



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

GAT 15
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO IV

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

ESTUDO DE VALIDAÇÃO PARA UTILIZAÇÃO INTEGRADA DOS PROGRAMAS PACDYN E HARMZS NA ANÁLISE DE RSS, RESSONÂNCIAS DE REDE E PROBLEMAS HARMÔNICOS

Sergio Gomes Jr. * Sergio Luis Varricchio Paulo E. M. Quintão Cristiano O. Costa Nelson Martins

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

RESUMO

O programa PacDyn, originalmente concebido para a análise linear da estabilidade eletromecânica, foi estendido, a partir de 2001, para a análise linear de ressonância subsíncrona com a modelagem da dinâmica da rede de transmissão. Mais recentemente, a partir de 2004, foi generalizado para a análise mais acurada de alguns fenômenos eletromagnéticos através da inclusão de modelagem de linhas de transmissão de parâmetros distribuídos e da dinâmica de equipamentos FACTS (SVC e TCSC) para frequências mais elevadas.

Por outro lado, o programa HarmZs permite o estudo do comportamento harmônico e análise modal de redes elétricas, permitindo a identificação de ressonâncias harmônicas indesejáveis e estudos de medidas mitigadoras diversas (implantação de filtros ou mudanças estruturais da rede) e geração de equivalentes dinâmicos de redes que podem ser utilizados em estudos de comportamento harmônico e de transitórios eletromagnéticos.

Ambos os programas permitem a análise do comportamento dinâmico das redes elétricas, porém, enquanto no PacDyn há um detalhamento na modelagem das máquinas e seus controladores, no HarmZs considera-se que as máquinas são representadas por seu modelo subtransitório. Esta diferença implica em equacionamentos distintos da rede elétrica e grandezas associadas. O objetivo do trabalho é apresentar os equacionamentos utilizados nos dois programas, relacioná-los e mostrar a equivalência entre os resultados obtidos por cada um dos programas considerando o mesmo nível de modelagem. Os estudos apresentados são relativos a uma rede de pequeno porte (benchmark proposto) e a um modelo de grande porte do sistema elétrico brasileiro. Para a rede de pequeno porte, os resultados dos programas PacDyn e HarmZs, além de comparados entre si, também são comparados com os do PSCAD/EMTDC. Os resultados apresentados se baseiam em desenvolvimentos recentes realizados no PacDyn tais como modelagem dinâmica de transformadores (Y-Y e Y- Δ), diferentes tipos de cargas e linhas de transmissão de parâmetros distribuídos.

A principal contribuição deste trabalho é mostrar a robustez e exatidão das metodologias utilizadas e de suas implementações nos programas PacDyn e HarmZs por meio da comparação de seus resultados. Testes deste tipo em programas técnico-científicos são fundamentais, principalmente quando estes programas são utilizados para análise de sistemas de grande porte como o sistema brasileiro, manipulando grande quantidade de dados e realizando cálculo de grande complexidade. Além disto as comparações realizadas, permitem uma visão mais integrada de fenômenos dinâmicos (maior entendimento dos problemas) em redes elétricas, identificando similaridades entre as duas abordagens teóricas e ampliando o escopo de aplicação destas duas ferramentas.

PALAVRAS-CHAVE

Harmônicos, Modelagem de Redes Elétricas, Ressonância Subsíncrona, Análise Modal

1.0 - INTRODUÇÃO

O programa PacDyn [2], além da análise de estabilidade eletromecânica a pequenos sinais, com o seu módulo PacSSR, permite a análise linear de ressonância subsíncrona [3], a partir da modelagem adequada da dinâmica da rede.

Como o PacSSR é voltado para a análise dinâmica da ressonância subsíncrona na faixa de frequência de algumas dezenas de Hertz, as máquinas síncronas e seus controladores são detalhadamente modelados. Neste caso, a incorporação do modelo da máquina na modelagem da dinâmica da rede é feita de forma eficiente utilizando-se “fasores” variáveis no tempo, descritos a partir de uma referência girante síncrona. Estes fasores geralmente possuem comportamento variante com a referência de eixos escolhida, comportamento este bem estudado nos trabalhos clássicos de Kron utilizando tensores [4]. Do ponto de vista prático, a modelagem utilizando fasores faz com que as ressonâncias da rede sejam descritas por dois pares de pólos complexos conjugados, quase que simétricos em relação à frequência síncrona da referência adotada. A pequena falta de simetria se deve ao comportamento dinâmico da máquina e seus controladores.

