



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GAT/17

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

**AValiação Pós-operativa de Oscilações Naturais do Sistema Interligado Nacional
Utilizando Dados de Tempo Real**

Sergio Gomes Junior
CEPEL, UFF

Thiago J. Masseran A. Parreiras
CEPEL

Marcelo Rosado da Costa
CEPEL

Paulo Eduardo M. Quintão
ONS

Neyl Hamilton M. Soares
ONS

Hector Volskis
ONS

Nicolas A. R. Leite Netto
CEPEL

RESUMO

Neste trabalho é proposta a análise pós-operativa utilizando a nova função de monitoração de oscilações em tempo real do PacDyn com pontos de operação passados obtidos do SAGE. O objetivo é identificar problemas de mal amortecimento de oscilações ao longo da operação real do sistema para a melhoria do planejamento da operação. Outro benefício é a validação dos resultados de simulação com registros de campo para melhoria da base de dados dinâmicos dos estudos. São apresentados dois exemplos utilizando dados reais do Sistema Interligado Nacional onde fica evidente a importância da análise proposta e a validade dos resultados de simulação.

PALAVRAS-CHAVE

Estabilidade a pequenos sinais de sistemas de potência, Avaliação de segurança dinâmica a pequenos sinais, Análise modal, Análise de contingências, Monitoração de oscilações em sistemas de potência.

1.0 - INTRODUÇÃO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) possui grandes dimensões e está constantemente sendo alterado pela entrada de novos equipamentos definidos nos critérios de planejamento. Durante a sua operação, a sua topologia é ainda frequentemente alterada seja por falhas, desligamentos programados ou para melhor atendimento à sua demanda. Além disto, é submetido a amplas variações dos seus pontos de operação, pelas grandes variações de intercâmbios entre suas diferentes áreas com o objetivo do atendimento seguro, confiável e eficiente da demanda de energia, que possui forte natureza aleatória, respeitando restrições energéticas. Estas características tornam a operação do SIN bastante complexa tanto em tempo real como nos estudos do planejamento da operação.

Convencionalmente, os estudos de planejamento da operação buscam determinar uma diversidade de pontos de operações críticos que cubram de forma confiável e segura os possíveis problemas que podem ocorrer durante o amplo espectro de possibilidades operativas do sistema. Além disto, busca definir procedimentos operativos em situações de emergência e restrições operativas, baseadas nas simulações destes pontos de operação. Esta metodologia é bastante eficiente, no entanto, depende da qualidade da análise realizada e do grau de conhecimento dos analistas do sistema em estudo.

Recentemente, foi realizada a integração de programas de análise dinâmica de redes elétricas (ANATEM [1] e PacDyn [2]) ao sistema de supervisão e controle SAGE [3] ("Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia"). O objetivo principal deste trabalho de integração seria permitir realizar simulações em um ponto de operação de tempo real, em uma análise posterior denominada "modo estudo". Adicionalmente foram desenvolvidas ferramentas de avaliação de segurança estática e dinâmica e de monitoração em tempo real baseadas nestes programas.

Vislumbra-se que praticamente todas as ferramentas desenvolvidas poderiam também ser aplicadas ao planejamento da operação utilizando pontos de operação "sintéticos" ou os próprios pontos de operação de tempo real do SAGE. Neste caso, haveria uma mudança de paradigma, pois seria possível realizar uma análise pós-operativa baseada em pontos de operação em tempo real nos estudos de planejamento da operação, considerando situações operativas mais realistas e, ao ser aplicada a um longo período, seria possível identificar situações operativas específicas que porventura não estariam sendo suficientemente cobertas pelos pontos de operação críticos utilizados nos estudos convencionais.

A análise das oscilações naturais do sistema, realizada pelo programa PacDyn, é um dos aspectos a considerar na avaliação da segurança dinâmica do SIN. O objetivo desta análise é a avaliação da frequência e do fator de amortecimento dos modos de oscilação representados pelos polos do sistema. Ao testar o PacDyn com pontos de operação gerados no SAGE, verificou-se que diversos polos, representando modos de oscilação inter-áreas, possuem variações significativas de suas características ao longo do dia, principalmente no seu fator de amortecimento que, caso seja inferior a um valor mínimo padrão (e.g. 5%) indicaria uma situação de baixo amortecimento e, caso negativo, uma situação de instabilidade, que poderia causar desligamentos e blecautes no sistema. Esta avaliação pode ser realizada tanto para o caso base, como para uma lista de contingências, permitindo identificar situações de insegurança do sistema, que não seriam percebidas caso a contingência analisada não ocorresse.

No artigo, será descrita a aplicação da monitoração das oscilações naturais na análise pós-operativa do SIN. A grande vantagem desta metodologia é que ela pode ser aplicada sem a necessidade de utilização de premissas para definição dos pontos de operação, uma vez que os mesmos são simplesmente gerados automaticamente pelo SAGE, baseados exclusivamente nas medições aquisitadas diretamente do sistema. Também podem ser reconstituídos eventos específicos, com o objetivo de identificar as reais causas das ocorrências. No artigo, foram escolhidos dois casos exemplos, utilizando dados de tempo real do SIN, de diferentes períodos de tempo que ilustram a importância da utilização do monitoramento de oscilações naturais nos estudos de planejamento da operação. Fica evidente a importância desta mudança de paradigma de considerar a análise pós-operativa do sistema utilizando os pontos da operação históricos de tempo real nos estudos de oscilações do sistema no planejamento da operação, em complemento aos pontos de operação críticos tradicionalmente utilizados, aumentando a confiabilidade e segurança do SIN.

