

Análise da Evolução dos Modos Interárea do SIN no Horizonte de 2020 a 2024

Daniel Hauser* Glauco Nery Taranto**

* COPPE/UFRJ, RJ, (e-mail: hauser91@hotmail.com)

** COPPE/UFRJ, RJ, (e-mail: tarang@coep.ufrj.br)

Abstract: This work evaluates the evolution of the main interarea modes of the Brazilian Interconnected Power System (SIN) in the 2020 – 2024 horizon with high levels of wind and solar generation in the Northeast region of Brazil. The software PacDyn is chosen for the simulations with the *Dominant Pole Spectrum Eigensolver* (DPSE) algorithm to help identify the modes of interest. Besides that, the impacts of the expansion of SIN's Interconnections on the interarea modes are studied.

Resumo: Este trabalho avalia a evolução dos principais modos interárea do SIN no horizonte de 2020 – 2024, considerando cenários de elevada geração eólica e solar fotovoltaica no Nordeste. O programa computacional PacDyn é adotado nas simulações com o algoritmo *Dominant Pole Spectrum Eigensolver* (DPSE) para a identificação dos modos de interesse. Além disto, são estudados os impactos de obras de ampliação das Interligações do SIN sobre os modos interárea.

Keywords: Small-signal stability; Interarea modes; PacDyn; DPSE; SIN.

Palavras-chaves: Estabilidade a pequenos sinais; Modos interárea; PacDyn; DPSE; SIN.

I. INTRODUÇÃO

No Brasil, o planejamento da expansão do sistema elétrico é realizado nos horizontes de médio prazo e de longo prazo. O planejamento de médio prazo do Sistema Interligado Nacional (SIN), de responsabilidade do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), considera o horizonte de 5 anos e suas indicações são publicadas anualmente no Plano de Ampliações e Reforços (PAR).

Nos próximos anos está prevista a entrada em operação de um grande montante de geração eólica e solar no SIN, sobretudo no subsistema Nordeste. Em vista disto, diversas obras de ampliação do sistema de Transmissão serão implementadas de modo a elevar a capacidade de intercâmbio dos subsistemas e assim comportar esta nova geração. Tais obras transformarão a topologia do SIN podendo impactar as dinâmicas do sistema, como por exemplo as oscilações eletromecânicas.

Uma forma de estudar as oscilações é por meio da análise linear, mais especificamente, pela avaliação dos modos de oscilação do sistema. Como o foco do PAR não é analisar a estabilidade a pequenas perturbações, logo, há margem para explorar este assunto. Assim, o objetivo do artigo é então estudar a evolução dos principais modos de oscilação interárea do SIN no horizonte de 2020 – 2024, considerando cenários de elevada geração eólica e solar no Nordeste. A ideia é analisar o impacto das obras sistêmicas sobre estes modos de oscilação.

A detecção dos modos interárea é uma tarefa complexa, dada a grande dimensão do SIN. Neste contexto o algoritmo *Dominant Pole Spectrum Eigensolver* (DPSE) desempenha papel fundamental na identificação e análise dos modos interárea. No artigo, o algoritmo é brevemente descrito e aplicado no caso brasileiro.

II. O SIN NO HORIZONTE 2020 – 2024

A. Geração

A expansão do parque gerador do SIN previsto em 2020 e em 2024 é mostrada na Tabela 1. O aumento da capacidade instalada é liderado pelas fontes de energia a gás com uma adição de 3.543 MW, a eólica com 3.191 MW e a solar fotovoltaica com 1.124 MW, representando juntas cerca de 85% da expansão contratada até 2024 (ONS [2019a]).

Tabela 1. Capacidade instalada no SIN em 2020 e 2024 com valores expressos em MW. Adaptado de ONS [2019a]

SIN	2020	2024
Hidráulica	114.240	114.709
Nuclear	1.990	1.990
Gás/GNL	14.318	17.861
Carvão	3.017	3.017
Biomassa	13.810	14.137
Óleo e Diesel	4.554	4.840
Eólica	16.412	19.603
Solar	2.820	3.944
Outros	745	1.108
Total	171.907	181.209

Cabe destacar que grande parte da expansão das fontes eólica e solar ocorrerá na região elétrica Nordeste. Desta forma, para garantir a operação segura do SIN e viabilizar o pleno escoamento desta geração, o sistema de transmissão receberá diversas ampliações, principalmente nas Interligações.