Por outro lado, o programa HarmZs [5] é voltado para a análise de harmônicos, modelando detalhadamente a parte linear da rede, sendo a parte não linear representada por fontes de correntes harmônicas. Além da análise convencional, utilizando respostas em frequência e cálculo de distorções, o programa permite a análise modal da rede. A análise modal fornece informações estruturais do sistema, a partir do cálculo de pólos e zeros, permitindo a solução não convencional de problemas harmônicos de maior complexidade [6],[7],[8],[9],[10],[13].

Devido à faixa de frequência de interesse do HarmZs ser bem mais elevada que a do PacDyn, de dezenas a milhares de Hz, ao contrário do PacDyn, o modelo da máquina síncrona e seus controladores não é descrito detalhadamente, mas representado apenas pelo seu comportamento subtransitório. Neste caso, não há a necessidade de representação da rede por fasores e as ressonâncias da rede são descritas por apenas um par de pólos complexos conjugados.

Ambos os programas permitem dois tipos de modelagem: sistema descritor [6],[7],[8],[9] e matriz $Y(s)$ [6],[7],[10],[11],[12],[13]. A modelagem por sistemas descritores permite a integração numérica das equações para determinação da resposta no tempo linear do sistema completo. Além disto, possibilita a utilização do algoritmo QZ para determinação de todos os pólos do sistema. Por outro lado, a modelagem por matriz $Y(s)$, possibilita uma modelagem mais compacta do sistema de equações. Outra vantagem deste tipo de modelagem é a possibilidade de modelar de forma precisa e eficiente linhas de transmissão de parâmetros distribuídos e dependentes da frequência.

Ambas as modelagens permitem a utilização de algoritmos para solução parcial de pólos e obtenção de equivalentes modais para cálculo de modelos reduzidos no domínio do tempo e frequência.

O objetivo do trabalho é apresentar os tipos de representação das grandezas utilizadas nos programas PacSSR e HarmZs e relacioná-los entre si, mostrando a equivalência entre os resultados obtidos por cada um dos programas.

2.0 - MODELAGEM DE REDES ELÉTRICAS

A modelagem de redes elétricas pode ser feita por duas abordagens: sistemas descritores e matriz $Y(s)$. A descrição detalhada de ambas as modelagens para o caso de componentes RLC, incluindo sua aplicação em um sistema exemplo de 3 barras, está apresentada em [1], não sendo aqui repetida. A consideração de linhas de parâmetros distribuídos é feita em [11],[12]. Foram ainda incluídas modelagens de transformadores [13] e cargas do tipo série paralela ou mista. A leitura dos dados de rede é feita diretamente do arquivo de fluxo de potência do programa AnaRede.

A formulação por sistemas descritores, fornece um sistema de equações da seguinte forma:

$$\mathbf{T} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \mathbf{u}(t) \quad (2)$$

A rede elétrica descrita por (1) e (2) possui múltiplas entradas e múltiplas saídas (sistema MIMO). Considerando somente uma entrada (\mathbf{u}) e uma saída (\mathbf{y}), a formulação por sistemas descritores reduz-se a:

$$\mathbf{T} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{b} u(t) \quad (3)$$

$$y(t) = \mathbf{c}^T \mathbf{x}(t) + d u(t) \quad (4)$$

O vetor \mathbf{b} corresponde a uma coluna da matriz \mathbf{B} , o vetor \mathbf{c}^T a uma linha da matriz \mathbf{C} e o termo d é igual a um elemento da diagonal da matriz \mathbf{D} . Aplicando a transformada de Laplace a (3) e (4) obtém-se:

$$s\mathbf{T} \mathbf{x}(s) = \mathbf{A} \mathbf{x}(s) + \mathbf{b} u(s) \quad (5)$$

$$y(s) = \mathbf{c}^T \mathbf{x}(s) + d u(s) \quad (6)$$

Resolvendo (5) e (6), considerando $d = 0$, obtém-se a função de transferência $G(s)$ que relaciona a entrada u com a saída y :

$$y(s) = \mathbf{c}^T (s \mathbf{T} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{b} u(s) = G(s) u(s) \therefore$$

$$G(s) \equiv \mathbf{c}^T (s \mathbf{T} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{b} \quad (7)$$

A outra abordagem de modelagem da rede elétrica, denominada matriz $\mathbf{Y}(s)$, baseia-se na seguinte formulação matricial, obtida diretamente no domínio s da Transformada de Laplace:

$$\mathbf{Y}(s) \mathbf{x}(s) = \mathbf{B} \mathbf{u}(s) \quad (8)$$

$$\mathbf{y}(s) = \mathbf{C} \mathbf{x}(s) + \mathbf{D} \mathbf{u}(s) \quad (9)$$