2.0 - CÁLCULO ENVOLVIDO NA MONITORAÇÃO DE OSCILAÇÕES NATURAIS

As oscilações naturais são obtidas pelo cálculo de autovalores generalizados do sistema linear de equações algébrico-diferenciais obtido pela linearização do sistema não linear de equações que modela o sistema de potência para simulações de transitórios eletromecânicos. A linearização do sistema é apresentada a seguir [2]:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{u}) & \Delta \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{J}_1 \Delta \mathbf{x} + \mathbf{J}_2 \Delta \mathbf{r} + \mathbf{B}_x \Delta \mathbf{u} \\ 0 &= \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{u}) \Rightarrow \mathbf{0} &= \mathbf{J}_3 \Delta \mathbf{x} + \mathbf{J}_4 \Delta \mathbf{r} + \mathbf{B}_r \Delta \mathbf{u} \Rightarrow \mathbf{0} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{u}) & \Delta \mathbf{y} &= \mathbf{C}_x \Delta \mathbf{x} + \mathbf{C}_r \Delta \mathbf{r} + \mathbf{D}_a \Delta \mathbf{u} \end{aligned} \quad \begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{0} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 & \mathbf{B}_x \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 & \mathbf{B}_r \\ \mathbf{C}_x & \mathbf{C}_r & \mathbf{D}_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{r} \\ \Delta \mathbf{u} \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde \mathbf{x} é um vetor com as variáveis de estado, \mathbf{r} com as variáveis algébricas, \mathbf{u} com as possíveis entradas do sistema e \mathbf{y} com as possíveis saídas. O símbolo Δ antes de cada variável significa desvio da variável em relação ao seu valor inicial, originário da inicialização de variáveis do sistema. As submatrizes \mathbf{J}_1 , \mathbf{J}_2 , \mathbf{J}_3 , \mathbf{J}_4 , \mathbf{B}_x , \mathbf{B}_r , \mathbf{C}_x e \mathbf{C}_r e \mathbf{D}_a são obtidas por diferenciação parcial de cada uma das funções não lineares \mathbf{f} , \mathbf{g} e \mathbf{h} em relação a cada uma das variáveis. A linearização considera que apenas pequenos distúrbios serão aplicados de forma que os desvios de cada variável não alteram significativamente os elementos das matrizes obtidas e a dinâmica descrita pelo sistema de equações é válida. Escolhendo-se uma única entrada u e uma saída y do sistema e utilizando a transformada de Laplace, o sistema linearizado de equações pode ser escrito no domínio s:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{0} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 & \mathbf{b}_x \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 & \mathbf{b}_r \\ \mathbf{c}_x & \mathbf{c}_r & d_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{r} \\ \Delta \mathbf{u} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} s \Delta \mathbf{X} \\ \mathbf{0} \\ \Delta Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 & \mathbf{b}_x \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 & \mathbf{b}_r \\ \mathbf{c}_x & \mathbf{c}_r & d_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{X} \\ \Delta \mathbf{R} \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (2)$$

Pode-se então calcular uma função de transferência de uma entrada e uma saída (SISO), definida como a relação entre a saída e a entrada [2]:

$$G(s) = \frac{\Delta Y(s)}{\Delta U(s)} = [\mathbf{c}_x \mid \mathbf{c}_r] \cdot \begin{bmatrix} s\mathbf{I} - \mathbf{J}_1 & -\mathbf{J}_2 \\ -\mathbf{J}_3 & -\mathbf{J}_4 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{b}_x \\ \mathbf{b}_r \end{bmatrix}, \text{ sendo: } \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix}, \mathbf{T} = \begin{bmatrix} s\mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Para qualquer entrada ou saída escolhida, definidas pelos vetores \mathbf{b}_x , \mathbf{b}_r , \mathbf{c}_x e \mathbf{c}_r , os polos do sistema, que são os valores de s que fazem com que a função de transferência tenda a infinito, serão também os valores que tornam a matriz em (3) não inversível. Estes polos correspondem aos autovalores generalizados do par matricial (\mathbf{J}, \mathbf{T}) .

A função de transferência em (3) pode ser escrita na forma de frações parciais, a partir de seu conjunto de polos λ_i e resíduos R_i :

$$G(s) = \sum_i \frac{R_i}{s - \lambda_i} + d \quad (4)$$

Os polos dominantes são definidos como sendo os que possuem maior resíduo, que são os pesos dos termos relativos a cada polo. Portanto, os polos com resíduos de maior valor são os mais importantes da função de transferência. Existem alguns algoritmos que permitem o cálculo dos polos dominantes e respectivos resíduos de uma dada função de transferência. Dois destes algoritmos foram utilizados neste trabalho [5], [6]; Ambos possuem a característica de, a partir de uma dada estimativa de polo, convergir para o polo dominante mais próximo, quase que ignorando a presença de polos não dominantes próximos à estimativa.

A metodologia proposta neste trabalho para monitoração dos polos de interesse é, inicialmente, calcular todos os polos do sistema utilizando, por exemplo, o algoritmo QR [2] e selecionar os polos de interesse em função de serem eletromecânicos, com baixo fator de amortecimento, pela região onde atuam, ou por possíveis ocorrências passadas de problemas de oscilações. Utiliza-se as funções de mode-shapes de velocidades e fatores de participação nesta análise e seleção. Com a definição desta escolha, pode-se então selecionar uma função de transferência baseada nas variáveis da região de interesse. Como regra geral utilizou-se uma função de transferência padrão correspondente a uma variável de saída velocidade (ω) e variável de entrada tensão de referência (V_{ref}) da máquina com maior fator de participação para cada um dos modos ou a de maior resíduo para esta função de transferência. Múltiplas estimativas de polos podem ser utilizadas para cada função de transferência. Executa-se, então, o módulo de monitoração com os valores iniciais dos polos escolhidos. A tendência é que o algoritmo, conforme for aquisitando novos pontos de operação, continue convergindo para o mesmo polo, desde que se utilize sempre a estimativa dos polos como sendo as dos valores no tempo anterior.