B. Transmissão

Em cenários de elevada geração no Nordeste será necessária uma robusta infraestrutura do sistema de transmissão

para assegurar a exportação do excedente de geração da região para o restante do SIN. Atualmente, a região Nordeste possui Interligação com a região Norte via 7 circuitos de 500 kV e uma interconexão em 230 kV. Já a Interligação com o Sudeste é composta por apenas 2 circuitos de 500 kV (ONS [2019b]).

A Figura 1 ilustra o sistema de transmissão atual da Interligação Norte-Nordeste-Sudeste assim como suas obras de expansão. No diagrama também estão destacados dois importantes conjuntos de obras que ampliarão os corredores de exportação do Nordeste.

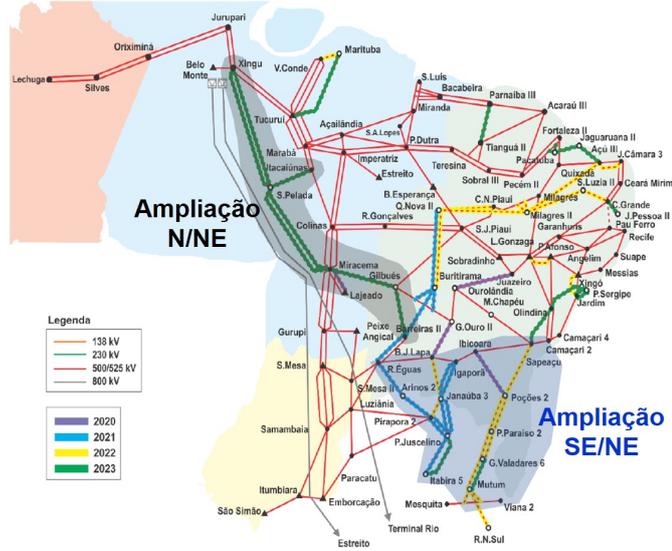


Figura 1. Diagrama do sistema de transmissão atual e futuro da Interligação Norte-Nordeste-Sudeste. Adaptado de ONS [2019b]

A ampliação da Interligação Norte-Nordeste, prevista para fevereiro de 2023, consiste em novas linhas de 500 kV conectando desde a subestação de Xingu (PA) até Barreiras II (BA).

Para a Interligação Sudeste-Nordeste é esperada uma ampliação considerável que ocorrerá em dois estágios. O primeiro estágio, previsto para junho de 2021, consiste em linhas de 500 kV interligando Igaporã (BA) a Itabira 5 (MG) e também de Rio das Águas (BA) a Presidente Juscelino (MG). Enquanto que o segundo estágio, previsto para fevereiro de 2022, é composto por linhas de 500 kV conectando Bom Jesus da Lapa (BA) a Pirapora 2 (MG) e um longo eixo em 500 kV de Sapeaçu (BA) até Rio Novo do Sul (ES).

A capacidade de exportação da região Nordeste é parametrizada pelo ONS por um fluxo denominado EXPNE. Atualmente seu limite encontra-se fixado em 5.500 MW, sendo que em 2023 será elevado para 15.000 MW (ONS [2019b]), quando as obras da Figura 1 estiverem em operação.

III. O ALGORITMO DPSE

As simulações realizadas neste artigo empregam um algoritmo conhecido como *Dominant Pole Spectrum Eigensolver* (DPSE). Uma breve explicação do algoritmo é realizada a seguir bem como sua aplicação na identificação

dos modos interárea do SIN. O detalhamento completo do algoritmo DPSE pode ser encontrado em Martins [1997].

A. Descrição do Algoritmo

O DPSE é um método iterativo que opera tanto subespaços à direita quanto à esquerda de modo a produzir as melhores estimativas dos pólos dominantes de uma dada função de transferência. O algoritmo assume que o usuário fornece uma função de transferência do tipo monovariável (SISO) e um conjunto de estimativas iniciais para os pólos dominantes.

Dada uma função de transferência $F(s) = \mathcal{L}\{y(t)\}/\mathcal{L}\{u(t)\} = \mathbf{c} \cdot (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{b} + d$ pode-se escrever sua representação em espaço de estados na forma:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{b} \cdot u(t) \\ y(t) &= \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}(t) + d\end{aligned}$$

sendo $\mathbf{x}(t)$ o vetor de estados, $u(t)$ o sinal de entrada, $y(t)$ o sinal de saída, \mathbf{A} a matriz de estado, \mathbf{b} a matriz de entrada, \mathbf{c} a matriz de saída e d a matriz de transmissão direta (Ogata [2010]).