Uma rede elétrica composta por elementos passivos e por fontes de corrente tem sua matriz $\mathbf{Y}(s)$ construída de forma análoga à utilizada para construir a matriz de admitâncias nodais $\mathbf{Y}(j\omega)$ usada pelo método convencional de análise harmônica na determinação de respostas em frequência. Assim sendo, o elemento diagonal y_{ii} da matriz $\mathbf{Y}(s)$ é calculado pela soma de todos os elementos conectados ao nó i . Adicionalmente, os elementos fora da diagonal y_{ij} são iguais ao negativo da soma das admitâncias elementares conectadas entre os nós i e j . Para realizar a análise modal, substitui-se a frequência puramente imaginária $j\omega$ pela frequência complexa s .

Para o uso de algoritmos baseados no método de Newton para o cálculo iterativo de pólos [10],[11],[13], deve-se ainda obter a matriz derivada de $\mathbf{Y}(s)$ em relação a s . Esta matriz derivada pode ser obtida analiticamente seguindo as mesmas regras de montagem da matriz $\mathbf{Y}(s)$.

3.0 - UTILIZAÇÃO DE REFERÊNCIA SÍNCRONA PARA MODELAGEM DE REDES

Para a modelagem de máquinas síncronas e seus controladores, assim como outros elementos não lineares conectados na rede elétrica de corrente alternada, utiliza-se uma referência síncrona para que a linearização do sistema de equações seja invariante no tempo. Neste caso, as grandezas são todas consideradas como constantes em regime permanente, incluindo as variáveis tensões e correntes da rede que passam a ser representadas no regime transitório por fasores variáveis no tempo, da seguinte forma [15],[16]:

$$v(t) = \Re[\hat{v}(t) e^{j\omega t}] = v_{\text{Re}}(t) \cos \omega t - v_{\text{Im}}(t) \sin \omega t \quad (10)$$

Sendo ω a frequência síncrona do sistema, \hat{v} o fasor da variável v , v_{Re} e v_{Im} as partes real e imaginária de v .

A derivada desta grandeza no tempo pode ser obtida analiticamente:

$$\dot{v}(t) = [\dot{v}_{\text{Re}}(t) - \omega v_{\text{Im}}(t)] \cos \omega t - [\omega v_{\text{Re}}(t) + \dot{v}_{\text{Im}}(t)] \sin \omega t \quad (11)$$

No caso de modelagem por sistemas descritores, o seguinte sistema de equações relaciona as partes real e imaginária das grandezas, utilizando referência síncrona.

$$\mathbf{T} \dot{\mathbf{x}}_{\text{Re}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}_{\text{Re}}(t) + \omega \mathbf{T} \mathbf{x}_{\text{Im}}(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}_{\text{Re}}(t) \quad (12)$$

$$\mathbf{T} \dot{\mathbf{x}}_{\text{Im}}(t) = -\omega \mathbf{T} \mathbf{x}_{\text{Re}}(t) + \mathbf{A} \mathbf{x}_{\text{Im}}(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}(t) \quad (13)$$

$$\mathbf{y}_{\text{Re}}(t) = \mathbf{C} \mathbf{x}_{\text{Re}}(t) + \mathbf{D} \mathbf{u}_{\text{Re}}(t) \quad (14)$$

$$\mathbf{y}_{\text{Im}}(t) = \mathbf{C} \mathbf{x}_{\text{Im}}(t) + \mathbf{D} \mathbf{u}_{\text{Im}}(t) \quad (15)$$

Para a modelagem do sistema por matriz $\mathbf{Y}(s)$, deve-se escrever as equações diretamente no domínio s . Neste caso a idéia de utilização de referência síncrona de eixos é mantida. No entanto, é computacionalmente mais vantajoso, ao invés de utilizar as componentes reais e imaginárias, definir os seguintes fasores:

$$\hat{v}_P = v_{\text{Re}} + j v_{\text{Im}} \quad (16)$$

$$\hat{v}_N = v_{\text{Re}} - j v_{\text{Im}} \quad (17)$$

onde v_{Re} e v_{Im} são as componentes real e imaginária do fasor correspondente à variável v . O uso desta transformação leva a relações do tipo:

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{i}}_P \\ \hat{\mathbf{i}}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}(s + j\omega) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Y}(s - j\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{v}}_P \\ \hat{\mathbf{v}}_N \end{bmatrix} \quad (18)$$

sendo \mathbf{Y} a matriz de admitâncias do sistema. Assim formulação análoga à matriz $\mathbf{Y}(s)$ pode ser desenvolvida para este caso, obtendo-se um sistema com o dobro das dimensões e com a frequência complexa deslocada de $+j\omega$ e $-j\omega$ [4],[17].

