



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

CB/GAT/25

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO – IV

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

ESTUDO DA APLICAÇÃO DE SINCRÓFASORES PARA MONITORAÇÃO DE CORREDORES DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO FUNÇÃO ENERGIA NO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL (SIN)

**Rafael Fernandes(*)
ONS**

**Alexandre Massaud
ONS**

**Daniel Dotta
Unicamp**

**Luis Carlos P da Silva
Unicamp**

RESUMO

O presente trabalho tem como principal contribuição a aplicação do conceito de estimação da função energia em corredores de transmissão do sistema elétrico brasileiro. Por meio de dados reais coletados e armazenados no openPDC do ONS, de PMUs estrategicamente instaladas nas barras do Sistema Interligado Nacional (SIN), dados de perturbações são utilizados para a estimação da função energia, e os resultados são comparados com simulação dinâmica detalhada no domínio do tempo. Um índice de correlação entre as medições obtidas pelas PMUs e Estimador de Estados será apresentado assim como a estimação da reatância e inércia equivalente entre as duas áreas de interesse. Como contribuição, busca-se avaliar o potencial de aplicação desse método para a monitoração de estabilidade de corredores de transmissão.

PALAVRAS-CHAVE

Função Energia, Estabilidade Angular, Análise da Segurança de Sistemas Elétricos, Medição Sincronizada de Fasores, Corredores de Transmissão de Energia.

1.0 - INTRODUÇÃO

A operação do SIN representa um desafio único para o ONS, já que ela deve levar em conta considerações conflitantes, como: economia, segurança, confiabilidade e preocupações ambientais, além de, frequentemente, condições meteorológicas difíceis de prever. A utilização de novas tecnologias pode ajudar a resolver esse desafio [2,8]. A tecnologia de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS) é uma mudança de paradigma tecnológico para a próxima geração de EMS (*Energy Management Systems*), a qual fornece uma plataforma com potencial para desenvolver aplicações que melhorem as operações do SIN.

O sistema elétrico brasileiro pode ser dividido em grandes áreas geoeletricas conectadas por grandes corredores de transmissão. A interrupção de uma dessas interconexões pode levar a sobrecargas, resultando em uma operação menos segura do sistema elétrico. Para esses casos, os limites de carregamento são definidos com base em simulações *offline* utilizando modelos detalhados do sistema elétrico para um conjunto de contingências caracterizadas como severas ou que venham a apresentar algum risco à segurança do sistema elétrico.

No entanto, os estudos de pré-operação têm limites, pois apesar de bem preparados e elaborados, não possibilitam prever com exatidão o estado do sistema no momento de uma perturbação.

(*) Rua Júlio do Carmo, n° 251 – 6° andar – CEP 20211-160 Rio de Janeiro, RJ, – Brasil
Tel: (+55 21) 3444-9475 – Fax: (+55 21) 3444-9411 – Email: rafael.fernandes@ons.org.br

Adicionalmente, na operação em tempo real, os estimadores de estado podem apresentar problemas de convergência resultantes de alteração topológica da rede e baixas taxas de amostragem do SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition System*) prejudicando diretamente a aplicação de análise de segurança.

Nesse contexto, os *Wide-Area Measurement Systems* (WAMS) com altas taxas de amostragem e medidas sincronizadas [8] podem trazer benefícios para a monitoração do sistema elétrico. Uma rede de PMUs (*Phasor Measurement Units*) monitorando pontos estratégicos dos corredores de transmissão pode trazer uma visão complementar aos estudos de pré-operação, auxiliando na estimação de margens de segurança.

Benefícios quantitativos de se usar a tecnologia de PMU na operação do SIN podem ser caracterizados pela utilização de limites de transmissão mais precisos para transferências de energia entre áreas. Com a alta porcentagem de geração hidroelétrica no SIN e com um modelo ímpar de afluência de água nas diferentes regiões [9] é bastante comum que grandes montantes de energia sejam transferidos de uma região à outra. Isso evidencia a necessidade da estimação dos limites operativos confiáveis nos principais corredores de transmissão do SIN.

A estimação em tempo real dos limites de transferência de energia entre as regiões pode trazer ganhos econômicos. Estimações conservadoras, devido à natureza dos processos através dos quais os limites são determinados, poderá implicar em um preço mais alto para os consumidores finais pois a capacidade do corredor de transmissão estará sendo sub-utilizada. Por outro lado, se o corredor de transmissão estiver operando acima do limite real, o sistema estaria vulnerável a potenciais contingências severas. Em ambos os casos, as tecnologias baseadas nas PMUs oferecem a possibilidade de estabelecer os limites de transferência mais próximos de seus valores "verdadeiros", e assim melhorar a utilização econômica do sistema sem comprometer a sua confiabilidade

Este trabalho tem como foco principal aplicar e avaliar os conceitos propostos em [1] para calcular a função energia a partir de sincrofasores e avaliar a estabilidade transitória do sistema elétrico. A validade dessas proposições é baseada no conceito de transferências dominantes de energia, de forma que os corredores de transmissão podem ser modelados como interconexões entre duas máquinas equivalentes ou grupos de máquinas coerentes. Nessas condições ideais, as tensões e correntes sincrofasoriais de distúrbios podem ser usadas para estimar a reatância equivalente do corredor, inércia equivalente, energia associada ao distúrbio e também o ângulo de quasi-regime permanente de separação (instante t_0+ do distúrbio). A expressão da função energia é ajustada de modo a utilizar dados de sincrofasores como frequência, magnitude e ângulo das tensões e correntes da barra e/ou circuitos, no lugar de velocidade angular e ângulo interno das máquinas, cujas medidas são de difícil obtenção.