3.0 - MONITORAÇÃO DE OSCILAÇÕES NATURAIS DO SISTEMA EM TEMPO REAL

O sistema SAGE atualmente pode gerar, periodicamente, pontos de operação em tempo real, com intervalos predefinidos, usualmente da ordem de alguns minutos, no formato de dados de fluxo de potência do programa Anarede [4]. Estes pontos podem ser utilizados tanto para simulações estáticas como dinâmicas. Por exemplo, é possível realizar um fluxo de potência continuado, com o objetivo de determinar a margem de carregamento do sistema. Também é possível simular no programa Anatem o comportamento dinâmico do sistema para uma lista de contingências, com o objetivo de verificar se o sistema suporta cada uma delas. No PacDyn, é possível calcular os modos naturais de oscilações inter-áreas, ou mesmo locais de usinas de interesse, para verificação de suas características, principalmente em relação à frequência e ao fator de amortecimento. Também é possível calcular estes modos de oscilações na ocorrência de contingências, onde o ponto de operação em contingência é calculado pelo Anarede, aplicando-se a contingência no caso gerado pelo SAGE e convergindo o novo fluxo de potência, e é entregue automaticamente ao PacDyn para os cálculos dos modos de oscilações.

Para as simulações dinâmicas, tanto no Anatem como no PacDyn, utiliza-se o banco de dados dinâmico no formato Anatem. Foram feitas algumas adaptações dos programas e do banco de dados, para que não fosse necessário qualquer tipo de intervenção por parte do usuário, uma vez que, para uso na operação de tempo real, os resultados devem ser obtidos continuamente, com o menor tempo possível e com as informações relevantes já filtradas. Em outras palavras, o banco de dados dinâmico é fixo e compatível com qualquer ponto de operação vindo do SAGE.

Uma das principais alterações está relacionada com as informações de quantidade de máquinas geradoras em cada usina modelada, que passou a ser feita pelo SAGE, a partir do código DGEI. As reatâncias equivalentes dos transformadores elevadores também são ajustadas em função do fluxo de potência em tempo real. Originalmente, estas informações são ajustadas manualmente pelo usuário no código de execução DMAQ ou são ajustadas automaticamente pelo programa ANATO com os menores valores possíveis de quantidades de máquinas em cada usina respeitando as suas capacidades (critério de inércia mínima). No caso do ponto de operação aquisitado, as quantidades de máquinas das usinas não devem ser alteradas, pois refletem a condição vinda do tempo real.

Outra alteração está relacionada com a questão de usinas fora de operação. Originalmente, todas as máquinas presentes no arquivo dinâmico deviam existir no arquivo de fluxo de potência. No entanto, um certo ponto de operação do SAGE pode não possuir uma determinada geração pois a usina correspondente pode estar desligada. Neste caso, as atuais versões do Anatem e PacDyn automaticamente consideram que a inexistência da geração significa que a usina está desligada e não consideram que há erro no banco de dados.

Foi, então, criado um módulo no PacDyn para realizar a monitoração das oscilações naturais de sistemas de potência em tempo real, denominado RTMO ("Real-Time Monitoring of Oscillations"), descrito em detalhes em [7]. Neste módulo, para cada ponto de operação fornecido pelo SAGE, é feito o cálculo de polos dominantes das funções de transferência selecionadas, que tendem a convergir para os polos de interesse da análise. A escolha das funções de transferência e das estimativas iniciais do polo definirão uma maior ou menor qualidade da monitoração dos polos de interesse.

O resultado desta monitoração são gráficos que mostram a evolução dos polos ao longo do tempo. Podem ser traçados 3 tipos de gráfico: Frequência x Tempo, Fator de Amortecimento x Tempo e Polos no plano s com a informação do tempo. No item 5, que contém os resultados das simulações realizadas neste trabalho, são apresentados exemplos destes gráficos na análise do SIN. A partir destes gráficos, é possível ter uma boa ideia da variação do comportamento dos polos de interesse ao longo do tempo, sendo ainda possível recuperar um ponto de operação específico para análise, a partir da inspeção de pontos críticos dos gráficos gerados para uma análise em modo de estudo, durante a operação em tempo real ou em momento posterior.

4.0 - AVALIAÇÃO PÓS-OPERATIVA DE OSCILAÇÕES NATURAIS

Neste artigo, propõe-se que seja realizada a avaliação pós-operativa das oscilações naturais, utilizando os dados de tempo real de pontos de operação passados, permitindo verificar se o sistema estava inseguro por algum período de tempo e se seria possível passar a adotar medidas que evitassem este risco.

A metodologia de análise consiste no armazenamento dos pontos de operação de forma contínua e na simulação, no PacDyn, de toda a sequência de pontos como se fossem em tempo real, mas quando na realidade são de dados passados. Na implementação da monitoração em tempo real do PacDyn, utiliza-se como tempo do ponto de operação o próprio tempo gerado pelo SAGE, permitindo que sejam processados tempos com certo atraso, sem que isto prejudique a identificação do instante do ponto.

Para que a monitoração de oscilações pudesse ser realizado tanto em tempo real, como em uma análise pós-operativa, desenvolveu-se um módulo criado no PacDyn, denominado RTMO ("Real Time Monitoring of Oscillations"), conforme descrito em [7]. Em [8] é apresentada a aplicação em tempo real do RTMO e, neste artigo, o foco é na aplicação para a análise pós-operativa.

O RTMO utiliza um folder no sistema Windows onde são gravados todos os pontos de operação a serem analisados. Em tempo real, este folder é continuamente atualizado com os novos pontos de operação que estão sendo periodicamente gerado pelo estimador de estado do SAGE. Por outro lado, na análise pós-operativa, todos os arquivos a serem analisados, também obtidos no SAGE, já são gravados previamente. Em ambas as situações, os nomes dos arquivos obedecem um padrão em que a data e hora do ponto de operação está incluída como informação. A partir disto, o módulo RTMO é iniciado, utilizando uma data e hora inicial e final definida pelo analista. O programa fará então uma varredura dos arquivos e processará cada um dos pontos de operação presentes de forma sequencial, obedecendo o intervalo definido. Deve-se observar que para processamento do primeiro ponto de operação disponível, pode-se utilizar como data inicial o valor fictício 01/01/0001 e se o processamento for para ser contínuo, sem interrupção, pode-se utilizar como data final 31/12/9999.