No caso de uso das componentes real e imaginária dos fasores como variáveis, a matriz de admitância que relacionaria as tensões e correntes não possuiria acoplamento nulo entre as componentes real e imaginária e também seria formada por elementos complexos. Por estes motivos utilizou-se a transformação dada em (16) e (17).

4.0 - EQUIVALÊNCIA ENTRE OS PROGRAMAS HARMZS E PACDYN

O programa HarmZs tem sua modelagem descrita no item 2.0, enquanto que a modelagem do módulo de ressonância subsíncrona do PacDyn é descrita no item 3.0 onde as equações são escritas utilizando uma referência síncrona girante de eixos. Neste item é apresentada a equivalência entre estas modelagens.

Para a resposta no tempo, quando é aplicado um degrau no PacDyn em uma variável de entrada do sistema que representa um fasor, este degrau corresponde à aplicação de uma senóide no programa HarmZs, pois conforme (10):

$$u(t) = \Re[\hat{u}(t) e^{j\omega t}] = u_{\text{Re}}(t) \cos \omega t - u_{\text{Im}}(t) \sin \omega t \quad (19)$$

sendo u a variável de entrada, modelada diretamente como variável no programa HarmZs e u_{Re} e u_{Im} as componentes real e imaginária da variável que aparecem nas equações do PacDyn.

Assim sendo, aplicar um degrau no PacDyn na parte real da variável de entrada u_{Re} é equivalente a aplicar uma cossenóide de frequência síncrona na variável u do HarmZs. Analogamente, aplicar um degrau na parte imaginária u_{Im} é equivalente a aplicar uma senóide negativa. O efeito de uma senóide com defasagem de frequência fundamental no HarmZs pode ser obtido pela aplicação de degraus ponderados nas partes real e imaginária da variável de entrada no PacDyn.

De forma genérica, o efeito de senóides de outras frequências também pode ser modelado utilizando-se relações trigonométricas. Por exemplo, uma senóide de amplitude A_P , frequência ω_P e fase ϕ_P na componente real da variável de entrada do PacDyn:

$$u_{\text{Re}}(t) = A_P \cos(\omega_P t + \phi_P) \quad (20)$$

Corresponde no HarmZs a duas senóides, uma com frequência $\omega + \omega_P$ e a outra com frequência $\omega - \omega_P$, pois, substituindo (20) em (19), obtém-se:

$$u(t) = A_P \cos(\omega_P t + \phi) \cos \omega t = A_P \frac{\cos[(\omega + \omega_P)t + \phi_P] + \cos[(\omega - \omega_P)t - \phi_P]}{2} \quad (21)$$

A determinação da entrada no PacDyn correspondente a uma cossenóide de amplitude A_H , frequência ω_H e fase ϕ_H no HarmZs da forma:

$$u(t) = A_H \cos(\omega_H t + \phi_H) \quad (22)$$

pode ser feita escrevendo (19) como uma projeção real de um fasor que produza (22). Uma das possibilidades é:

$$u(t) = \Re[\hat{u} e^{j\omega t}] = \Re[A_H e^{j[(\omega_H - \omega)t + \phi_H]} e^{j\omega t}] \quad (23)$$

onde o fasor é dado por:

$$\hat{u} = A_H \{ \cos[(\omega_H - \omega)t + \phi_H] + j \sin[(\omega_H - \omega)t + \phi_H] \} \quad (24)$$

Assim sendo, a cossenóide pode ser representada no PacDyn por:

$$u_{\text{Re}} = A_H \cos[(\omega_H - \omega)t + \phi_H] \quad (25)$$

$$u_{\text{Im}} = A_H \sin[(\omega_H - \omega)t + \phi_H] \quad (26)$$

Para o caso particular de um degrau de amplitude A_H no HarmZs ($\omega_H = 0$, $\phi_H = 0$), esta entrada pode ser representada no PacDyn por:

$$u_{\text{Re}} = A_H \cos \omega t \quad (27)$$

$$u_{\text{Im}} = -A_H \sin \omega t \quad (28)$$

Para a comparação das respostas no tempo entre os programas, da mesma forma que feito para as variáveis de entrada, deve-se utilizar a transformação (10) aplicada às variáveis de saída de corrente alternada, ou seja:

$$y(t) = y_{\text{Re}}(t) \cos \omega t - y_{\text{Im}}(t) \sin \omega t \quad (29)$$

Do ponto de vista de resposta em frequência, tem-se no programa HarmZs a seguinte função de transferência:

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} \quad (30)$$

Sendo $y(s)$ e $u(s)$ as variáveis de saída e entrada, respectivamente, no domínio s . Substituindo s por $j\omega$, pode-se obter os diagramas de Bode de módulo e ângulo ou o diagrama de Nyquist.