Esse trabalho está organizado da seguinte forma: na seção 2 a fundamentação teórica do método utilizado é apresentado, na Seção 3 a metodologia para o cálculo da função energia usando sincrofasores é apresentada. Os resultados e simulações são apresentados na seção 4. Conclusões e comentários finais sobre os desenvolvimentos são apresentados na seção 5.

2.0 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nos anos 70 o conceito de função energia foi desenvolvido e aplicado como uma ferramenta prática de análise da estabilidade transitória para sistemas multimáquinas. Esse conceito tem como proposta estimar a estabilidade dos SEE quando sujeitos a contingências. Diversos trabalhos foram propostos baseados nesse conceito, entre eles destacam-se o *Extended Equal Area Criterion* (EEAC), cujo objetivo é determinar os equivalentes máquina-barramento infinito de sistemas multi-máquinas [2,3]. O EEAC utiliza a separação dos ângulos dos rotores para determinar grupos de geradores coerentes divididos em: críticos e não-críticos. O EEAC pertence a classe dos métodos diretos limitando-se à modelagem clássica dos geradores [3]. Mais recentemente, para contornar as limitações dos métodos diretos, métodos híbridos como o SIME (*Single Machine Equivalent*) foram propostos. Em suma, o SIME utiliza simulação no domínio do tempo para a identificação dos geradores coerentes (contemplando diferentes modelagens de geradores) e o cálculo do limite de estabilidade pelo EEAC.

2.1 Potência Transferida em Corredores de Transmissão

A Figura 1 ilustra a transferência de potência entre duas áreas interconectadas pela reatância x_e , onde o gerador G1 está fornecendo P MW para o gerador G2 na barra 2. Cada gerador pode ser visto com um agregado de todos os geradores coerentes nas áreas exportadoras e importadoras e x_e é a reatância equivalente de linhas de transmissão em paralelo.

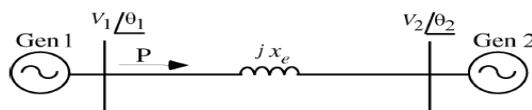


Figura 1 - Equivalente de duas máquinas (áreas) simbolizando o Corredor Norte-Sul

Utilizando os fasores de tensão e corrente de barra a potência transferida entre as duas máquinas é dada por:

$$P = \frac{V_1 V_2}{x_e} \sin(\theta) \quad (1)$$

onde $\theta = \theta_1 - \theta_2$. Tradicionalmente, a análise de estabilidade em corredores de transmissão utiliza as tensões internas das máquinas e os ângulos dos rotores:

$$P = \frac{E_1 E_2}{x'_e} \sin(\delta) \quad (2)$$

onde $\delta = \delta_1 - \delta_2$, δ_1 , e δ_2 são os ângulos internos dos geradores e E_1 e E_2 são as tensões internas dos geradores. A reatância equivalente x'_e inclui também a reatância dos transformadores e da impedância transitória dos geradores. Assumindo as tensões internas dos geradores constantes podemos decrever a dinâmica desse sistema de duas máquinas por:

$$\delta = \Omega \omega, \quad 2H\omega = P_m - \frac{E_1 E_2 \sin(\delta)}{x'_e} - D\omega \quad (3)$$

Sendo $\Omega = 2\pi f$, onde f é a frequência nominal do sistema, em Hertz, e $\omega = \omega_1 - \omega_2$ (velocidades angulares das máquinas 1 e 2) em p.u. Já a inércia equivalente é dada por $H_{eq} = H_1 H_2 / (H_1 + H_2)$, D é o coeficiente de amortecimento e P_m é a potência mecânica de entrada (igual a potência P de equilíbrio). A frequência de oscilação pode ser obtida pela linearização de (3) em torno do ponto de equilíbrio δ_0 e desprezando-se o amortecimento D .

$$w_s = \sqrt{\frac{E_1 E_2 \cos(\delta_0) \Omega}{2H x'_e}} \quad (4)$$

Assumindo que o ponto de equilíbrio pós-falta é constante durante o evento, a função energia pode ser expressa como:

$$V_E = V_{PE} + V_{KE} \quad (5)$$

Onde a energia potencial e cinética são dadas por:

$$V_{PE} = \frac{E_1 E_2}{x'_e} (\cos(\delta_0) - \cos(\delta)) + \sin(\delta_{op}) x (\delta_{op} - \delta) \quad (6)$$

$$V_{KE} = \frac{1}{2} (2H) \Omega w^2 = H \Omega w^2$$

3.0 - METODOLOGIA ADOTADA [1]