Para cada ponto de operação processado, o RTMO calcula os polos dominantes do sistema, utilizando os valores das estimativas iniciais que são definidas previamente e as correspondentes funções de transferência, e grava em arquivos estes polos com a informação do tempo, para que seja possível o seu traçado gráfico ao longo do tempo, que é atualizado automaticamente.

A análise pós-operativa consiste, então, em calcular estes polos sem a necessidade de espera de novos pontos de operação, onde cada ponto aquisitado em um período de alguns minutos, pode ser processado em poucos segundos, sem que seja necessária a espera do "futuro presente" como seria necessário em tempo real.

Outra diferença entre a monitoração em tempo real e a análise pós-operativa seria que esta última permite que sejam testadas diversas possibilidades de funções de transferência e estimativas de polos de forma a monitorar com confiabilidade e robustez os polos de interesse, sem que haja perdas de monitoração, seja por não convergência ou por convergência para um outro polo, que não era o foco da análise (problema de perda de "tracking"). Já no tempo real, não é possível ficar alterando constantemente as estimativas e funções de transferência, pois a cada mudança, a monitoração acaba sendo interrompida. A análise pós-operativa então permitirá a obtenção dos melhores parâmetros para utilização do sistema em tempo real, ou seja, possíveis perdas de "tracking" podem ser identificadas na análise pós-operativa, resolvidas e repassadas para o tempo real.

Obtém-se, então, gráficos que apresentam todas as ocorrências de problemas de amortecimento em um período de análise que pode ser relativamente longo e considerando contingências. No caso de ocorrência de problemas em contingência, o sistema estaria inseguro naquele período correspondente, havendo o risco de desligamentos, mas, desde que a correspondente contingência não tivesse ocorrido naquele período e não houvesse este tipo de monitoração, isto talvez nem fosse percebido.

Uma outra aplicação importante da análise pós-operativa é a depuração do banco de dados tanto de regime permanente, vindo da SAGE, como dinâmico, fixo, mas com atualizações conforme a evolução do sistema. Nesta aplicação seria possível identificar inconsistências de comportamento do sistema ao se comparar os resultados da monitoração com os respectivos resultados reais de campo. Assim, caso as frequências e os fatores de amortecimento de alguns modos obtidos na simulação não correspondam aos que estão sendo observados em campo, haverá um problema de dados que deve ser investigado e corrigido. Na análise pós-operativa, podem ser testados os impactos das diversas alterações dos dados do sistema na melhoria da correspondência entre os resultados de simulação e os observados no sistema real.

5.0 - SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste trabalho, foram realizados testes utilizando dados de tempo real do SIN. Os primeiros resultados dizem respeito à semana compreendida entre os dias 22/04/2016 e 29/04/2016. Utilizou-se um banco de dados dinâmico preliminar obtido da adaptação do banco de dados do SIN para estudos de planejamento de operação do ano de 2016 e a versão de 2016 do SAGE, originários do Centro de Operação do Sistema (COS) em Brasília, para obtenção dos arquivos de fluxo de potência. Dois modos de oscilação foram monitorados, conforme apresentado na Tabela 1:

Polos	Frequência (Hz)	Fator de amortecimento (%)
$-0,2327 + j3,9667$	0,63	5,86
$-0,0904 + j2,8767$	0,46	3,14

Os mode-shapes de velocidade de cada um dos dois modos são apresentados na Figura 1. Observa-se que o primeiro é um dos modos de oscilação da Interligação Norte-Sul, onde verifica-se que a região elétrica Norte-Nordeste oscila contra a região Sul-Sudeste e o segundo é um dos modos do complexo do Madeira que oscila principalmente contra o sistema da região Norte-Nordeste.

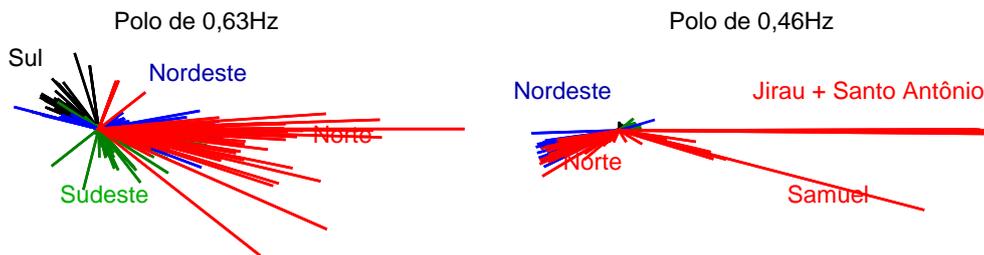


FIGURA 1 – Mode-shapes de velocidade dos dois modos monitorados.

Estes polos foram, então, monitorados utilizando a análise pós-operativa proposta. Foram considerado 1.182 pontos de operação obtidos do backup de arquivos do sistema SAGE. Foram consideradas ainda duas contingências: a saída de um dos circuitos do tronco de 765 kV do sistema de escoamento de Itaipu (trecho Itaberá-Tijuco Preto) e de um dos circuitos de 500 kV da Interligação Norte-Sul (trecho Colinas-Imperatriz). Para o ponto de operação inicial (22/04/2016, 0:08h), o primeiro circuito estava transmitindo 1850 MW e o segundo 750 MW. Este período de tempo de 1 semana (168 horas) foi simulado no módulo RTMO em 4 horas e 53 minutos, ou seja, muito mais rápido que o tempo real, sendo cada ponto de operação com suas respectivas duas contingências processados em aproximadamente 15 s em um computador Intel Core i5-3570, 3,4 Ghz, sem utilização de processamento paralelo. Os gráficos das Figuras 2 e 3 apresentam os resultados dos fatores de amortecimento e das frequências dos dois modos de oscilação para o caso base.