Para o PacDyn, utiliza-se a expansão em partes real e imaginária das seguintes equações, desenvolvida a partir de (3) e (4):

$$\mathbf{T} \left(\frac{d\hat{\mathbf{x}}(t)}{dt} + j\omega\hat{\mathbf{x}} \right) = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{b} \hat{u}(t) \quad (31)$$

$$\hat{y}(t) = \mathbf{c}^T \hat{\mathbf{x}}(t) + d \hat{u}(t) \quad (32)$$

Pode-se então determinar a função de transferência, conforme feito em (7):

$$\hat{G}(s) = \frac{\hat{y}(s)}{\hat{u}(s)} = \frac{y_{\text{Re}}(s) + j y_{\text{Im}}(s)}{u_{\text{Re}}(s) + j u_{\text{Im}}(s)} = \mathbf{c}^T [(s + j\omega) \mathbf{T} - \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{b} \quad (33)$$

Comparando (33) com (7) verifica-se que:

$$\hat{G}(s) = G(s + j\omega) \Leftrightarrow G(s) = \hat{G}(s - j\omega) \quad (34)$$

Para comparar as respostas do PacDyn e HarmZs, assume-se uma entrada unitária em $\hat{u}(s)$ ($u_{\text{Re}}(s) = 1$, $u_{\text{Im}}(s) = 0$) e determina-se as respostas em frequência das saídas y_{Re} e y_{Im} . Faz-se então a soma da primeira resposta em frequência com a segunda multiplicada por j , de acordo com (33). Esta soma é feita diretamente no programa visualizador de gráficos Plot CEPEL. Deve-se ainda fazer uma translação do gráfico no eixo das frequências no valor da frequência síncrona do sistema, conforme (34).

Em relação ao cálculo de pólos verifica-se que ao duplicar as dimensões do sistema no PacDyn, pela escrita das equações utilizando uma referência síncrona para os eixos, a quantidade de pólos duplica em relação ao HarmZs. Conforme visto em (18), pela formulação $\mathbf{Y}(s)$ verifica-se claramente que cada pólo do HarmZs vai possuir dois pólos correspondentes no PacDyn, um deles somado de $j\omega$ e o outro subtraído do mesmo valor. No caso do sistema ser modelado por sistema descritor, isto não fica evidente mas o mesmo ocorre pois como ambas as formulações estão fazendo a modelagem do sistema físico utilizando uma referência síncrona girante única, o conjunto de pólos é o mesmo.

5.0 - RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Sistema Benchmark

Para efeito de validação de modelos entre os programas e comparação com o programa de simulação de transitórios eletromagnéticos PSCAD, definiu-se, neste trabalho, o seguinte sistema benchmark.

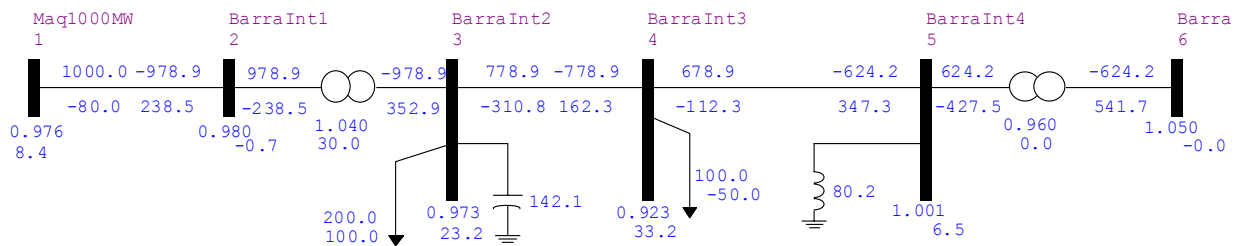


FIGURA 1 – Sistema Benchmark

Os dados do sistema estão apresentados na figura, faltando as seguintes informações complementares dadas a seguir: base do sistema: 100MVA, barras 1,2 e 6, com tensão base 138 kV e as restantes com tensão base 345 kV; circuito 1-2 - reatância de 0,02 pu, trafo 2-3 reatância de 0,01 pu, tap de 1,04 com defasagem de 30° ; cargas 3 e 4 modeladas como carga mista, sendo 25% da parcela ativa e 40% da parcela reativa modelada como um RL ou RC série e o restante modelado como um RL ou RC paralelo; circuito 3-4 é uma capacitância série de reatância de -0,02 pu, circuito 4-5 é uma linha de parâmetros distribuídos de comprimento de 200 km, resistência, reatância série e susceptância shunt por unidade de comprimento nos valores respectivos de 0,01 pu/200km, 0,06 pu/200km e 1 pu/200km; trafo 5-6 com reatância de 0,02 pu, tap 0,96, sem defasagem.