Considerando a interligação Norte-Sul como o sistema de duas áreas, sendo que a barra 1 representa Colinas (PMU instalada no circuito C2 para Miracema – 500kV) e a barra 2 representa Serra da Mesa (PMU instalada no circuito C2 para Gurupi – 500 kV). Busca-se estimar a Função Energia com os dados das PMUs de ambos os terminais do corredor Norte-Sul. Da posse das medidas sincrofasórias desses barramentos pode-se aproximar: $V_1 \approx E_1$, $V_2 \approx E_2$, $\theta \approx \delta$, $\omega_b \approx \omega$ e $x'_e \approx x_e$, onde: $\omega_b = \omega_{b1} - \omega_{b2}$, sendo ω_{b1} e ω_{b2} as frequências angulares, em rad/s, dos circuitos 1 e 2, respectivamente. As tensões nas barras/circuitos não são constantes e variam com o tempo, contendo componentes de oscilação de frequência. Estas componentes precisam ser filtradas, neste caso, as grandezas filtradas V_1 e V_2 fasórias, são chamadas de tensões *quasi-steady state*. A Função Energia será: $V_E(t) = V_{KE}(t) + V_{PE}(t)$, sendo:

$$V_{PE} = \frac{V_1 V_2}{x'_e} (\cos(\theta_{qss}) - \cos(\theta)) + \sin(\theta_{qss}) x (\theta_{qss} - \theta) \quad (7)$$

$$V_{KE}(t) = H \Omega \omega^2$$

onde θ_{qss} é obtido, na prática, pelo filtro de passa banda no ângulo de medição θ . O maior desafio para a aplicação dessa metodologia é a estimação, por meio de sincrofasores, da reatância e inércia equivalente do sistema e ser considerado. Imprecisões nessa detecção terão impacto direto nos resultados de cálculo de margem de estabilidade. Com o objetivo de assegurar a confiabilidade da estimação foram realizadas simulações off-line utilizando os seguintes pacotes computacionais Pacdyn e Anatem bem como comparação dos resultados sincrofasoriais com o estimador de estados.

3.1 Sistema Considerado – Corredor Norte-Sul

Nas Figuras 2 e 3, o corredor Norte-Sul (FNS) é caracterizado pelo somatório dos fluxos entre Serra da Mesa e Gurupi e Serra da Mesa II e Peixe 2.

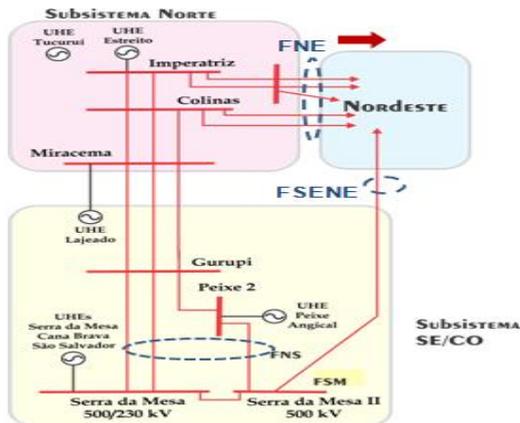


Figura 2 - Corredor Norte-Sul

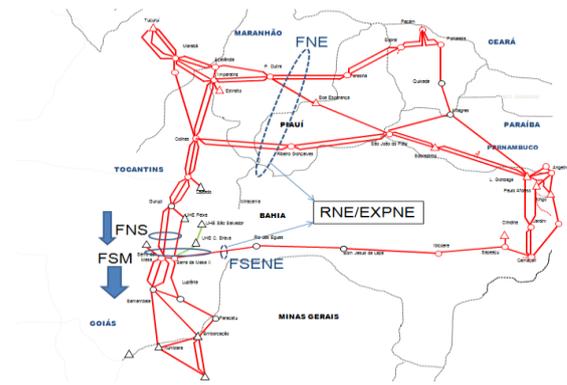


Figura 3 - Fluxos entre os Corredores do SIN

3.1.1 Evento Considerado

No dia 29 de Janeiro de 2017, às 22h32min ocorreu uma perturbação que teve início com o desligamento automático das linhas de transmissão de 500kV Xingú - Tucuruí C1 e C2 [4], devido um curto-circuito simultâneo, que isolou o sistema Manaus/Macapá/Belo Monte do restante do SIN. Houve perda de geração de Belo Monte, com o desligamento das máquinas 02, 03 e 04, respectivamente. Esta perturbação fez com que houvesse uma variação na diferença angular do corredor Norte-Sul. Após 25 minutos (1500 seg) as máquinas do Norte foram resincronizadas e o fluxo retornou no sentido do Norte para o Sul, como pode ser observado na Figura 4.

