



**XXI SNPTee
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO -004

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

EXPLORAÇÃO DE TÉCNICAS DE ANÁLISE DA ESTABILIDADE A PEQUENOS SINAIS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Tálita M. Valentini(*)
UFF

Tatiana M. L. Assis
UFRJ

RESUMO

Devido à sua crescente complexidade, os sistemas de potência modernos operam em um ambiente com requisitos de qualidade e segurança cada vez mais rígidos. Dentre estes está a garantia de um bom desempenho dinâmico, o que inclui a estabilidade a pequenas perturbações. Neste trabalho, duas técnicas de análise de oscilações em sistemas de potência são exploradas na identificação de modos pouco amortecidos. Inicialmente, métodos convencionais baseados na linearização do sistema são empregados e em seguida, os estudos são refeitos com base na análise de Prony. Os resultados obtidos indicam que as técnicas empregadas podem ser utilizadas de forma complementar.

PALAVRAS-CHAVE

Estabilidade a Pequenos Sinais, Análise Modal, Prony

1.0 - INTRODUÇÃO

Os sistemas de potência modernos se caracterizam pela alta diversidade de tecnologias e controles atualmente existente, operando em um ambiente com rígidos requisitos de qualidade e segurança. Assim, um dos aspectos fundamentais do planejamento dos sistemas elétricos é a garantia de um bom desempenho dinâmico, o que inclui a estabilidade angular transitória e a pequenas perturbações (1).

O problema da estabilidade angular a pequenas perturbações envolve o estudo das oscilações eletromecânicas inerentes aos sistemas de potência. Após um distúrbio no sistema que acarrete em desvios de velocidades dos rotores das máquinas, a estabilidade depende da capacidade que o mesmo possui de absorver a energia cinética derivada das diferenças de velocidade.

Com o crescimento dos sistemas de potência interligados, tornou-se mais comum o aparecimento de problemas ligados à estabilidade a pequenos sinais. Em algumas situações, a presença de oscilações com baixo amortecimento tem sido o fator limitante na definição dos limites de intercâmbio entre subsistemas (2). O surgimento dessas oscilações se dá pela escassez de torque de amortecimento, o qual é notadamente influenciado pelo nível de carregamento do sistema, pela topologia da rede de transmissão e pelo tipo de sistema de excitação dos geradores. Uma vez detectada a existência de modos de oscilação mal amortecidos, medidas devem ser adotadas para garantir um desempenho adequado. Tais medidas podem incluir o redespacho de potência ativa ou até o reajuste de controladores tais como os PSSs (*Power System Stabilizers*).

Neste trabalho, duas técnicas de análise de oscilações em sistemas de potência são exploradas na identificação de modos pouco amortecidos. Inicialmente, métodos convencionais baseados na linearização do sistema são empregados. Em seguida, os estudos são refeitos com base na análise de Prony, onde são consideradas diferentes perturbações no sistema. São calculados modos de oscilação locais e inter-áreas e os resultados obtidos

(*) Rua Dr. Luiz Palmier, n° 280/1306 - Torre II, Barreto – CEP 24.110-310 Niterói, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2203-9634 – Email: tmourav@gmail.com

com as diferentes técnicas são apresentados. Os resultados indicam que as duas técnicas empregadas podem ser utilizadas de forma complementar, com alto ganho na qualidade das análises de oscilações de sistemas elétricos.

O trabalho está dividido da seguinte forma: a Seção 2 revisa alguns conceitos relativos à análise de oscilações através do cálculo de autovalores. A Seção 3 aborda as técnicas de identificação de sistemas com foco na análise de Prony. As técnicas descritas nas Seções 2 e 3 são exploradas utilizando um sistema teste e os resultados obtidos são apresentados na Seção 4. Finalmente, a Seção 5 discute as conclusões do trabalho.