Este sistema possui os diversos componentes que podem fazer parte de um sistema elétrico de grande porte, ou seja, geradores, shunts indutivos e capacitivos, cargas, transformadores com e sem defasagem e com tap não nominal, linha de transmissão de parâmetros distribuídos, indutor e capacitor série.

A seguir são apresentadas as respostas em frequência do PacDyn e do HarmZs, considerando como entrada a tensão da fonte da barra 1 e como saída a tensão da barra 3. A resposta em frequência do HarmZs foi deslocada de 60 Hz para a esquerda, de forma a poder ser feita a comparação com o PacDyn, que está em um referencial girante. Além disto, no PacDyn foi considerada como entrada a parte real da tensão da barra 1 e como saída a parte real da tensão da barra 3, somada da parte imaginária multiplicada pelo complexo j . Após estas operações, os resultados são visualmente coincidentes, como pode ser observado na figura abaixo:

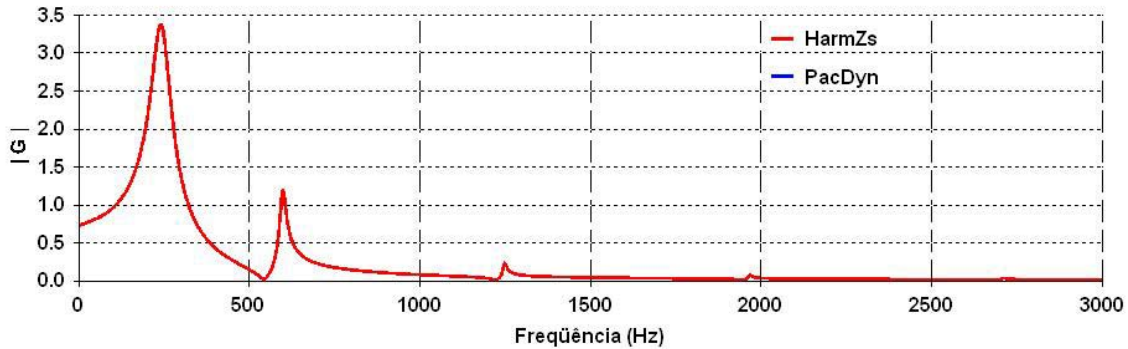


FIGURA 1 – Resposta em frequência considerando com entrada a tensão da fonte da barra 1 e como saída a tensão da barra 3.

Os pólos dominantes do sistema benchmark, calculados em ambos os programas, estão apresentados na tabela 1:

TABELA 1 – Resultados dos pólos dominantes do sistema benchmark no PacDyn e HarmZs.

Pólos – PacDyn		Pólos - HarmZs	
Pólos	Frequência	Pólos	Frequência
$-188,6048 + 1532,6424 j$	243,93	$-188,6048 + 1909,6335 j$	303,93
$-188,6048 - 2286,6246 j$	363,93		
$-60,8788 + 3761,4027 j$	598,65	$-60,8788 + 4138,3939 j$	658,65
$-60,8788 - 4515,3850 j$	718,65		
$-35,2355 + 7851,7916 j$	1249,65	$-35,2355 + 8228,7828 j$	1309,65
$-35,2355 - 8605,7739 j$	1369,65		
$-32,5393 + 12365,7716 j$	1968,07	$-32,5393 + 12742,7627 j$	2028,07
$-32,5393 - 13119,7539 j$	2088,07		
$-31,9172 + 17032,2520 j$	2710,77	$-31,9172 + 17409,2431 j$	2770,77
$-31,9172 - 17786,2342 j$	2830,77		
$-24,1143 - 214,2573 j$	-34,10	$-24,1143 + 162,7338 j$	25,90
$-24,1143 - 539,7249 j$	85,90		
$-0,2903 - 376,9911 j$	60,00	$-878,7823 + 0,0000 j$	0,00
$-878,7823 - 376,9911 j$	60,00	$-0,2903 + 0,0000 j$	0,00

Os modelos reduzidos em frequência em ambos os programas, utilizando estes pólos dominantes, são visualmente coincidentes com os modelos completos, produzindo a mesma figura 1. Assim é possível determinar a resposta no tempo analítica, utilizando o modelo reduzido, mesmo neste caso que utiliza linhas de parâmetros distribuídos com modelagem $Y(s)$.