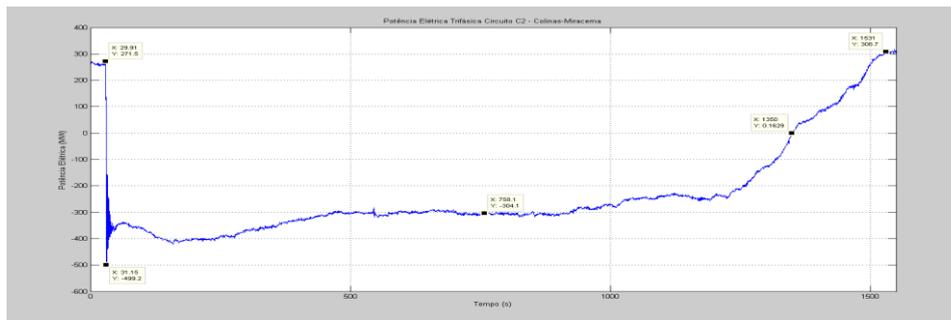


Figura 4 - Fluxo de Potência - C2 Colinas para Miracema

4.0 - SIMULAÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Correlação $P\delta$

O acoplamento entre Potência Elétrica da Interligação Norte-Sul (FNS) e a diferença angular obtida entre Colinas e Serra da Mesa é ilustrado na Figura 5. A covariância é muito próxima de 1 indicando a forte correlação entre as duas grandezas. O intervalo de medição foi de um ano (01/01/2016 a 01/01/2017).

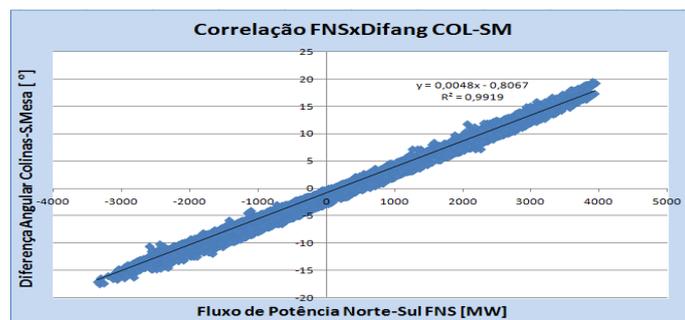


Figura 5 - Correlação Fluxo de Potência Norte-Sul e Diferença Angular Colinas-Serra da Mesa

Pode-se também verificar o comportamento do fluxo de importação e exportação no corredor Norte-Sul e os respectivos ângulos máximos e mínimos. Esse valores são de 4000 MW para potência e 20 graus para a diferença angular.

4.2 Estudos Pré-Análise (Simulação Off-line)

Realizou-se um estudo preliminar usando o software Anatem para a identificação do conjunto de máquinas coerentes para o corredor Norte-Sul. Para tanto, um curto-circuito foi aplicado na barra Serra da Mesa de modo que a tensão desta apresentasse uma queda de 35%. O curto-circuito foi retirado após 100 ms. Em seguida foram abertos os dois circuitos Serra da Mesa para Gurupi C1 e C2 e Serra da Mesa 2 para Peixe 2.

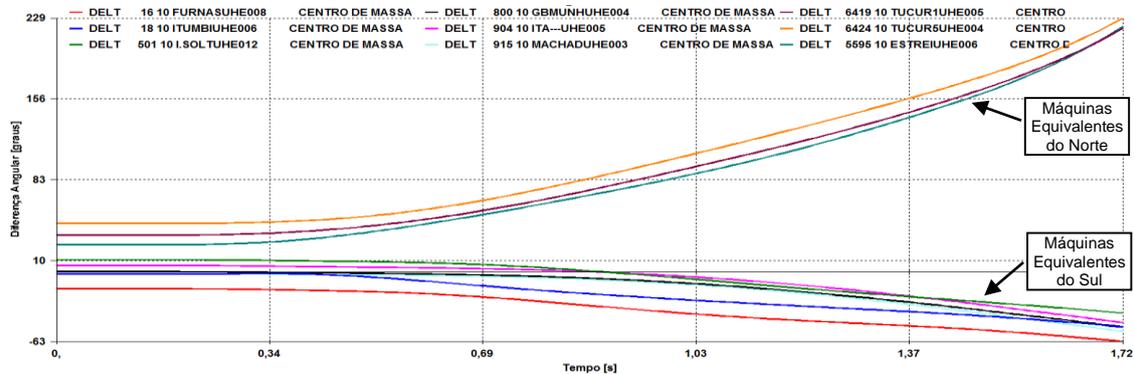


Figura 6 - Diferença Angular dos Ângulos dos Rotores em relação ao Centro de Massa do Sistema

Para a identificação do grupo de máquinas coerentes utilizou-se um índice baseado nas excursões de potência elétrica (acelerante) e do ângulo do rotor de cada unidade para determinada contingência no SIN. Como apresentado em [2], é possível compor um índice para verificação da correlação entre as máquinas de uma determinada área, como sendo uma composição entre os ângulos dos rotores (δ_i) e das potências acelerantes (P_{ai}). Este índice pode ser representado como:

$$\text{índice}_{\text{correlação}} = \frac{\max(\delta_i) - \min(\delta_i)}{\max(\max(\delta_i) - \min(\delta_i))} + \frac{\max(P_{ai}) - \min(P_{ai})}{\max(\max(\delta_i) - \min(\delta_i))} \quad (8)$$

Pela Figura 6 verificam-se os grupos de máquinas coerentes, no Norte destacando-se as usinas de Tucuruí e Estreito. A potência acelerante não será apresentada pois segue o mesmo comportamento dos ângulos dos rotores.