A seguir, os símbolos k e m denotam o contador de iteração e o número total de pólos dominantes a serem estimados, respectivamente.

As estimativas dos m pólos dominantes são registradas na variável $s_i^{(k)}$ ($i = 1, 2, \dots, m$) para cada iteração k . As estimativas iniciais $s_i^{(1)}$ ($i = 1, 2, \dots, m$) devem ser inicializadas pelo usuário e a cada iteração são atualizadas pelo algoritmo. É preferível que as estimativas iniciais estejam próximas da região do fenômeno físico de interesse. Ao final do processo iterativo as estimativas convergem para os autovalores de \mathbf{A} pertencentes ao espectro de pólos dominantes de $F(s)$.

A cada iteração são calculados os autovetores à direita $\phi(s_i^{(k)})$ e à esquerda $\psi(s_i^{(k)})$ associados à cada estimativa $s_i^{(k)}$ de modo que (1) e (2) sejam satisfeitas (Kundur [1994])

$$\mathbf{A} \cdot \phi(s_i^{(k)}) - s_i^{(k)} \cdot \phi(s_i^{(k)}) = 0 \quad (1)$$

$$\psi(s_i^{(k)}) \cdot \mathbf{A} - s_i^{(k)} \cdot \psi(s_i^{(k)}) = 0 \quad (2)$$

Em seguida, os autovetores calculados são condensados nas matrizes (3) e (4)

$$\Phi^{(k)} = [\phi(s_1^{(k)}) \quad \phi(s_2^{(k)}) \quad \dots \quad \phi(s_m^{(k)})] \quad (3)$$

$$\Psi^{(k)} = [\psi^T(s_1^{(k)}) \quad \psi^T(s_2^{(k)}) \quad \dots \quad \psi^T(s_m^{(k)})]^T \quad (4)$$

Em toda iteração ocorre um processo de reortogonalização baseado nas matrizes \mathbf{G} , \mathbf{H} e \mathbf{B} descrito por (5), (6) e (7)

$$\mathbf{G}^{(k)} = \Psi^{(k)T} \cdot \Phi^{(k)} \quad (5)$$

$$\mathbf{H}^{(k)} = \Psi^{(k)T} \cdot \mathbf{A} \cdot \Phi^{(k)} \quad (6)$$

$$\mathbf{B}^{(k)} = (\mathbf{G}^{(k)})^{-1} \cdot \mathbf{H}^{(k)} \quad (7)$$

Como resultado da reortogonalização, o DPSE não gera soluções repetidas dos autovalores e autovetores (Martins [1997]).

Finalmente, com base na matriz $\mathbf{B}^{(k)}$ são computados seus respectivos autovalores $\lambda_{\mathbf{B}_i}^{(k)}$. O teste de convergência é então realizado verificando se a norma do vetor de *mismatch* está abaixo de uma determinada tolerância ε , i.e., $\|\mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\phi}_i - \lambda_{\mathbf{B}_i}^{(k)} \cdot \boldsymbol{\phi}_i\| < \varepsilon$. Vale destacar que quando um pólo dominante é encontrado a variável m é reduzida em uma unidade. Assim, o número de estimativas de pólos é reduzida à medida que mais pólos dominantes são encontrados até que não sobre mais nenhuma estimativa.

B. Aplicação no SIN

O DPSE é uma técnica muito útil na identificação dos modos interárea de grandes sistemas interligados como no caso do SIN, pois permite encontrá-los com precisão e agilidade.

Os principais modos interárea de interesse a serem analisados são o Norte-Sul (NS), Norte-Nordeste (NNE) e o Sul-Sudeste (SSE). A Figura 2 ilustra os *mode shapes* de velocidade dos referidos modos interárea.

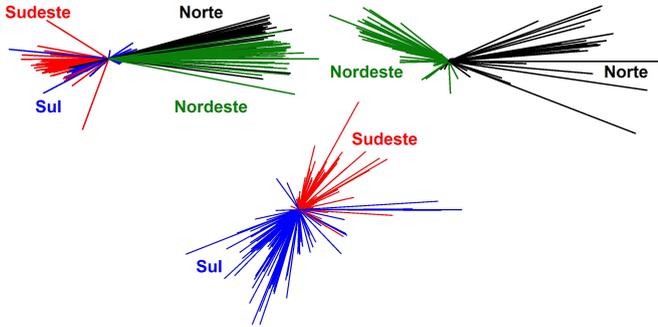


Figura 2. *Mode shapes* de velocidade dos principais modos interárea do SIN.