2.0 - ANÁLISE DE AUTOVALORES

Nos estudos de estabilidade a pequenos sinais, os distúrbios são considerados suficientemente pequenos de forma que a avaliação da estabilidade pode ser feita com base na linearização das equações que descrevem o comportamento dinâmico do sistema. Assim, a análise clássica da estabilidade a pequenas perturbações é realizada através da linearização, em torno de um ponto de operação, do conjunto de equações que modelam a dinâmica do sistema, ou seja:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, r, u) \\ 0 = g(x, r, u) \\ y = v(x, r, u) \end{cases} \quad [1]$$

Onde:

x : vetor de variáveis de estado (velocidade da máquina, ângulo do rotor, etc.);

r : vetor de variáveis algébricas (módulo e ângulo das tensões terminais, etc.);

u : vetor de variáveis de entrada (controles);

f : vetor de funções não-lineares que descrevem as equações diferenciais dos modelos dos dispositivos dinâmicos do sistema (geradores, FACTS, HVDC, controles, etc.);

g : vetor de funções não-lineares que descrevem as equações algébricas da rede e de alguns controles;

y : vetor de variáveis de saída;

v : vetor das funções não-lineares que relacionam as variáveis de entrada e saída.

Se consideradas apenas pequenas perturbações (Δ), o sistema [1] pode ser linearizado em torno de um ponto de operação, chegando-se à seguinte forma (3):

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \\ \Delta y = C \Delta x + D \Delta u \end{cases} \quad [2]$$

Onde:

A , B , C e D são matrizes formadas pelas derivadas das funções não-lineares em relação aos estados e às entradas do sistema.

A partir do conhecimento da matriz A (matriz de estados), é possível utilizar técnicas consolidadas de análise de sistemas lineares e identificar, entre outros, a frequência e o amortecimento dos modos de oscilação do sistema. Dependendo do tamanho do sistema, pode-se empregar o conhecido método QR (4), onde todos os autovalores da matriz de estados do sistema são determinados, ou ainda, utilizar técnicas de solução parcial de autovalores, onde apenas determinados modos de oscilação são calculados (5).

3.0 - MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

Alternativamente à linearização das equações que descrevem o comportamento dinâmico do sistema, técnicas de identificação de sistemas também podem ser empregadas na análise da estabilidade a pequenos sinais. Neste caso, a determinação dos modos de oscilação, bem como dos níveis de amortecimento, é feita a partir de dados de sinais no domínio do tempo, não sendo necessária a linearização do sistema de equações. Entre os métodos de identificação de sistemas mais explorados, está o método de Prony, brevemente descrito na próxima seção.

3.1 Análise de Prony

O método de Prony tem sido amplamente utilizado na estimativa das características de sistemas dinâmicos, no desenvolvimento de modelos lineares e ainda no ajuste de controladores (6). No método de Prony, as informações são extraídas de um sinal uniformemente amostrado, o qual é decomposto em uma soma de termos exponenciais complexos amortecidos. Para extrair as informações da dinâmica do sistema, é proposta uma função variante no tempo que deve ser ajustada de forma a minimizar o erro entre o sinal amostrado e o estimado.

Após um distúrbio, a resposta livre de um sistema pode ser expressa como uma função dos autovalores (λ) e autovetores à direita (ϕ) e à esquerda (ψ) da matriz de estados A como:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n (\psi_i^T x_0) \phi_i e^{\lambda_i t} = \sum_{i=1}^n R_i x_0 e^{\lambda_i t} \quad [3]$$

Onde:

R_i : matriz de resíduos;
 x_0 : condição inicial;
 n : dimensão do sistema;

Dado um sinal uniformemente amostrado $h(t)$, o objetivo é identificar os parâmetros de uma soma finita de L senóides amortecidas com erro mínimo, ou seja:

$$\hat{h}(t) = \sum_{i=1}^L M_i e^{\sigma_i t} \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad [4]$$

Onde:

M_i : amplitude da componente i ;
 σ_i : coeficiente de amortecimento da componente i ;
 φ_i : fase da componente i ;
 ω_i : frequência angular da componente i ;
 $\hat{h}(t)$: estimativa do sinal amostrado $h(t)$.

O fator de amortecimento σ_i e frequência ω_i correspondem ao autovalor λ_i da matriz de estados. Assim, o objetivo é estimar os parâmetros σ_i , ω_i , M_i e φ_i ($i=1 \dots L$), a partir de amostras da série $\hat{h}(t)$, tal que $\hat{h}(t) = h(t)$. Note-se que, cada componente exponencial em uma dada frequência é vista como um único modo do sinal original. Os passos detalhados para o desenvolvimento da análise de Prony podem consultados em (6).