4.3 Estimativa da Inércia Equivalente e da Reatância Equivalente

Como já mencionado um dos maiores desafios dessa metodologia é a identificação das reatâncias e inércias equivalentes. Apresentam-se três formas diferentes para o cálculo da inércia equivalente: estimação via base de dados (a), ROCOF (b) e método proposto (c).

a) Na Tabela abaixo encontra-se o cálculo da inércia equivalente [10] de acordo com os dados das máquinas envolvidas na análise obtidos pelo software Anatem.

Tabela 1 - Cálculo da Inércia Equivalente pela Potência Sincronizada

USINA	Nº UNID	MVA UNID	H(s)	MW.s
FURNAS	8	160,00	5,00	6400,00
ITUMBIARA	6	365,00	4,31	9438,90
ILHA SOLTEIRA	12	178,60	3,85	8251,32
GBM	4	73,60	2,35	691,84
ITÁ	5	305,00	5,00	7625,00
MACHADINHO	3	418,50	3,00	3766,50
TUCURUII	5	350,00	5,00	8750,00
TUCURUI S	4	350,00	4,00	5600,00
ESTREITO	6	151,80	6,00	5464,80
MANAUS/MACAPÁ	*	1042,00 (total)**	2,24	2334,08
BELO MONTE	*	2716,00 (total)**	4,50	12222,00
ENERGIA CINÉTICA TOTAL				70544,44

* Grupo de Máquinas, ** MVA total do grupo

Para este conjunto de máquinas, a inércia equivalente da área norte será: $H_{eqNorte} = 4,40[seg]$ e da área sul será: $H_{eqSul} = 4,16[seg]$. A inércia equivalente do conjunto será: $H_{eqNSul} = \frac{H_{eqNorte} \times H_{eqSul}}{H_{eqNorte} + H_{eqSul}} \Rightarrow H_{eqNSul} = 2,13[seg]$.

b) De acordo com [11], a inércia equivalente pode ser obtida diretamente pela leitura das PMUs, como sendo:

$$H_{sys} = \frac{\frac{1}{2} f_n \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i}{ROCOF_i}}{\sum_{i=1}^n S_n} \quad (9), \quad \text{onde } S_n \text{ é a potência nominal antes do distúrbio em MVA, } \Delta P_i \text{ é a variação de potência, } f_n$$

é a frequência nominal do sistema em Hz e $ROCOF$ é a taxa de variação de frequência em Hz/seg.

No historiador do PDC (*Phasor Data Concentrator*), os valores de $ROCOF$, para as duas PMUs, considerando-se a referência de tempo UTC (*Universal Time Coordinated*), estão de acordo com a Tabela abaixo.

Tabela 2 - Cálculo da Inércia Equivalente pela Potência Sincronizada

Tempo UTC (+3h)	PMU	ROCOF (Hz/seg)
2017-01-30 00:32:29.783	Colinas-Miracema C2	-4,72
2017-01-30 00:32:29.783	Serra da Mesa-Gurupi C2	-1,76

Para PMU de Colinas-Miracema C2, a variação de potência, considerando o período t0+, foi de 45MW e a taxa de variação de frequência foi de 4,72 Hz/seg. Para a PMU de Serra da Mesa para Gurupi C2, a variação de potência foi de 40MW e a taxa de variação de frequência foi de 1,76 Hz/seg. O fluxo de potência pré-falta foi de 395 MVA. Com estes valores obtidos através da leitura de ambas as PMUs, de acordo com a equação 9 acima, tem-se que a inércia equivalente da norte-sul será: $H_{eq_NSul} = 2.44$ [s].

c) Por meio do método de mínimos quadrados não-linear realizou-se um ajuste entre a Potência Elétrica Ativa e da Diferença Angular. A reatância e a inércia equivalente são ajustadas de modo a satisfazer as seguintes equações:

$$P = \frac{V_1 V_2 \sin(\Delta\theta)}{X_{eq}} [pu] \text{ e } H = \frac{V_1 V_2 \cos(\Delta\theta_0) \Omega}{2X_{eq} w_s^2} [pu],$$
 onde $\Delta\theta$ é a diferença angular em radianos, x_{eq} é a reatância equivalente em pu, w_s é a frequência angular de swing em rad/s, V_1 e V_2 são as tensões terminais em pu e $\Omega = 2\pi f_n$, em rad/s, sendo $f_n = 60$ Hz. Como as tensões e a diferença angular são conhecidas, o algoritmo realiza um ajuste para encontrar o valor da reatância equivalente. Após o ajuste da curva, os seguintes resultados foram obtidos para a interligação Norte-Sul: $X_{eq_NSul_pré} = 0.1529$ [pu], $X_{eq_NSul_pós} = 0.1562$ [pu], $H_{eq_NSul_pré} = 213.88$ [pu] ou **2,14** [s], $H_{eq_NSul_pós} = 201.39$ [pu] ou **2,01** [s].