A aplicação do algoritmo no caso brasileiro consistiu em definir 3 funções de transferência envolvendo as usinas com maior representatividade nos modos de oscilação em questão. A escolha dessas usinas foi feita com base no fator de participação das variáveis de estado em cada um dos três modos interáreas. Uma vez determinadas as usinas, passou-se a utilizar as expressões dadas abaixo de acordo com Martins et al. [1996], onde é mostrado que os modos eletromecânicos são dominantes na função de transferência $\Delta\omega(s)/\Delta P_{mec}(s)$, sendo ω a velocidade do rotor e P_{mec} a potência mecânica das máquinas.

$$FT_{NS}(s) = \frac{\omega^{BM} - \omega^{ANG2}}{P_{mec}^{BM} - P_{mec}^{ANG2}}; FT_{NNE}(s) = \frac{\omega^{BM} - \omega^{PAf}}{P_{mec}^{BM} - P_{mec}^{PAf}}$$

$$FT_{SSE}(s) = \frac{\omega^{ANG2} - \omega^{ITA}}{P_{mec}^{ANG2} - P_{mec}^{ITA}}$$

em que a abreviatura BM representa a usina de Belo Monte; ANG2 a usina de Angra 2; PAF a usina de Paulo Afonso e ITA a usina de Itá. As localizações das respectivas usinas referenciadas nas funções de transferência estão ilustradas na Figura 3.

As estimativas iniciais dos modos interárea, para cada função de transferência, são definidas com base nas frequências típicas de ocorrência destas oscilações em que se tem



Figura 3. Localização das principais usinas utilizadas nas funções de transferência do DPSE.

registro. No entanto deve-se ter em mente que o amortecimento e a frequência dos modos podem se alterar sensivelmente a depender do ponto de operação do sistema. Como pode ser constatado em Leandro et al. [2017] e Hauser and Taranto [2019] o modo Norte-Sul oscila na faixa de 0,2 a 0,5 Hz, o modo Norte-Nordeste entre 0,55 e 0,75 Hz e o modo Sul-Sudeste entre 0,6 e 0,8 em Hz.

IV. PREMISSAS DE SIMULAÇÃO

A. Programas Computacionais

Neste artigo são utilizados os programas computacionais desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), uma vez que se tratam de *softwares* amplamente difundidos em território nacional, além de ser o ambiente em que a base de dados do SIN é disponibilizada.

Para a análise de cenários em regime permanente utiliza-se o programa ANAREDE, fundamental para definir os pontos de operação do sistema.

O programa ANATEM, geralmente empregado em análises de grandes perturbações em sistemas de potência, é essencial no preparo de um ponto de operação dinâmico estável e viável do SIN, assim, subsidiando a etapa de linearização do ponto de operação do sistema.

O PacDyn é o principal programa utilizado nas simulações deste artigo. O *software* é destinado para análises lineares das oscilações eletromecânicas de sistemas elétricos. O algoritmo DPSE, ressaltado anteriormente, é um dos diversos métodos de cálculo de pólos implementados no programa.

B. Modelagem do Sistema Brasileiro no PacDyn

A modelagem do SIN é realizada a partir da base de dados de transitórios eletromecânicos em formato ANATEM, disponibilizada pelo ONS. No programa PacDyn, os modelos dos componentes do sistema são linearizados e assim são obtidas as equações em espaço de estados.

No caso de modelos desenvolvidos em linguagem CDU (controlador definido pelo usuário), tais como de usinas eólicas e solares, a modelagem é composta por diversos blocos elementares. Conforme detalhado em CEPEL [2019], para cada um destes blocos o PacDyn associa uma equação que descreve a relação entre entrada, saída e variáveis

de estado. As equações dos vários blocos CDU formam então um conjunto de equações que são incorporadas na representação em espaço de estados do programa.

Destaca-se que no caso das usinas solares e eólicas conectadas via conversores, as dinâmicas associadas aos modelos são poucas e rápidas. Neste caso, as dinâmicas do gerador eólico não influenciam diretamente na estabilidade a pequenas perturbações, por estarem desacopladas pelo elo CC

C. Casos de Estudo

Os casos de estudo adotados são referentes aos 5 anos que compreendem o PAR 2020 – 2024. Com o elevado montante de geração eólica e solar fotovoltaica esperado para a região Nordeste é escolhido o cenário conhecido como Nordeste Exportador (no patamar de carga média). Trata-se de um dos cenários estressados que é utilizado no cálculo dos limites das Interligações do SIN pelo ONS.