4.0 - RESULTADOS

Esta seção mostra resultados obtidos na análise da estabilidade a pequenos sinais de um sistema teste, explorando as técnicas comentadas nas Seções 2 e 3. O sistema estudado possui 48 barras e 4 geradores, conforme mostra o diagrama unifilar da Figura 1. Os dados do sistema foram obtidos em (7).

Na análise tradicional baseada no cálculo de autovalores, foi utilizado o programa PacDyn (8). Por outro lado, com o auxílio do programa ORGANON (9), foi aplicado o método de Prony. O mesmo ponto de operação foi utilizado para as duas análises.

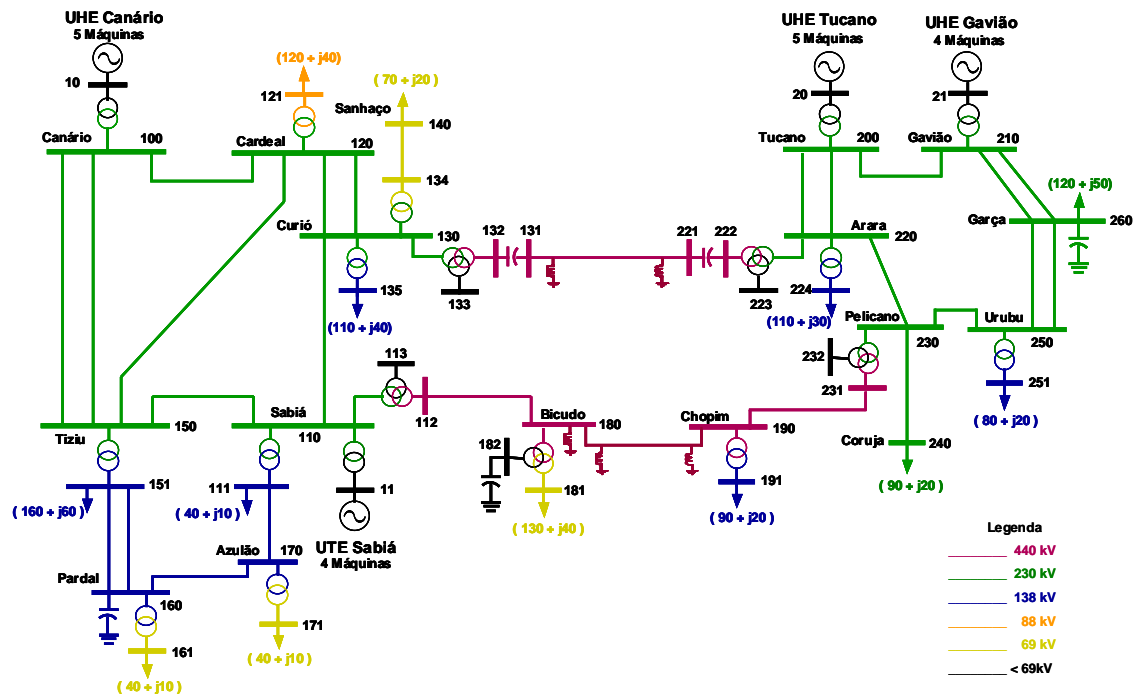


Figura 1 – Diagrama unifilar do sistema teste

4.1 Análise de Autovalores

Inicialmente, foi realizado o cálculo dos autovalores do sistema utilizando o método QR. Os modos de oscilação que apresentaram amortecimento inferior a 15% são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultado da análise modal: cálculo de autovalores

Autovalor	Real	Imaginário	Módulo	Freq. (Hz)	Amortecimento (%)	Estado	Máquina
#1	-0,31	6,35	6,36	1,01	4,89	Frequência	Canário
#2	-0,59	8,36	8,38	1,33	7,01	Ângulo	Gavião
#3	-0,26	2,97	2,98	0,47	8,75	Tensão de Campo	Gavião
#4	-1,08	8,40	8,46	1,34	12,76	Frequência	Sabiá

A coluna “Estado” da Tabela 1 indica a variável de estado com maior fator de participação no respectivo modo de oscilação, isto é, a variável de estado na qual o modo é mais observável (3).

Pela análise da Tabela 1, pode-se observar que os modos #1, #2 e #4 são modos de oscilação eletromecânicos. Já o modo #3 é o modo da excitatriz da máquina de Gavião. A Figura 2 apresenta os *mode-shapes* de velocidade dos modos eletromecânicos identificados.