A frequência de oscilação eletromecânica do corredor norte-sul, identificada pela variável w_s , foi obtida pelo método de Prony, considerando a variável de diferença angular deste corredor. O valor encontrado foi de 0.4 Hz, sendo este um valor característico deste corredor. A diferença entre a inércia equivalente obtida pelo cálculo direto, Tabela 1, item a, e do algoritmo de mínimos quadrados não-linear e medição fasorial, itens b e c, respectivamente, se deve ao fato de que foram consideradas somente as principais máquinas que configuram a interligação Norte-Sul, nesta análise. Nas Figuras abaixo verifica-se os devidos registros das duas PMUs em análise.

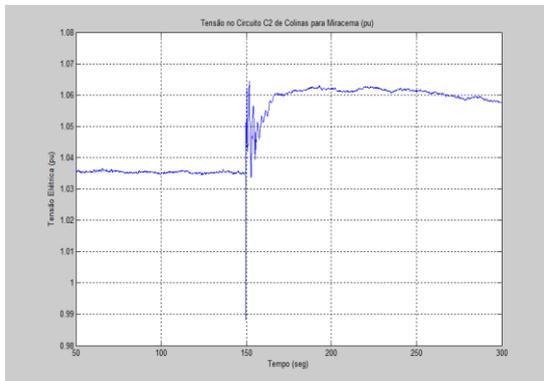


Figura 8 - Tensão na LT Col-Mir C2

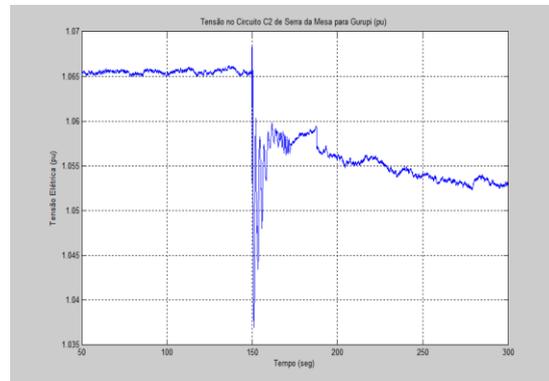


Figura 9 - Tensão na LT SM-Gur C2

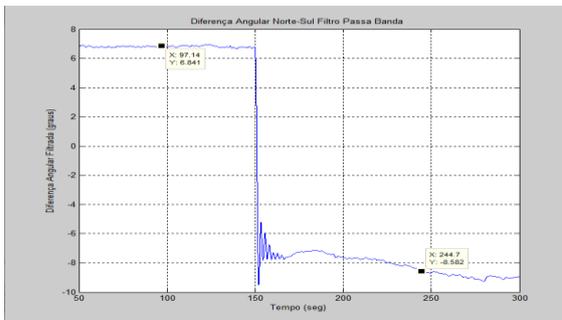


Figura 10 - Diferença Angular Norte-Sul Filtrada

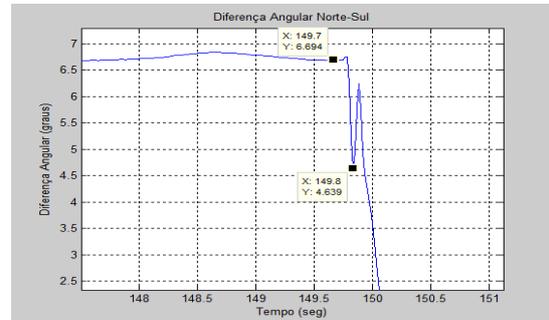


Figura 11 - Diferença Angular - instante t0+

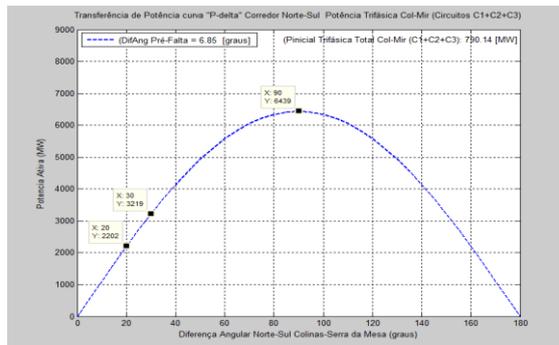


Figura 12 - Curva P-delta Corredor Norte-Sul

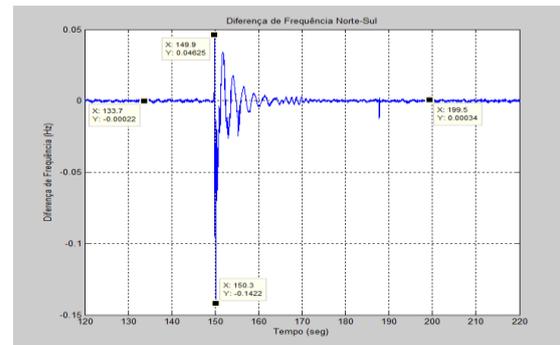


Figura 13 - Diferença de Frequência Norte-Sul

Observa-se, pela Figura 10, que a diferença angular variou de + 6.84 graus para -8.58 graus, após a perturbação. Na Figura 12, verifica-se a curva P-delta antes e após a perturbação, considerando o valor de reatância equivalente obtido pelo método dos mínimos quadrados não-linear e sincrofasores. Neste gráfico considera-se a potência trifásica dos três circuitos de Colinas para Miracema.

Atualmente o ONS opera o corredor Norte-Sul com FNS (Fluxo Norte Sul) de no máximo 4000 MW. Esse valor foi obtido por meio de estudos pré-operacionais. Comparado com o estimado com sincrofasores observa-se uma margem de segurança em relação para a perturbação descrita. Basicamente os três circuitos entre Colinas e Miracema em operação, contribuem com aproximadamente, 3/4 do fluxo FNS, uma vez que há infeed de geração em Lajeado e Peixe II.