Para se ter uma ideia da dimensão do sistema, no caso de 2024 estão representadas 7.304 barras, 6.984 linhas de transmissão em corrente alternada e 14 elos de corrente contínua.

A Tabela 2 exibe os principais números do SIN referente aos cenários de estudo considerados. As usinas eólicas e solares fotovoltaicas estão gerando na média em de torno de 90% de sua capacidade. Vale notar que o fluxo EXPNE é gradualmente elevado ao passo que as obras de ampliação dos corredores de exportação do Nordeste entram em operação.

Tabela 2. Principais números do SIN referentes aos casos de estudo no horizonte de 2020 – 2024 com valores expressos em MW.

	Carga	Geração Convencional	Geração Eólica	Geração Solar FV	EXPNE
2020	96.948	80.954	11.212	2.339	5.849
2021	99.373	80.392	14.687	2.807	10.983
2022	101.805	81.609	15.056	3.001	11.133
2023	104.358	84.521	15.482	3.001	15.065
2024	107.113	86.483	16.583	3.001	15.356

Um ponto de destaque é que neste cenário energético, naturalmente, a geração das regiões Norte e Sudeste encontra-se reduzida de modo a maximizar a exportação do Nordeste. No caso da usina hidrelétrica (UHE) de Belo Monte, por exemplo, sua geração encontra-se zerada. Já na UHE Tucuruí é considerada vazão mínima com geração no valor 1.200 MW.

Por fim, cabe citar alguns fluxos sistêmicos importantes como o bipolo de Xingu que, no horizonte de estudo, está enviando uma faixa de 2.000 a 3.000 MW para a região Sudeste. O fluxo da Interligação Norte-Sul opera próximo de 2.000 MW no sentido de Norte para Sul.

V. RESULTADOS

A. Evolução dos Modos no Horizonte 2020 – 2024

A partir do PacDyn são identificados os modos interárea Norte-Sul, Norte-Nordeste e Sul-Sudeste pelo método

DPSE. O percentual de amortecimento e a frequência dos modos são calculados em cada um dos casos e podem ser observados na Tabela 3. Para confirmar a natureza de oscilação interárea destes modos, seus *mode shapes* de velocidade foram constantemente comparados com os exibidos na Figura 2.

A Figura 4 ilustra o mapa de pólos no plano complexo a partir dos resultados obtidos com a simulação. Os modos Norte-Sul, Norte-Nordeste e Sul-Sudeste são representados respectivamente com um “X”, um círculo e um triângulo. A escala de cores em azul é utilizada para retratar o ano do caso de estudo.

Pode ser observado então que, neste cenário de Nordeste Exportador, os amortecimentos dos modos interárea são satisfatórios, isto é, são superiores a 5 %. Dessa forma, não é verificada a necessidade de reajuste de estabilizadores de sistemas de potência do SIN, no horizonte em análise.

No entanto, um dos resultados chama atenção. No caso de 2024 o modo Norte-Sul apresenta um amortecimento destoante, no valor de 5,8%. Isto será melhor investigado nas análises a seguir.

Adicionalmente, deve-se ressaltar que na análise linear de um sistema de potência muitos fatores podem influenciar os modos de oscilação interárea tais como as características de carga, o carregamento dos circuitos, mudanças na topologia, o despacho de geradores, entre outros. Portanto, ao observar estes resultados não se deve tentar traçar relação direta de causa e efeito entre os anos, pois em cada ano de estudo o caso incorpora diversas novas obras bem como diferentes condições de carga e geração. Para tal, devem ser realizadas novas simulações a partir de um determinado ponto de operação e assim observar o efeito nos modos interárea devido à inclusão de uma obra de interesse, o que é realizado nas subseções B. e C.

Tabela 3. Evolução dos modos interárea no horizonte 2020 – 2024.