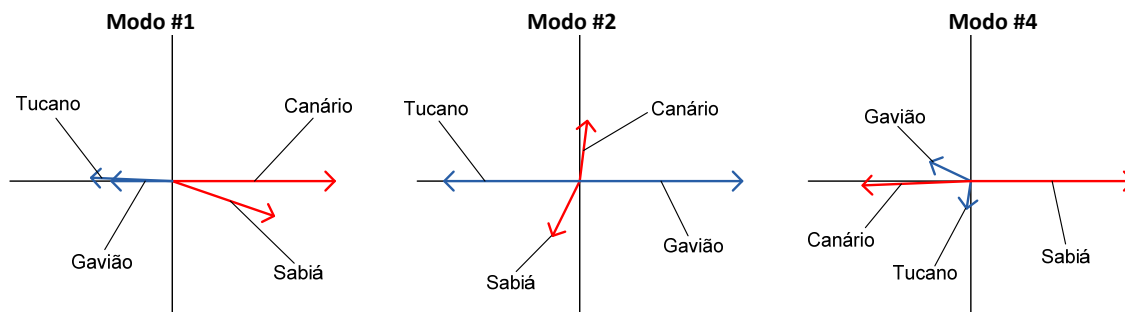


Figura 2 – *Mode-shapes* de velocidade

Analisando a Figura 2, observa-se que o modo #1 é um modo de oscilação inter-áreas, onde as máquinas de uma área (Tucano e Gavião) oscilam contra as máquinas da outra área (Canário e Sabiá). Os modos #2 e #4 são classificados como modos de oscilação locais.

4.2 Análise de Prony

Para a realização da análise de Prony, foram simulados dois eventos: inicialmente, foi aplicado um curto-circuito na barra de 230 kV da subestação de Canário (barra 100), seguido da abertura do circuito 1 da linha de transmissão entre aquela subestação e a subestação de Tiziu (barra 150). Em seguida, foi simulado um curto-circuito no barramento de 440 kV da subestação de Curió (barra 131), seguido da abertura da linha de transmissão entre aquela subestação e a de Arara (barra 221).

Após a simulação de cada uma das contingências, foram obtidos os sinais das tensões nas barras de geração, das frequências elétricas de cada um dos geradores e dos ângulos dos geradores em relação ao ângulo da barra de referência (Canário). A análise de Prony foi realizada com base em cada um destes sinais. Os modos encontrados foram então comparados àqueles obtidos pela análise de autovalores (método QR) e os resultados são mostrados na Seção 4.3.

4.3 Exploração dos Métodos

A Tabela 2 relaciona, quando da aplicação do curto-circuito na subestação de Canário, os modos de oscilação eletromecânicos encontrados por meio da técnica tradicional (QR) e aqueles modos observados nos sinais amostrados, pela aplicação do método de Prony. A associação foi feita com base nas características de cada modo (frequência e amortecimento).

Tabela 2 – Curto-circuito em Canário

Autovalor	Método QR				Método de Prony			
	Frequência (Hz)	Amortecimento(%)	Estado	Máquina	Frequência (Hz)	Amortecimento(%)	Sinal Utilizado	
#1	1,01	4,89	Frequência	Canário	1,06	6,44	Frequência	Canário
					1,06	6,19	Tensão	
					1,06	6,40	Ângulo	
					1,06	6,52	Frequência	Sabiá
					1,06	6,64	Tensão	
					1,06	6,43	Ângulo	
					1,06	6,40	Frequência	Tucano
					1,06	6,54	Tensão	
					1,06	6,42	Ângulo	
					1,07	6,43	Frequência	Gavião
#2	1,33	7,01	Ângulo	Gavião	1,38	9,04	Frequência	Tucano
					1,39	7,88	Ângulo	
					1,55	8,33	Frequência	Gavião
#4	1,34	12,76	Frequência	Sabiá	1,41	11,16	Frequência	Canário
					1,40	11,09	Tensão	
					1,41	11,28	Ângulo	
					1,41	11,51	Frequência	Sabiá
					1,40	11,35	Tensão	
					1,42	12,24	Ângulo	Tucano
					1,40	10,81	Tensão	
					1,41	11,63	Tensão	Gavião