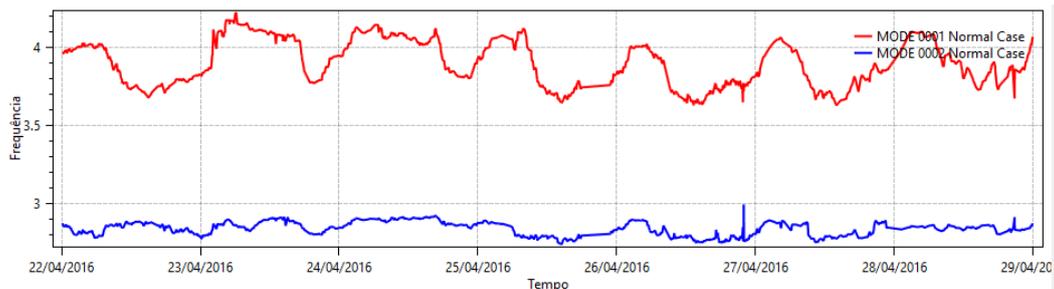


FIGURA 2 – Frequência dos dois modos monitorados ao longo do tempo.

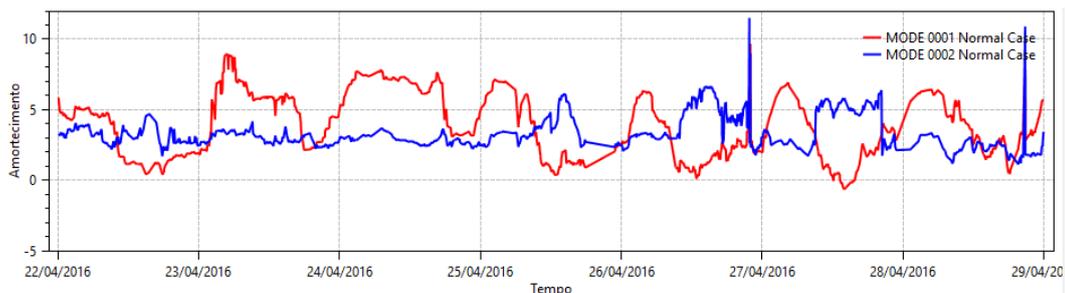


FIGURA 3 – Fator de amortecimento dos dois modos monitorados ao longo do tempo.

Por estes gráficos verifica-se que a frequência é bem menos variável que o fator de amortecimento ao longo do período de tempo. Observa-se ainda que há alguns poucos períodos onde há a ocorrência de amortecimentos negativos para o caso base, que provavelmente não são consistentes, pois não houve relato de problemas de oscilação durante o período de tempo considerado. Isto demonstra a capacidade deste tipo de análise pós-operativa identificar inconsistências para posteriores melhorias e depurações dos dados utilizados nas simulações.

Na Fig. 4, à esquerda, é apresentado o gráfico dos dois polos no plano s , que dá uma visão geral da dispersão do posicionamento dos polos ao longo do período de tempo analisado e, à direita, é feita uma ampliação em torno de um dos polos, para os últimos instantes de tempo analisados. Os últimos seis tempos são conectados por uma curva interpolada, sendo que o último ponto é indicado por um losango e os quatro anteriores por um círculo com tamanhos menores para os tempos mais anteriores. O objetivo é destacar os tempos próximos do instante atual na análise em tempo real. Para a análise pós-operativa, esta indicação é menos relevante, podendo ser desabilitada.

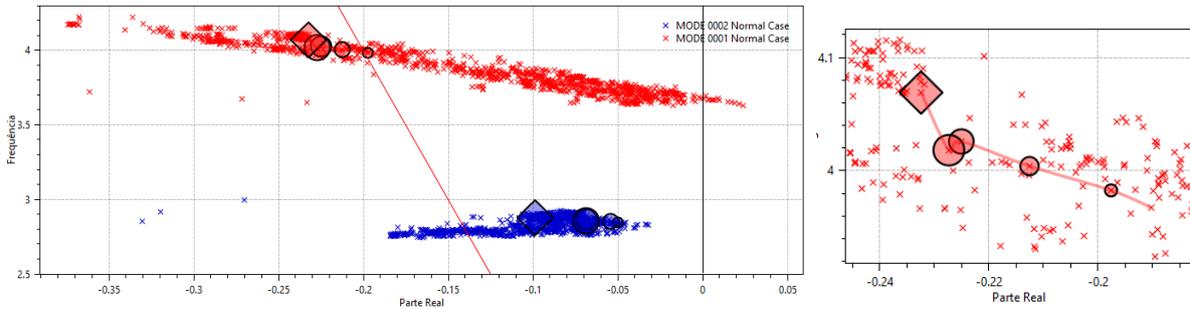


FIGURA 4 – Mapeamento dos dois modos monitorados ao longo do tempo no plano s .

Nas Figuras 5 e 6 são apresentados os gráficos da monitoração incluindo-se os resultados das contingências. As linhas referentes ao caso base foram engrossadas para melhor visualização. Por estes gráficos observa-se que há algumas contingências que causariam problemas de oscilações. Isto identificaria estado de insegurança do sistema em relação a oscilações naturais.

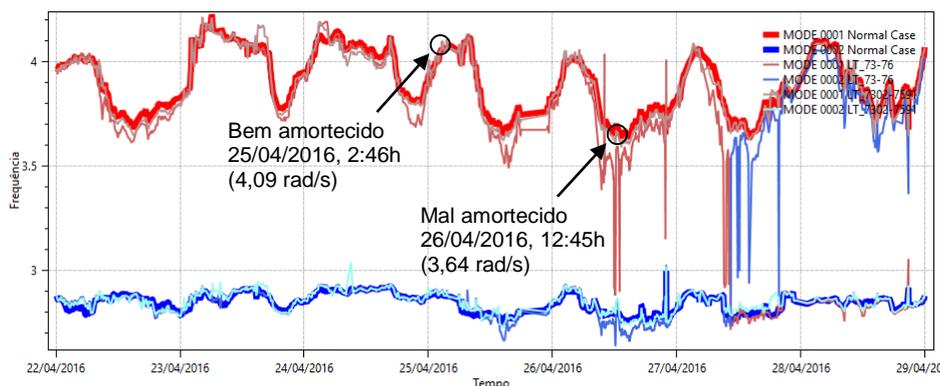


FIGURA 5 – Frequência dos dois modos monitorados considerando as duas contingências.