	NS		NNE		SSE	
	Amort.	f (Hz)	Amort.	f (Hz)	Amort.	f (Hz)
2020	9,8%	0,46	8,5%	0,76	16,0%	0,79
2021	9,3%	0,47	7,4%	0,72	13,3%	0,86
2022	8,8%	0,50	8,9%	0,75	14,8%	0,75
2023	11,5%	0,49	8,6%	0,75	17,4%	0,73
2024	5,8%	0,46	9,2%	0,73	16,2%	0,74

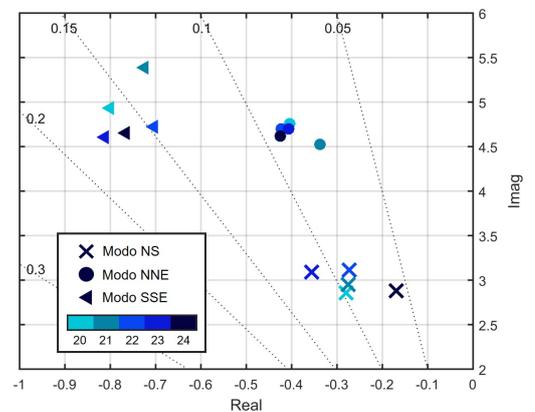


Figura 4. Mapa de pólos no plano complexo com a evolução dos modos interárea no horizonte 2020 – 2024.

B. Efeito da Ampliação da Interligação Sudeste-Nordeste

Como destacado anteriormente, a obra de ampliação da Interligação Sudeste-Nordeste inclui um grande número de linhas de transmissão que serão responsáveis por elevar substancialmente a capacidade de exportação da malha de transmissão em 500 kV entre as regiões Nordeste e Sudeste. A inclusão da referida obra impacta os fluxos de potência do SIN que por sua vez podem influenciar os modos interárea.

A fim de investigar o efeito da ampliação Sudeste-Nordeste nos modos interárea é necessário selecionar um caso base. É escolhido como base o caso de 2022 que já incorpora a ampliação completa. Para permitir uma comparação entre os casos sem e com a presença da obra, torna-se mandatório reduzir a geração das usinas eólicas do Sul da Bahia de modo a possibilitar a convergência dos casos sem a obra de ampliação. Em suma, é utilizado como base um caso de 2022 com geração reduzida nas usinas eólicas do Sul da Bahia.

Cabe lembrar que a obra é implementada em 2 estágios, o primeiro entrando em operação em 2021 e o segundo em 2022. Assim, a partir do caso base são criados mais 2 pontos de operação. Um sem a obra de ampliação e outro apenas com o primeiro estágio da ampliação.

São calculados os modos interárea para cada um dos pontos de operação e os resultados podem ser observados na Tabela 4. O caso “Parcial” representa a inclusão apenas do primeiro estágio da obra enquanto que o caso “Completo” é o próprio caso base em que toda a obra de ampliação já está incluída. Os modos interárea também podem ser visualizados graficamente no plano complexo da Figura 5. As setas representam o movimento dos modos à medida que as obras entram em operação.

Tabela 4. Efeito da ampliação da Interligação Sudeste-Nordeste no modos interárea.

	NS		NNE		SSE	
	Amort.	f (Hz)	Amort.	f (Hz)	Amort.	f (Hz)
Sem obra	6,8%	0,51	7,6%	0,72	15,6%	0,72
Parcial	9,8%	0,48	8,3%	0,74	15,6%	0,73
Completo	12,6%	0,42	9,4%	0,76	14,8%	0,74

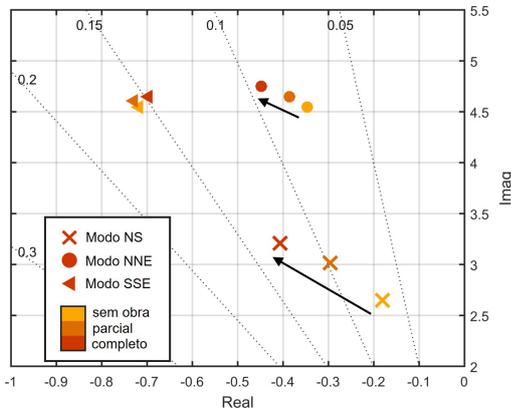


Figura 5. Mapa de pólos com o efeito da ampliação da Interligação Sudeste-Nordeste nos modos interárea.

A partir dos resultados é possível notar que com a inclusão da ampliação há um efeito positivo aumentando o amortecimento dos modos interárea Norte-Sul e Norte-Nordeste, principalmente no modo Norte-Sul que praticamente dobrou de percentual de amortecimento. O modo Sul-Sudeste altera-se marginalmente.

