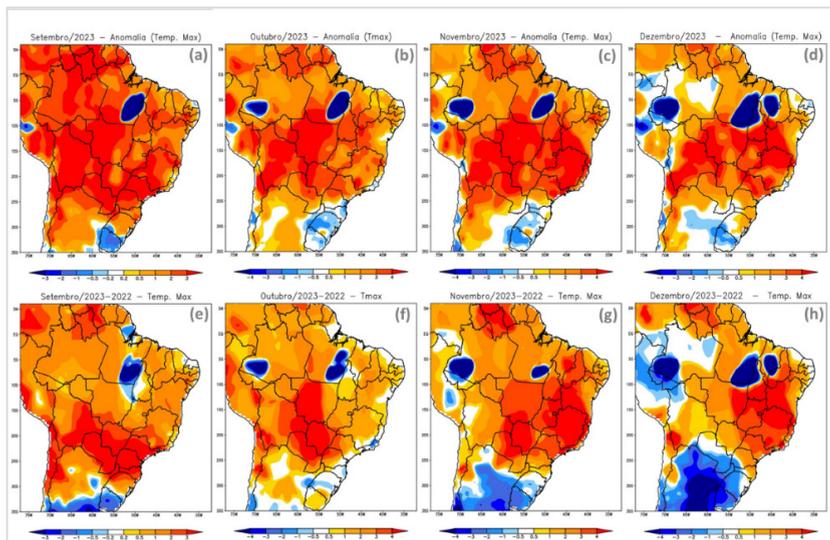


Figura 3 - Temperatura máxima verificada nos meses de setembro, outubro, novembro e dezembro de 2023: (a) a (d) anomalia de temperatura (observado - climatologia); (e) a (h) comparativo com o verificado em 2022 (temp. máx. 2023 - temp. máx. 2022)

Para o setor elétrico é bem documentada a relação entre o aumento das temperaturas juntamente com o aumento da carga e/ou consumo (TAKANO; ASADA, 2020). O ciclo de El Niño configurado no segundo semestre de 2023 apresentou um dos efeitos esperados do fenômeno, o aumento das temperaturas no Sudeste e faixa central do país. Os dados de consumo apresentados na Figura 4 são referentes a medição contabilizada pela CCEE e mostram o aumento de consumo no ACR e ACL. O aumento do consumo foi expressivo no segundo semestre de 2023 ante a 2022, tanto no ambiente livre (ACL) quanto no consumo registrado nas distribuidoras. Em julho de 2023 o consumo foi ligeiramente superior a 2022 em ambos os ambientes, mas com o acréscimo das temperaturas nos meses seguintes, atingindo o maior

crescimento no ACR em novembro de 2023 (+12,6%) e em dezembro (+12,2%) no ACL. Esse resultado evidencia a relação entre o aumento das temperaturas e acréscimo do consumo no ACR e ACL.



Figura 4 - Consumo verificado no ACR e ACL entre julho e dezembro de 2023, com o crescimento percentual de 2023 em relação a 2022

Os mapas mostrados na Figura 5 indicam a variação do consumo (2023 x 2022) por estado para o segundo semestre de 2023. No ACL, todos os estados apresentaram variação positiva no consumo, com um aumento de 9,5% para o país. No ACR, com exceção dos estados do Rio Grande do Sul e Amapá, todos os estados apresentaram variação positiva no consumo, totalizando +6,3% para o país. Conforme previamente discutido, a fase positiva do ENOS (El Niño) no segundo semestre de 2023 e as consequentes chuvas e redução de temperaturas restritas ao Sul do país, impactaram no consumo no ACR do estado do Rio Grande do Sul, implicando uma variação de -3% em relação ao ano anterior.

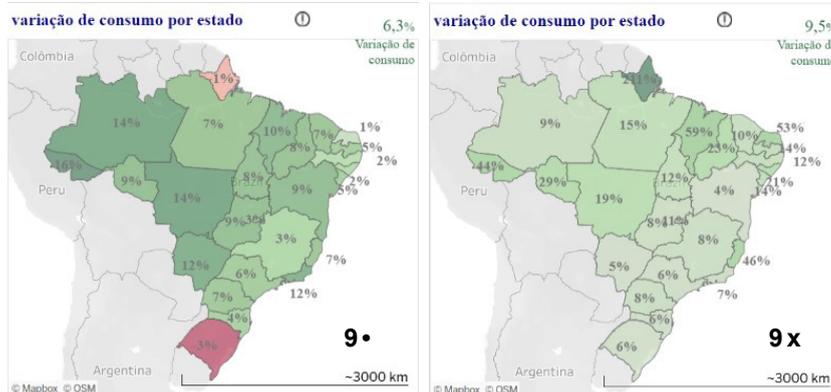


Figura 5 - Variação do consumo por estado no ACL e ACR entre julho e dezembro: 2023 x 2022