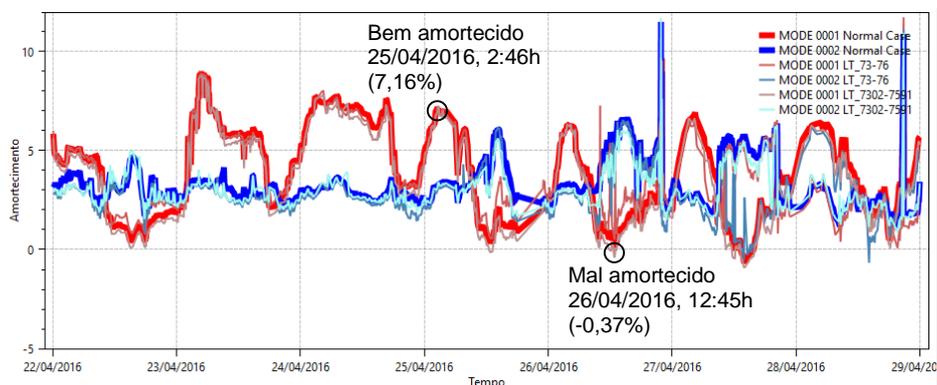


FIGURA 6 – Fator de amortecimento dos dois modos monitorados considerando as duas contingências.

O instante de tempo correspondente de cada ponto pode ser obtido clicando-se no ponto na nova versão do programa de visualização gráfica Plot Cepel em qualquer um dos três tipos de gráficos. Isto permite que se identifique e recupere o ponto de operação, com as características dos polos analisados, para posterior análise em modo de estudo. Este recurso foi utilizado para verificar a consistência de resultados do PacDyn com o programa

Anatem de simulação no tempo. Considerou-se a contingência de curto circuito monofásico no circuito da Norte-Sul em Colinas, seguido da abertura da linha em dois diferentes instantes de ocorrência, um com os polos bem amortecidos (25/04/2016, 2:46h, madrugada de domingo para segunda) e outro com um dos polos com amortecimento negativo (26/04/2016, 12:45h, tarde de terça-feira). Estes dois pontos estão destacados no gráfico da Figura 6.

A contingência foi então simulada no Anatem considerando cada um dos respectivos instantes. Na Figura 7 é apresentado o gráfico da potência elétrica de Angra I para os dois instantes distintos de tempo. Verifica-se que os resultados no Anatem são consistentes com os obtidos no PacDyn, ou seja, para o instante em que os polos são amortecidos, a simulação no Anatem apresenta oscilações amortecidas, enquanto que para o instante em que o polo tem amortecimento negativo, a simulação no Anatem apresenta oscilação sustentada, sendo o caso instável a pequenos sinais. Observa-se ainda que a frequência de oscilação do gráfico no Anatem (3,62 rad/s, calculado pelo período entre máximos vizinhos) é bem próxima da informação obtida na monitoração (3,64 rad/s).

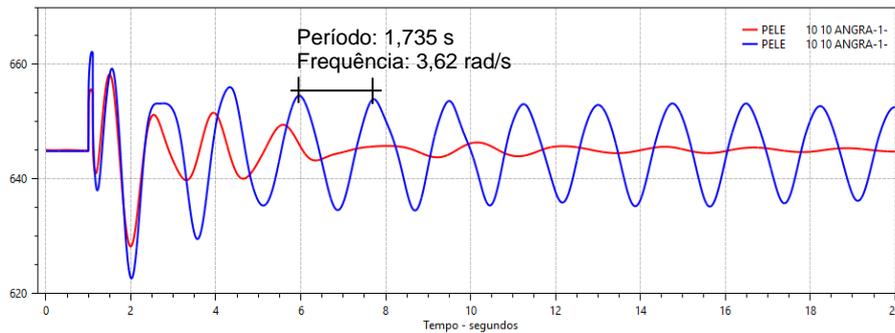


FIGURA 7 – Simulação da contingência da Norte-Sul no Anatem da potência de Angra I para os dois instantes distintos de tempo, o azul mal amortecido (25/04/2016, 2:46h) e o vermelho bem amortecido (26/04/2016, 12:45h).

A seguir é apresentado o estudo de monitoração de oscilações naturais utilizando um segundo exemplo, referente a uma contingência real ocorrida no sistema, em 26/10/2016 por volta das 14:07h na região de Tijuco Preto, conforme boletim diário da operação do ONS. O registro da ocorrência nos primeiros segundos do evento é apresentado na Figura 8, obtido a partir das unidades de medição fasorial (PMU) do sistema de Furnas [9], onde à esquerda é mostrada a tensão de Tijuco Preto 765 kV e à direita a corrente do trecho Itaberá-Tijuco Preto do tronco de 765 kV. Resgatou-se os pontos de operação no SAGE do dia anterior ao dia seguinte do COS Brasília para realizar a análise pós-operativa proposta neste trabalho. Identificou-se o modo de oscilação dominante da região de Tijuco Preto, que está aparente nos registros da PMU. Realizou-se a monitoração do polo correspondente conforme apresentado na Figura 9.