A média da diferença encontrada entre os valores de frequência e amortecimento de cada modo de oscilação, considerando as duas técnicas exploradas, é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Média das diferenças – valores absolutos: curto-circuito em Canário

Autovalor	Frequência (Hz)	Amortecimento(%)
#1	-1,01 + j4,89	0,05
#2	-1,33 + j7,01	0,11
#4	-1,34 + j12,76	0,07

Os valores médios indicados na Tabela 3 foram calculados conforme [5].

$$Valor\ Médio = \frac{\sum |Val - Vap|}{N}$$

[5]

Onde:

Val : valor da frequência ou do amortecimento do respectivo modo de oscilação obtido por meio da análise linear (método QR);

Vap : valor da frequência ou do amortecimento do respectivo modo de oscilação encontrado pela análise de Prony;

N : número de vezes que o referido modo de oscilação foi observado quando da aplicação da análise de Prony nos sinais de tensão, velocidade angular e frequência elétrica de cada máquina.

A Tabela 4 mostra a comparação entre os resultados obtidos com os dois métodos explorados, quando da aplicação do curto-circuito na subestação de Curió.

Tabela 4 – Curto-circuito em Curió

Autovalor	Método QR				Método de Prony		
	Frequência (Hz)	Amortecimento(%)	Estado	Máquina	Frequência (Hz)	Amortecimento(%)	Sinal Utilizado
#1	1,01	4,89	Frequência	Canário	0,82	5,79	Frequência
					0,83	5,99	Ângulo
					0,82	5,91	Frequência
					0,82	6,39	Ângulo
					0,82	5,56	Tensão
					0,82	6,04	Ângulo
					0,82	4,19	Frequência
					0,81	5,28	Tensão
#2	1,33	7,01	Ângulo	Gavião	1,63	8,74	Ângulo
					1,63	9,57	Frequência
					1,40	9,50	Tensão
					1,55	6,52	Ângulo
					1,62	5,41	Frequência
#4	1,34	12,76	Frequência	Sabiá	1,26	14,13	Frequência
					1,42	10,77	Tensão
					1,34	12,54	Frequência
					1,46	11,05	Frequência
					1,43	10,10	Frequência

A média da diferença encontrada entre os valores de frequência e amortecimento de cada modo de oscilação, considerando as duas técnicas exploradas, é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Média das diferenças – valores absolutos: curto-circuito em Curió

Autovalor		Frequência (Hz)	Amortecimento(%)
#1	-1,01 + j4,89	0,19	0,93
#2	-1,33 + j7,01	0,24	1,77
#4	-1,34 + j12,76	0,08	1,59

As Figuras 3 (a) e (b) mostram o comportamento das frequências das máquinas para os curtos-circuitos em Canário e em Curió, respectivamente.

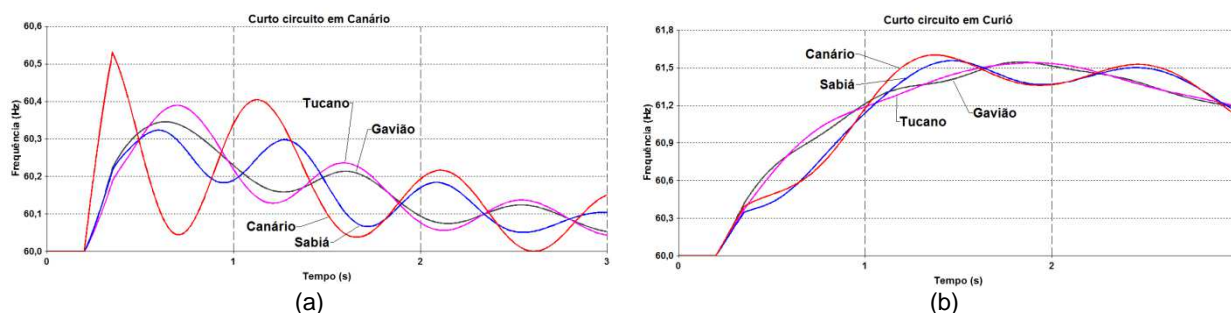


Figura 3 – Frequência das máquinas

Pela observação da Figura 3, nota-se claramente a presença do modo de oscilação inter-áreas. Quando comparado com os demais modos, este foi observável em um maior número de sinais utilizados na análise de Prony (Tabelas 2 e 4). O baixo fator de amortecimento do modo facilita a identificação.