Comumente a diferença angular entre as PMUs de Colinas e Serra da Mesa tem apresentado valores máximos de 22 graus - vide Figura 5. Nesta condição verifica-se que a diferença angular entre as PMUs de Colinas e Serra da Mesa não deverá exceder 30 graus. Já na Figura 13, verifica-se a variação da diferença de frequência da Norte-Sul, cujos valores são essenciais para o cálculo da nova abordagem da função energia - que será apresentado adiante.

4.3 Função Energia Clássica

Utilizando a formulação matemática do item 2.1, obteve-se, através de simulação numérica em Matlab, considerando o evento do item 4.2. O resultado é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Margem de Estabilidade Dinâmica

Área Aceleração	Área Desaceleração	Margem
1273,80 [MW.s]	774,36 [MW.s]	449,47 [MW.s]

4.4 Função Energia – Abordagem Prospectiva

Utilizando a formulação matemática do item 2.2, obteve-se, através da simulação em Matlab, obteve-se os resultados abaixo.

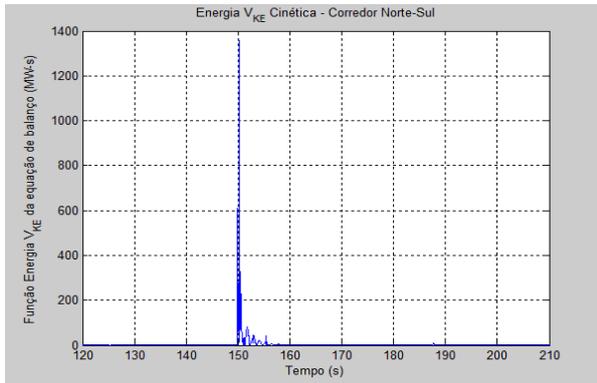


Figura 14 - Energia Cinética

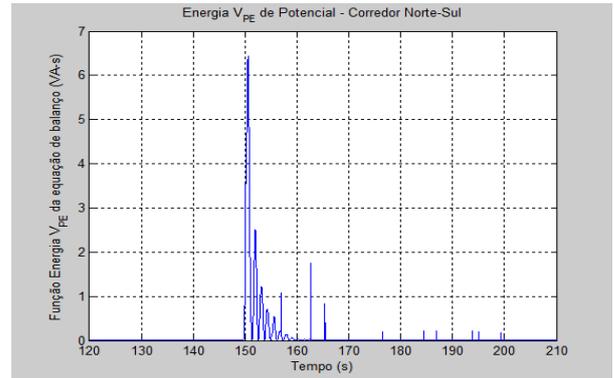


Figura 15 - Energia de Potencial

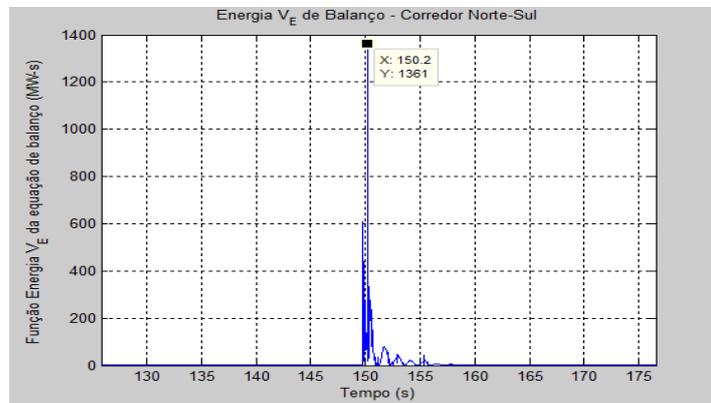


Figura 16 - Energia de Balanço

Observa-se na Figura 16 que a energia de balanço registrada através da nova abordagem da função energia foi em torno de 1361 [MW.s]. Como base de comparação pelo valor obtido pela função energia clássica, verifica-se da Tabela 2 que a energia acelerante calculada foi de 1283.70 [MW.s]. Pela Tabela 1, o valor calculado de energia cinética, considerando as máquinas em análise foi aproximadamente 70544,44 [MW.s].