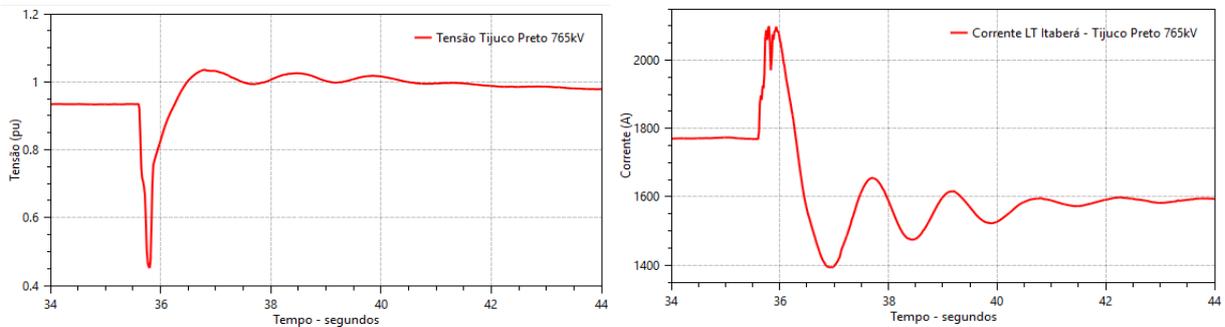


FIGURA 8 – Registros de PMU do sistema Furnas do dia 26/10/2016 às 14:07h da tensão em Tijuco Preto e corrente em um dos circuitos do tronco de 765 kV no trecho Itaberá-Tijuco Preto.

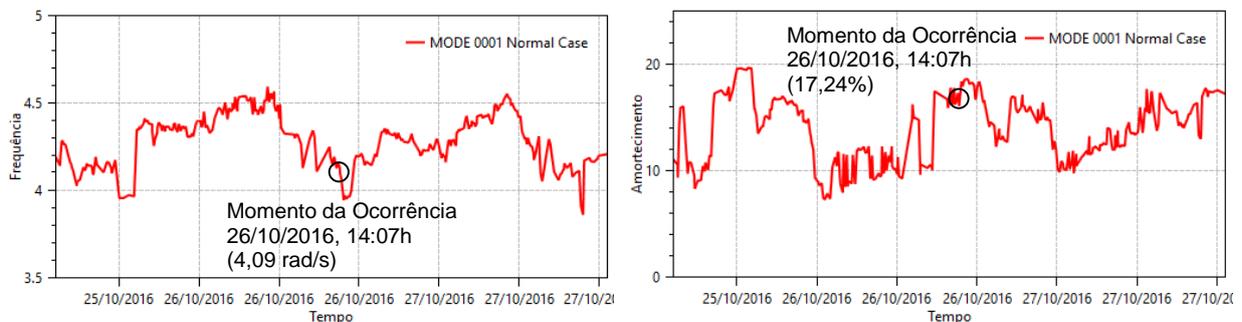


FIGURA 9 – Frequência e fator de amortecimento da oscilação natural monitorada na análise pós-operativa.

Verifica-se que por todo o período analisado, o modo de oscilação possui fator de amortecimento superior a 5%, indicando que o sistema não possui problema de amortecimento de oscilações, mesmo se a ocorrência tivesse acontecido em qualquer momento destes três dias monitorados. Portanto, neste caso, o sistema estava seguro do ponto de vista de amortecimento de oscilações, mas caso não estivesse, esta análise iria apontar o problema.

Para confirmar a coerência da monitoração realizada com o resultado registrado em campo, calculou-se uma estimativa do polo dominante aplicando-se o método ERA [10] de separação modal ao registro da PMU para a corrente de Itaberá-Tijuco Preto. Na Tabela 2 é apresentada a comparação entre o polo calculado no PacDyn, conforme utilizado na monitoração da análise pós-operativa e o polo estimado pelo ERA. Verifica-se que os valores estão bem próximos, tanto em frequência como em fator de amortecimento. Isto comprova a consistência do resultado da análise operativa com os resultados aparentes no sistema real.

Tabela 2 – Comparação do polo calculado na monitoração da oscilação natural da análise pós-operativa e o estimado pelo método ERA baseado no registro de PMU da ocorrência considerada

Modos de Oscilação pelo módulo RTMO		Modos de Oscilação pelo Método ERA	
Polo	Fator de Amort. (%)	Polo	Fator de Amort. (%)
-0.71653 + j 4.0940	17.240	-0.62647 + j 4.0082	15.442

6.0 - CONCLUSÃO

Neste artigo, foi realizada uma revisão da modelagem matemática utilizada para a determinação de oscilações naturais em sistemas elétricos de potência, através do cálculo de modos de oscilação, e foi apresentada uma proposta de realização de análise pós-operativa de oscilações no PacDyn, utilizando os dados de tempo real provenientes do sistema SAGE. Foi utilizado um caso exemplo do Sistema Interligado Nacional, onde foram apresentados resultados de uma monitoração do SIN, de uma semana de abril de 2016, e onde os resultados dessa monitoração no PacDyn foram comparados com simulações do Anatem, comprovando a consistência dos resultados obtidos nas simulações em ambos os programas. Verificou-se ainda que havia curtos períodos de tempo com instabilidade no caso base (modos de oscilação com amortecimento negativo), indicando que existe uma necessidade de um aprimoramento da base de dados para análise de oscilações utilizando casos do tempo real. Um segundo conjunto de resultados de análise pós-operativas de oscilações foi também apresentado, onde uma ocorrência real foi analisada, sendo comparada com os resultados da monitoração no PacDyn, obtendo-se resultados consistentes também neste caso. A avaliação dos resultados obtidos nas simulações desse trabalho sugere que a análise pós-operativa proposta neste artigo pode ser bastante útil para os estudos de oscilações em sistemas elétricos, contribuindo para uma melhor operação desses sistemas.