5.0 - CONCLUSÕES

Em um cenário onde se faz necessária a operação do sistema elétrico de potência segundo rígidos requisitos de qualidade e segurança, a estabilidade a pequenas perturbações tem se destacado como um aspecto importante para a garantia de um bom desempenho dinâmico.

Existem diferentes métodos para analisar a estabilidade a pequenos sinais. Neste trabalho, foram utilizados o tradicional método QR, onde todos os autovalores do sistema linearizado são calculados, e o método de Prony, que utiliza sinais no domínio do tempo para estimar as características dos modos de oscilação do sistema (frequência e amortecimento).

Com base nos testes realizados ao longo deste trabalho, pode-se concluir que no âmbito do planejamento dos sistemas elétricos, quando há mais tempo disponível para realização dos estudos, as técnicas de análise tradicionais de sistemas lineares são mais interessantes, uma vez que fornecem informações mais completas a respeito do comportamento dinâmico do sistema. Por outro lado, a análise de Prony aparece como uma alternativa interessante em aplicações onde o tempo de processamento é crítico, como na operação em tempo-real. Além disso, a análise de sinais medidos pode indicar a existência de problemas de modelagem matemática.

Nos estudos desenvolvidos durante este trabalho, verificou-se que, apesar da solução obtida com o método de Prony não ser exata, ela forneceu uma boa aproximação para o cálculo dos modos do sistema. Esta técnica pode, portanto, ser utilizada para complementar, no âmbito da operação, os estudos realizados no planejamento agregando assim, confiabilidade e qualidade às análises. É importante ressaltar, entretanto, que métodos de identificação de sistemas, tais como a análise de Prony, requerem experiência para seleção do sinal e do período de observação adotados.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) KUNDUR, P., PASERBA, J., AJJARAPU, V., ANDERSSON, G., BOSE, A., CANIZARES, C., HATZIARGYRIOU, N., HILL, D., STANKOVIC, A., TAYLOR, C., VAN CUTSEM, T. and VITTAL, V. Definition and Classification of Power System Stability, IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions; IEEE Transactions on Power Systems; Vol. 19; No. 2; May; 2004.
- (2) CIGRÉ TASK FORCE 38.01.07. Analysis and Control of Power System Oscillations; CIGRÉ Technical Brochure; December; 1996.
- (3) KUNDUR, P. Power System Stability and Control; 1st ed. New York; McGraw-Hill Inc.; 1994.
- (4) WATKINS, D. S. Understanding QR Algorithm; SIAM Review; Vol. 24; No. 4; October; 1982.
- (5) MARTINS, N. The Dominant Pole Spectrum Eigensolver; IEEE Transactions on Power System; Vol. 12; No. 1; 1997.
- (6) HAUER, J., F., DEMEURE, C., J., SCHARF, L., L. Initial Results in Prony Analysis of Power System Response Signal; IEEE Transactions on Power Systems; Vol 5; No. 1; Feb 1990.
- (7) NUNES, A. R. Aplicação de Funções de Energia ao Cálculo de Limites de Intercâmbio em Sistemas de Potência; Dissertação de Mestrado; COPPE/UFRJ; Agosto; 2010.
- (8) CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Manual do usuário do programa PacDyn; versão 9.1.1; 2009.
- (9) JARDIM, J. Manual do programa Organon; vol. III – Introduction Methodology; versão 1.1; Abril; 2005.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Tálita Moura Valentini nasceu em Imperatriz, em 1987. Graduiu-se em Engenharia Elétrica em 2009 pela Universidade Federal Fluminense (UFF) e atualmente trabalha na Gerência de Administração da Transmissão do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).



Tatiana Mariano Lessa Assis nasceu no Rio de Janeiro, em 1975. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense em 1998 e obteve os títulos de mestre (2000) e doutora (2007) pela COPPE/UFRJ, ambos em Engenharia Elétrica. Entre 1998 e 2001 foi pesquisadora no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e, entre 2001 e 2003, trabalhou no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), atuando nas áreas de planejamento da operação e programação diária do Sistema Interligado Nacional. Atualmente é professora da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e atua nas áreas de planejamento de sistemas interligados, dinâmica e controle de sistemas de potência e qualidade de energia.