Como se pode ver, os resultados da resposta em frequência e dos pólos dominantes do PacDyn e HarmZs são perfeitamente compatíveis e, por consequência, as respostas no tempo de ambos os programas são coincidentes. Distúrbios em degrau e senóide foram feitos em [1], não sendo aqui repetidos por questão de espaço e, por produzirem resultados obviamente coincidentes.

Como resultado de validação final deste sistema, também foi simulada a resposta no tempo da tensão da barra 3, considerando como distúrbio a aplicação de uma cossenóide de amplitude rms de 0,01 pu na tensão da fonte da barra 1. Comparou-se com a resposta do programa PSCAD. Os resultados foram visualmente coincidentes, como pode ser observado na Figura 2.

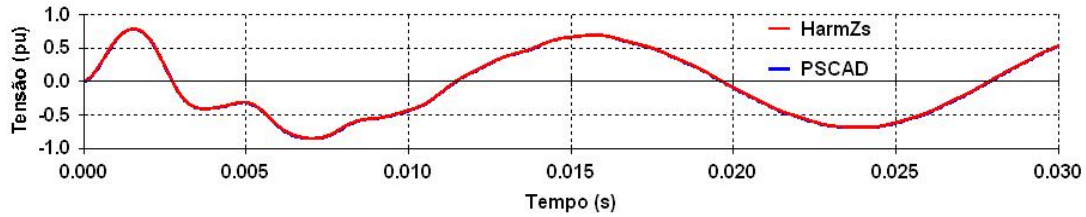


FIGURA 2 – Resposta da tensão da barra 3, para uma cossenóide aplicada na fonte de tensão da barra 1.

A comparação dos resultados do HarmZs com resultados do PacDyn considerando modelos completos para a máquina síncrona e seus controladores é apresentada em [1], não sendo aqui novamente realizada por questão de espaço. Na referência [1] concluiu-se que realmente a modelagem detalhada da máquina é importante para a análise de transitórios de mais baixas frequências (estabilidade eletromecânica e ressonância subsíncrona) sendo que o modelo subtransitário simplificado adequa-se ao estudo de transitórios de mais altas frequências.

5.2 Sistema Brasileiro

Como resultados finais determinou-se as respostas em frequência de uma função de transferência do sistema brasileiro, cujos arquivos de dados podem ser obtidos na página do ONS (www.ons.org.br). O caso utilizado foi o da base de dados do PacDyn - Set 2006 - caso 4 - carga pesada. As máquinas foram modeladas como fontes ideais atrás de reatâncias subtransitórias. Para isto, o arquivo de fluxo de potência foi modificado de forma a incluir estas reatâncias. Os SVCs, TCSCs e elos de corrente contínua, presentes no caso, foram substituídos por equivalentes, uma vez que as representações destes equipamentos não lineares são distintas nos dois programas. No entanto, isto não trouxe alterações significativas nos resultados para a função de transferência escolhida para a análise. A função de transferência escolhida como exemplo tem como variável de entrada a tensão subtransitória de Itaipu 60 Hz (barra 1107) e como variável de saída a tensão da barra de Tijuco Preto 765 kV (barra 76). A resposta em frequência desta função de transferência está mostrada na Figura 3.

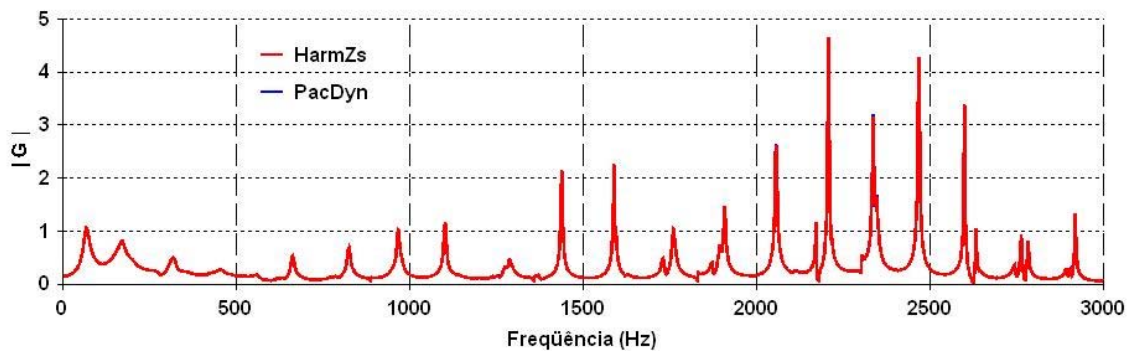


FIGURA 3 – Resposta em frequência da tensão da barra de Tijuco Preto tendo como entrada a tensão subtransitória equivalente da usina de Itaipu 60 Hz.