### 2.3 Cenário hidrológico

Esta seção apresenta uma análise do comportamento hidrológico para o período de estudo, abordando o cenário de precipitação, vazões e o consequente armazenamento. Os mapas mostrados na Figura 6 mostram as anomalias de precipitação acumulada para o trimestre outubro, novembro e dezembro de 2021 ((a), (b) e (c)), 2022 ((d), (e) e (f)) e 2023 ((g), (h) e (i)). Os dados de precipitação são dados de reanálise do Climate Prediction Center do National Centers for Environmental Prediction (CPC/NCEP) (CHEN et al. 2008). Sob influência do fenômeno La Niña no último trimestre de 2021 e 2022, foram verificadas anomalias positivas de precipitação na metade norte do país, com chuvas beneficiando as bacias dos rios Tocantins, São Francisco, Xingu, entre outras; entretanto, as precipitações foram deficitárias no Sul do país. Esse cenário foi alterado no último trimestre de 2023, já sob influência do fenômeno El Niño: as precipitações passaram a apresentar anomalias positivas no Sul, beneficiando as bacias dos rios Uruguai, Jacuí, Iguaçu, Paranapanema e Incremental de Itaipu; entretanto, foi deficitária na metade norte do país. Esse cenário de precipitações apresentou um comportamento aderente com o que a bibliografia indica com relação aos impactos do fenômeno ENOS no Brasil.

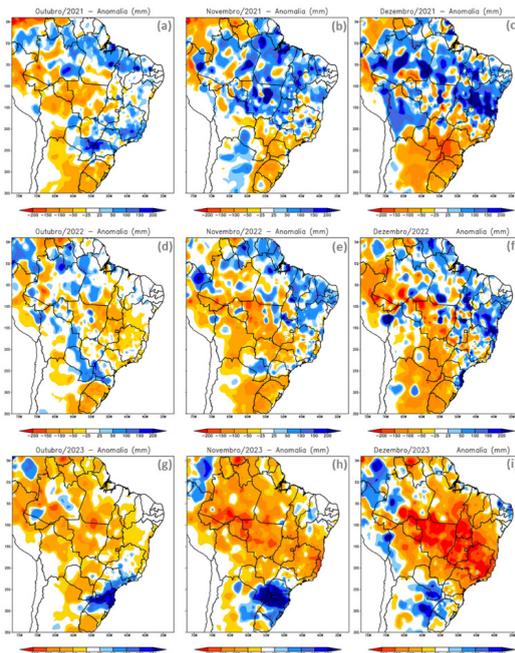


Figura 6 - Anomalia da precipitação acumulada, observada em outubro, novembro e dezembro: 2021 (a), (b), (c); 2022 (d), (e), (f); 2023 (g), (h), (i)

O impacto dessas chuvas em termos de Energia Natural Afluente (ENA) pode ser verificado na Figura 7, na qual foram ranqueadas em todo o histórico, desde 1931, as ENAs no SIN no trimestre outubro, novembro e dezembro. A pior ENA verificada nos últimos três ciclos no SIN ocorreu em 2021, e o ano de 2022 apresentou valor intermediário no histórico; entretanto o ano de El Niño, 2023, apresentou a 11ª melhor ENA no SIN para o período, em um histórico de 93 anos.

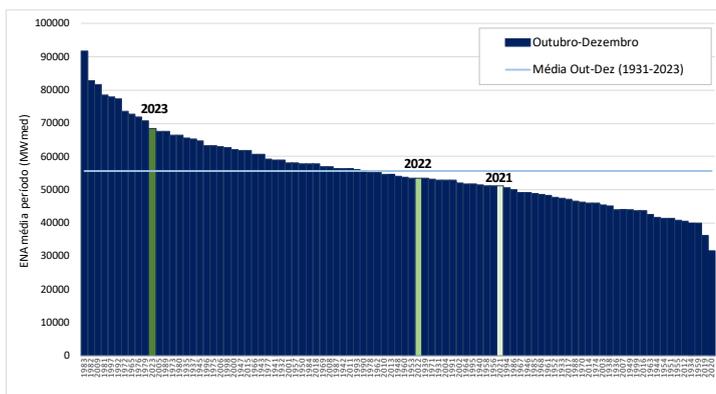


Figura 7 - Ranking das ENAs verificadas entre outubro e dezembro, de 1931 a 2023, no SIN