5.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentaram-se técnicas de estimação de parâmetros e cálculo da função energia para corredores de transmissão. Através da medição sincronizada, determinou-se a reatância e também inércia equivalente do corredor Norte-Sul através de três maneiras diferentes. Os resultados foram satisfatórios, aonde foi possível encontrar a energia cinética durante a ocorrência do evento e compará-la com a energia cinética do corredor norte-sul, com o cenário de geração apresentado.

A utilização de sincrofasores apresenta potencial para estimar margens de estabilidade em tempo real para corredores de transmissão. Adicionalmente, com a reatância equivalente é possível estimar a máxima transferência de energia com maior precisão.

Como trabalhos futuros, novas simulações serão realizadas com o objetivo de validar a metodologia bem como avaliar a possibilidade de sua aplicação em tempo real. Verificou que a identificação dos parâmetros tem forte influência sobre o cálculo da função energia logo um esforço maior será realizado para a estimação dos mesmos.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J.H.Chow, A.Chakrabortty, M.Arcak, B.Bhargava, A.Salazar, "Synchronized Phasor Data Based Energy Function Analysis of Dominant Power Transfer Paths in Large Power Systems", May 2007.
- [2] J.R.Pesente, "Estudo da Utilização de Medição Sincronizada de Fasores para o Esquema de Controle de Emergência do Sistema de Transmissão de Itaipu em 60 Hz", Dissertação de Mestrado, UFSC, Dezembro 2009
- [3] M.Pavella, D.Ernst, D.Ruiz-Vega, "Transient Stability of Power Systems - A Unified Approach to Assessment and Control", 2000.
- [4] ONS RE 30019/2017, "Análise da perturbação do dia 29/01/2012 iniciada às 22h32min na SE Xingú e com a separação do sistema Manaus/Macapá/Belo Monte do restante do SIN.", *Relatório de Análise de Perturbação*, ONS, 2017
- [5] S.E. Stanton, C.Slivinsky, K.Martin, and J.Nordstrom, "Application of phasor measurements and partial energy analysis in stabilizing large disturbances", IEEE Trans. Power Syst., vol. 10, pp. 297-306, Feb. 1995.
- [6] NERC - North American Electric Reliability Corporation "Phase Angle Monitoring: Industry Experience Following the 2011 Pacific Southwest Outage Recommendation 27", June 2016
- [7] C.W.Taylor, D.C. Erickson, K.E.Martin, R.E.Wilson and V.Venkatasubramanian, "WACS Wide-Area Stability and Voltage Control System: R&D and Online Demonstration" IEEE, May 2005
- [8] M.A.Pai, A.Stankovic, "Synchronized Phasor Measurements and Their Applications"
- [9] Projeto ESTAL: Utilização de Fasores no Sistema Interligado Nacional do ONS, Dezembro 2006
- [10] P. Kundur "Power System Stability and Control", EPRI, 1994.
- [11] B.Alinejad, H.K.Karegar "Online Inertia Constant and Thévenin Equivalent Estimation Using PMU Data"

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Rafael de Oliveira Fernandes é engenheiro eletricista com ênfase em Sistema de Potência graduado pela Universidade Federal de Itajubá em 2001. É Mestrando em Sistema de Potência pela Unicamp/Campinas, na área de estabilidade com aplicação envolvendo medição sincronizada fasorial. Possui experiência nas áreas de Estudos Elétricos e de Proteção Elétrica. Atualmente é Engenheiro Sênior no Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, Membro da comissão de estudos da IEC TC95-MT04, IEC/IEEE TC95 60255-118, Cigré-B5 e WGB5.62



Alexandre Massaud é engenheiro eletricista graduado pela Universidade Estadual do Estado do Rio de Janeiro em 1971. Entre os anos de 1972 e 1973 trabalhou como engenheiro eletricista na Light SESA. De 1974 a 1977 trabalhou na Eletrosul – Centrais Elétricas do Sul do Brasil, com análise de sistemas elétricos. De 1978 a 1995 trabalho na Eletrobrás – Centrais Elétricas Brasileiras, atuando em diversas atividades relacionadas ao planejamento de sistemas elétricos. Deste então, trabalha no ONS – Operador Nacional do Sistem Elétrico com análise de sistemas elétricos.

Daniel Dotta tem doutorado pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC (2009) e desde 2015 é professor assistente da Faculdade de Computação e Engenharia Elétrica (FEEC) da UNICAMP.

Luiz Carlos Pereira da Silva tem doutorado pela Universidade Estadual de Campinas – Unicamp (2001) e desde 2002 é professor da Faculdade de Computação e Engenharia Elétrica (FEEC) da UNICAMP.