7.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Eng. Marco Antonio Fernandes Ramos de Furnas e aos pesquisadores João Cândia de Oliveira do Cepel e Nivaldo Lambert da PUC-Rio pela disponibilização dos dados registrados de PMU do sistema piloto PDC de Furnas.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CEPEL, "ANATEM - Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos - Version 11.1 - Manual do Usuário", Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.
- (2) CEPEL, "PacDyn - Program of Small Signal Stability Analysis and Control - Version 9.9 - User's Manual", Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.
- (3) OLIVEIRA FILHO, A. L., SANTOS, H. T., PEREIRA, L. A. C., LIMA, L. C., LAMBERT, N., CRUZ, D., SCHIO, G. R., GOMES, D. B., LAMEIRÃO, A. M. M. S., "Soluções para a Rede de Gerenciamento de Energia do ONS – REGER", XXI SNPTEE, Florianópolis, SC, Brasil, 2011.
- (4) CEPEL, "ANAREDE - Programa de Análise de Redes - Version 10.1.3 - Manual do Usuário", Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.
- (5) MARTINS, N., "The Dominant Pole Spectrum Eigensolver for Power System Stability Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, v. 12, n. 1, p. 245-254, 1997.
- (6) GOMES JUNIOR, S., MARTINS, N., PORTELA, C., "Sequential Computation of Transfer Function Dominant Poles of s-Domain System Models", IEEE Transactions on Power Systems, v. 24, n. 2, p. 776-784, 2009.
- (7) PARREIRAS, T. J. M. A., GOMES JUNIOR, S., AMARAL, T. S., "Análise de Contingências e Monitoração de Oscilações no PacDyn para Avaliação de Segurança Dinâmica de Sistemas de Potência", XXIV SNPTEE, Curitiba, PR, Brasil, 2017.

(8) COSTA, M. R., GOMES JUNIOR, S., PARREIRAS, T. J. M. A., "Integração de uma Ferramenta de SSA ao Sistema EMS SAGE", XXIV SNPTEE, Curitiba, PR, Brasil, 2017.

(9) SOLLERO, R. B., OLIVEIRA, J. C. C., LIMA, L. C., RODRIGUES, M. A. M., OLIVEIRA FILHO, A. L., STEIN, P., LAMBERT, N., "Concentrador de Dados Sincrofasoriais Integrado a um Sistema de Supervisão, Controle e Gerenciamento de Sistemas Elétricos De Potência", XXIV SNPTEE, Curitiba, PR, Brasil, 2017

(10) NETTO, N. A. R. L., "Novas Ferramentas para Avaliação de Segurança Estática e Dinâmica de Sistemas de Potência", Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Sergio Gomes Junior graduou-se em Engenharia Elétrica em 1992 pela Universidade Federal Fluminense, concluiu Mestrado e Doutorado também em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1995 e 2002, em 2004 fez um pós-doutorado na *Northeastern University* em Boston, Estados Unidos e em 2016 um pós-doutorado na *Norwegian University of Science and Technology* em Trondheim, Noruega. Desde 1994 é pesquisador do Cepel trabalhando na pesquisa e desenvolvimento de programas computacionais para a análise de sistemas de potência e desde 2000 é gerente do projeto PacDyn no Cepel. Desde 2010 também é professor da Universidade Federal Fluminense. Suas principais áreas de interesse são: dinâmica e controle de sistemas de potência, eletrônica de potência, harmônicos e transitórios eletromagnéticos. É *Senior Member* do IEEE e membro do Comitê de Estudos B4 do Cigré-Brasil.



Thiago Jose Masseran Antunes Parreiras possui graduação (2009) e mestrado (2012) em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, e cursa doutorado em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Atualmente é pesquisador II do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Tem experiência na área de engenharia elétrica, com ênfase em sistemas elétricos de potência, atuando principalmente nos seguintes temas: estabilidade de sistemas de potência, análise modal de sistemas de potência, controle do amortecimento de oscilações em sistemas de potência, avaliação de segurança de sistemas de potência e monitoração de sistemas de potência em tempo-real.



Marcelo Rosado da Costa graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 1993. Em 1998 recebeu grau de Mestre em Ciências pela COPPE-UFRJ. É pesquisador do Departamento de Automação de Sistemas do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL - desde 1996, atuando no desenvolvimento de aplicações computacionais de análise de redes no SAGE – Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia, desenvolvido pelo CEPEL. Suas áreas de interesse para pesquisa incluem algoritmos de análise de redes, sistemas de supervisão e controle, simulador para treinamento de operadores e sistema de gerenciamento de energia.



Paulo Eduardo Martins Quintão é engenheiro eletricitista formado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), em 1993, pós-graduado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1999. Trabalhou no CEPEL no período de março de 1994 a junho de 2008. Trabalha no ONS desde julho de 2008 na Gerência de Estudos Especiais, Proteção e Controle - GPE. Participa em projetos de estabilização de sistemas através de reajustes nos controladores de unidades geradoras, além de estudos pré-operacionais de novos empreendimentos que integrarão o SIN.



Neyl Hamilton M. Soares possui graduação em Engenharia Elétrica, ênfase Sistema de Potência, pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, RJ (1987). Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá, MG (2002). Em 1987, ingressou na ELETROBRAS como engenheiro na área de Estudos de Planejamento da Operação, permanecendo até o ano de 1999. Ingressou no ONS no ano 2000, atuando, atualmente, na área de Estudos Especiais na Diretoria de Planejamento da Operação.



Héctor Andrés Rodríguez Volskis – Graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFF em 1984. Realizou cursos de pós-graduação em: Análise Suporte de Sistemas Computacionais pela Universidade Estadual do Rio de Janeiro - UERJ em 1987, Engenharia Econômica e Administração Industrial pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ em 1990 e Curso Avançado em Controle de Sistemas Elétricos pela Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC em 1994. Já trabalhou em empresa de consultoria (Hidroservice) e na ELETROBRÁS. Atualmente está trabalhando no Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS desde 1999 como Engenheiro Especialista na área de Ferramentas de Apoio à Tomada de decisão aplicada à Supervisão e Controle em Tempo Real. Suas áreas de interesse são: Análise de Redes, Estimção de Estado, Controles de Sistemas e Medição Fasorial.



Nícolas Abreu Rocha Leite Netto possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 2014 e M.Sc. em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) em 2016. Atualmente é Profissional Pesquisador I do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, onde integra a equipe de desenvolvimento do Programa Anatem desde 2014. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: Computação Científica, Dinâmica, Controle e Estabilidade de Sistemas Elétricos.