Os resultados indicam uma melhora da ENA no SIN em um ano de fenômeno El Niño, fase positiva do ENOS. A Figura 8 apresenta os impactos em termo de armazenamento no SIN. O período seco do ano de 2021 apresentou as piores ENAs do histórico e um deplecionamento expressivo no SIN. A partir do período úmido de 2021, iniciado em outubro, as chuvas aumentaram de maneira expressivas nos sub-mercados Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte, sendo verificado um aumento das ENAs e tendência de aumento do armazenamento. Em 2022 essa tendência foi mantida, iniciando o ano com 34% do volume útil (VU) e chegando no final do ano com 58%.

O acréscimo do armazenamento, replecionamento do SIN, ficou evidenciado no período de La Niña configurado em 2021 e 2022. Em 2023, a tendência de aumento de armazenamento no SIN se manteve na primeira metade do ano, e no segundo semestre, já com o fenômeno El Niño configurado, o armazenamento encerrou 2023 em 60%, ligeiramente superior ao término de 2022.

No início de 2024, com o fenômeno El Niño configurado, a linha preta indicada na Figura 8 mostra o armazenamento “andando de lado” no primeiro trimestre, chegando no final de março em 66%, aquém aos 88% no mesmo período de 2023.

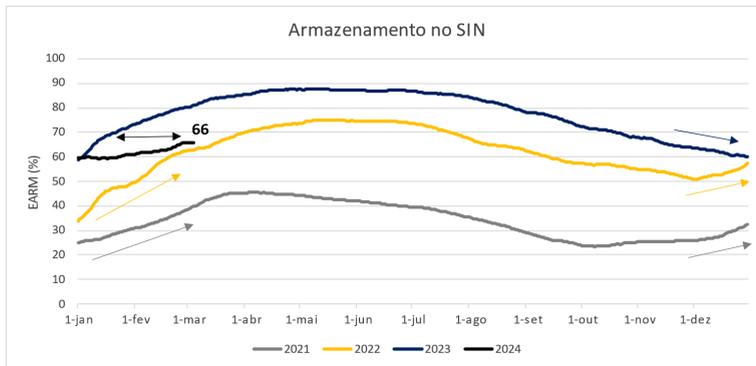


Figura 8 - Armazenamento no SIN: 2021 (cinza), 2022 (amarelo), 2023 (azul) e 2024 (preto)

## 2.4 Discussão

Nas seções anteriores foram mostrados os impactos do fenômeno ENOS ciclo 2023/2024 em fase positiva (El Niño) em variáveis meteorológicas que influenciam no setor elétrico brasileiro: no segundo semestre de 2023 o consumo apresentou valores elevados, superiores aos verificados em anos anteriores dado o aumento expressivo das temperaturas na maior parte do país, com destaque para o Sudeste e Centro-Oeste. As precipitações apresentaram um comportamento aderente com o que a bibliografia indica, as chuvas no período de El Niño no ciclo 2023/2024 beneficiaram o submercado Sul e apresentaram déficits na metade norte do país.

A relação entre a precipitação e ENA indica que a distribuição espacial das chuvas no ciclo do ENOS 2023/2024 impactou no armazenamento do SIN. As precipitações expressivas no Sul, no El Niño 2023/2024, beneficiaram as bacias dos rios Iguaçu, Uruguai e Jacuí, entretanto o submercado Sul é responsável por apenas 7% do armazenamento no SIN. A Figura 9 mostra o percentual de representatividade de cada submercado em termos de ENA e armazenamento para o SIN. O cenário de chuvas apresentado na seção 2.3 indicou chuvas na fase de La Niña beneficiando as bacias dos rios São Francisco e Tocantins (trecho de Tucuruí), sendo essas bacias responsáveis por 95% do armazenamento dos submercados Nordeste e Norte, respectivamente. Também foram verificadas chuvas expressivas nas bacias dos rios Tocantins (trecho de Serra da Mesa), Paranaíba e Grande, responsáveis por 80% do armazenamento do submercado Sudeste/Centro-Oeste (SE/CO). O SE/CO é responsável por 70% do armazenamento do Sistema Interligado Nacional (SIN). Durante o ENOS ciclo 2023/2024 as

precipitações foram deficitárias nessas bacias e mesmo a ENA se mantendo alta dada as chuvas no Sul, o armazenamento no SIN não mostrou uma elevação, chegando no final do período úmido de 2024 com -15% em relação ao ano anterior.