O resultado positivo no amortecimento pode ser explicado pelas novas distribuições de fluxos após a entrada da obra. A Tabela 5 e a Figura 6 apresentam os principais fluxos sistêmicos entre as regiões Norte-Nordeste-Sudeste. Observa-se que como a obra de ampliação aumenta o número de circuitos entre as regiões Nordeste e Sudeste, a reatância total de transferência entre os dois sistemas é reduzida, desta maneira, seu fluxo de intercâmbio aumenta. Isto é corroborado pelo aumento no fluxo FNESE. Por consequência, é constatada uma redução no carregamento dos circuitos da Interligação Norte-Sul e Norte-Nordeste, observável em uma redução nos fluxos FNS e FNEN. Em resumo, a entrada em operação da ampliação reduz os carregamentos da Interligação Norte-Sul e Norte-Nordeste, que por sua vez resultam em um aumento no amortecimento dos respectivos modos interárea.

Tabela 5. Impacto nos fluxos sistêmicos com a ampliação da Interligação Sudeste-Nordeste, valores expressos em MW.

	FNS	FNEN	FNESE
Sem obra	2.564	5.616	3.693
Parcial	1.730	4.688	4.914
Completo	1.286	4.208	5.443

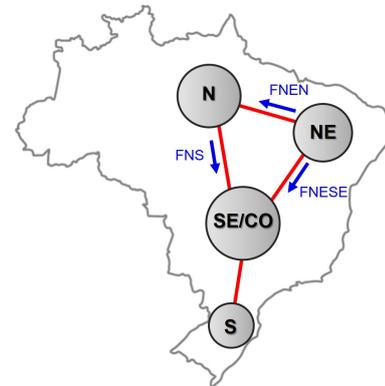


Figura 6. Mapa com os principais fluxos de potência sistêmicos da Interligação Norte-Nordeste-Sudeste.

C. Efeito da Ampliação da Interligação Norte-Nordeste

A ampliação da Interligação Norte-Nordeste também resulta em uma redistribuição dos fluxos de potência que, por consequência, afeta os modos interárea. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 6 e na Figura 7.

Nota-se que os modos Norte-Sul e Norte-Nordeste são impactados tanto positivamente quanto negativamente. Com a entrada da obra, há uma melhora substancial no amortecimento do modo Norte-Nordeste, com seu percentual praticamente dobrando de valor. Entretanto, no modo Norte-Sul há um efeito negativo tendo seu amortecimento reduzido até 5,8%, conforme comentado na subseção A.

Os impactos observados nos amortecimentos podem ser justificados pela alteração dos carregamentos de alguns

circuitos importantes das Interligações Norte-Sul e Norte-Nordeste decorrente da entrada em operação das novas linhas. Os fluxos de potência das principais linhas impactadas na região são indicados na Figura 8 e resumidos na Tabela 7. Nas abreviaturas da tabela, a ordem das letras que sucedem a letra F representam a convenção de medição dos fluxos nas linhas. As duas primeiras representam a subestação de partida do fluxo, e as duas seguintes a subestação de destino. Os fluxos FITCO, FCOMC e FRGCO simbolizam respectivamente os fluxos de potência nos circuitos de 500 kV das linhas Imperatriz – Colinas, Colinas – Miracema e Ribeiro Gonçalves – Colinas.

Tabela 6. Efeito da ampliação da Interligação Norte-Nordeste no modos interárea.

	NS		NNE		SSE	
	Amort.	f (Hz)	Amort.	f (Hz)	Amort.	f (Hz)
Sem obra	8,2%	0,48	4,8%	0,68	17,0%	0,74
Com obra	5,8%	0,46	9,2%	0,73	16,2%	0,74

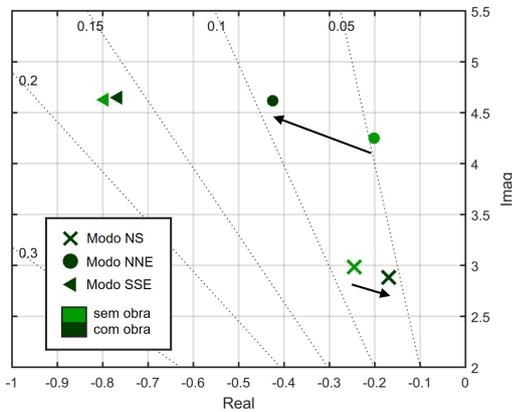


Figura 7. Mapa de pólos com o efeito da ampliação da Interligação Norte-Nordeste nos modos interárea.