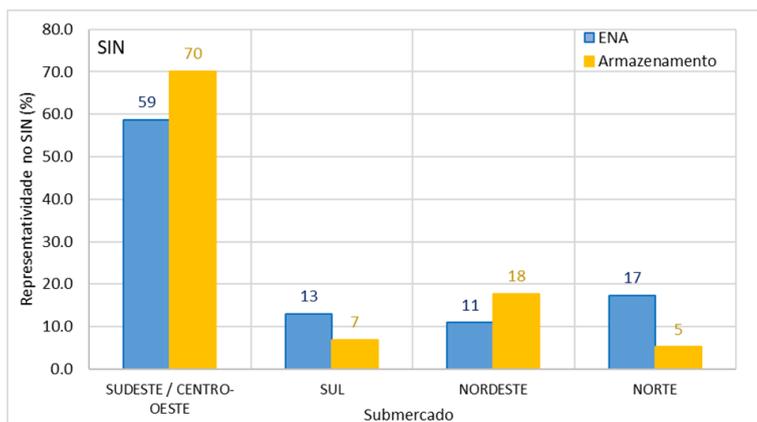


Figura 9 - Representatividade (%) da ENA e armazenamento dos submercados em relação ao SIN

### 3. CONCLUSÃO

O trabalho apresentou um compilado de estudos e/ou boletins apresentados pela CCEE ao longo de 2023-2024, em que foram evidenciados os impactos do fenômeno ENOS em variáveis que influenciaram o setor elétrico brasileiro. A fase positiva do ENOS, fenômeno El Niño, esteve configurada entre os trimestres AMJ/2023 e MAM/2024, sendo esse precedido por uma fase de La Niña. Os principais resultados mostraram que:

- O El Niño configurado entre 2023/2024 impactou com um aumento expressivo das temperaturas na maior parte do país, elevando de maneira significativa o consumo tanto no ACR quanto no ACL. O aumento foi de 6,3% no ACR no segundo semestre de 2023 ante a 2022, dada as temperaturas elevadas na maior parte do país. Uma das exceções foi o consumo no estado do Rio Grande do Sul, com redução de -3%. Esse resultado esteve associado ao cenário meteorológico referente ao fenômeno El Niño no período: as chuvas e avanços de massas de ar frio ficaram restritas ao extremo Sul do país, sendo mantidas temperaturas elevadas no Sudeste e região central, com diversos episódios de ondas de calor;
- O cenário de chuvas na primeira metade do período úmido (outubro, novembro e dezembro) de 2021, 2022 e 2023 indicou aderên-

cia com o fenômeno ENOS: em 2021 e 2022 tivemos déficit de precipitação no Sul e um aumento expressivo em 2023. Após o pior cenário hidrológico do histórico na metade de 2021, os períodos úmidos seguintes foram marcados por um aumento contínuo da ENA no SIN entre 2021 e 2023;

- Mesmo com a ENA elevada, a distribuição espacial das chuvas durante o fenômeno El Niño beneficiou o submercado Sul, ou seja, embora as vazões se mantivessem elevadas, a resposta em termos de armazenamento não foi a mesma, sendo o submercado Sul responsável por apenas 7% do armazenamento do SIN. Nos anos que precederam o fenômeno El Niño 2023/2024, o armazenamento do SIN passou por um replecionamento nos anos de La Niña.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZAMBUJA, R. R. Estudo da atividade de relâmpagos na região sul do Brasil a partir de dados de sistema de detecção. 2017. 03.04.13.22-TDI). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2017.

BUNGE, L.; CLARKE, A. J. A verified estimation of the El Niño index Niño-3.4 since 1877. *Journal of Climate*, v. 22, n. 14, p. 3979-3992, 2009.

CAVALCANTI, I. F. A. Tempo e clima no Brasil. Oficina de textos, 2016.

CHEN, Mingyue et al. Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 113, n. D4, 2008.

GRIMM, A. M.; BARROS, V. R.; DOYLE, M. E. Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of climate*, v. 13, n. 1, p. 35-58, 2000.

TAKANO, W. Y.; ASADA, E. N. Previsão de carga no mercado de energia. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, v. 1, n. 1, 2020.