A obra de ampliação configura um novo caminho para a exportação de fluxo do Nordeste para o Norte. Esta nova topologia drena mais fluxo dos circuitos da Norte-Sul deixando-os mais carregados, verificado pelo aumento em FITCO e FCOMC. Por consequência, o modo Norte-Sul fica menos amortecido. Além disto, com o alívio nos carregamentos dos circuitos da linha de 500 kV Ribeiro Gonçalves-Colinas, visível pela redução em FRGCO, o modo Norte-Nordeste torna-se mais amortecido.

VI. CONCLUSÃO

O artigo apresentou inicialmente um panorama sobre a geração e a transmissão do SIN no horizonte 2020 – 2024. É dado destaque às obras de ampliação das Interligações Norte-Nordeste e Sudeste-Nordeste. Adicionalmente, o algoritmo DPSE é descrito e empregado em simulações para analisar o impacto destas ampliações sobre os modos de oscilação interárea do SIN.

Os resultados apontaram que, em cenários de elevada geração eólica e solar no Nordeste, a entrada em operação das obras de ampliação modifica consideravelmente a topologia do sistema de transmissão até 2024 e, por conseguinte, alteram as distribuições dos fluxos de potência nas linhas das Interligações que por sua vez impactam os modos interárea. Constatou-se que os modos interárea tornam-se mais

amortecidos quando há redução no carregamento de seus respectivos circuitos de Interligação. Ademais, observou-se redução no amortecimento quando seus circuitos tornam-se mais carregados.

Tabela 7. Impacto nos fluxos de potência com a ampliação da Interligação Norte-Nordeste, em MW.

	FITCO	FCOMC	FRGCO
Sem obra	205	1.511	2.983
Com obra	722	2.073	2.586

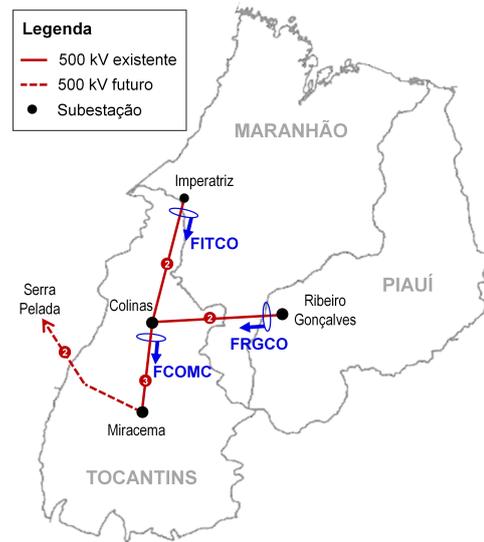


Figura 8. Mapa com alguns dos principais fluxos dos circuitos da Interligação Norte-Sul e Norte-Nordeste.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES - código de financiamento 001, INERGE, Fapemig e Faperj. Os autores também gostariam de agradecer à professora Tatiana M. L. Assis (COPPE) e ao ONS.

REFERÊNCIAS

- CEPEL (2019). *Manual do Usuário do PacDyn 9.9.8*. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Brasil, RJ.
- Hauser, D. and Taranto, G.N. (2019). Impacto de centrais geradoras fotovoltaicas na estabilidade transitória e nos modos de oscilação do SIN. *XXV SNPTEE*, Belo Horizonte.
- Kundur, P. (1994). *Power system stability and control*. McGraw-hill New York.
- Leandro, R.B., Decker, I.C., Silva, A.S., and Agostini, M.N. (2017). Monitoramento on-line dos principais modos interárea do SIN utilizando sincrofasores. *XXIV SNPTEE*, Curitiba.
- Martins, N. (1997). The dominant pole spectrum eigensolver. *IEEE Transactions on Power Systems*, 12(1), 245–254.
- Martins, N., Lima, L.T.G., and Pinto, H.J.C.P. (1996). Computing dominant poles of power system transfer functions. *IEEE Transactions on Power Systems*, 11(1), 162–170.
- Ogata, K. (2010). *Engenharia de Controle Moderno*. Pearson Prentice Hall, Brasil, SP, 5th edition.
- ONS (2019a). *PAR/PEL Executivo 2020 – 2024*. Operador Nacional do Sistema Elétrico, Brasil, RJ.
- ONS (2019b). *Planejamento Elétrico de Médio Prazo do SIN 2020-2024 Vol II*. Operador Nacional do Sistema Elétrico, Brasil, RJ.