Determinaram-se os pólos dominantes desta função de transferência na faixa de frequência de 0 a 1700 Hz, obtendo-se no HarmZs a resposta em frequência mostrada na Figura 4, sem o deslocamento de 60 Hz.

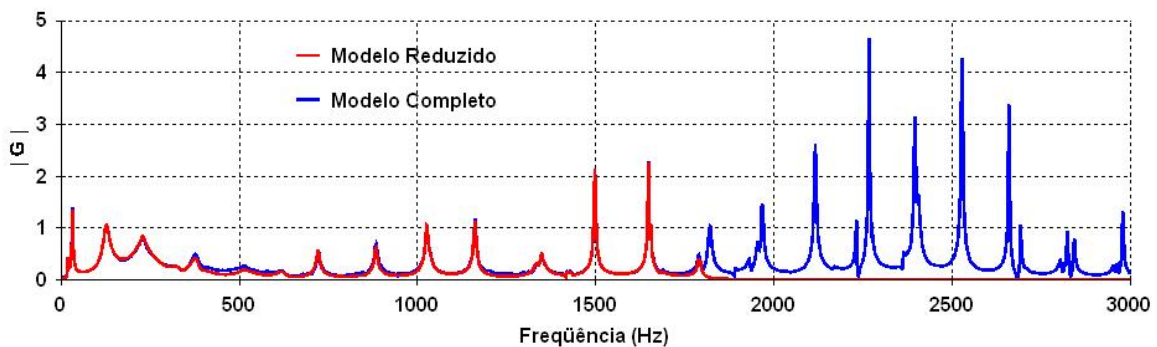


FIGURA 4 – Comparação da resposta em frequência completa do sistema com o modelo de ordem reduzida.

O modelo reduzido obtido no PacDyn é visualmente coincidente com o do programa HarmZs deslocado de 60 Hz, não sendo apresentado por questão de espaço.

Os pólos dominantes correspondentes estão apresentados na Tabela 2. Na coluna referente ao PacDyn, o pólo p apresentado corresponde ao par de pólos $p-2\pi 60j$ e $p+2\pi 60j$ que é calculado no PacDyn. Verifica-se que os pólos são muito próximos entre os dois programas. Acredita-se que as pequenas diferenças podem ser explicadas por problemas numéricos.

TABELA 2 – Resultados dos pólos dominantes do sistema brasileiro no PacDyn e HarmZs.

Pólos – PacDyn		Pólos - HarmZs	
Pólos	Pólos	Pólos	Pólos
-315,8879 + 975,9677 j	-49,7307 + 4542,4493 j	-315,7070 + 975,8538 j	-50,0178 + 4543,5623 j
-177,9428 + 1707,6830 j	-45,6155 + 6512,6256 j	-178,4448 + 1706,9876 j	-45,0729 + 6512,3529 j
-145,9923 + 1431,7580 j	-38,4186 + 8381,1651 j	-146,5771 + 1431,3783 j	-37,3939 + 8382,0964 j
-127,1479 + 1279,7070 j	-37,1548 + 8529,0724 j	-126,7197 + 1279,6843 j	-37,1838 + 8529,3588 j
-113,8147 + 1473,7810 j	-35,6616 + 4542,0512 j	-111,5988 + 1472,4364 j	-35,4462 + 4541,6774 j
-112,5094 + 2552,3750 j	-32,1463 + 8474,6697 j	-111,3276 + 2550,9585 j	-32,0016 + 8474,5055 j
-110,7820 + 3277,5173 j	-32,0960 + 6396,9198 j	-112,0653 + 3276,8738 j	-32,2041 + 6396,2215 j
-105,6942 + 3347,4790 j	-27,3793 + 10596,4080 j	-105,3313 + 3348,4850 j	-27,3361 + 10596,4526 j
-95,3093 + 1527,9019 j	-27,1031 + 5560,3520 j	-95,2133 + 1527,6503 j	-27,1938 + 5560,3640 j
-92,5821 + 1659,6469 j	-24,0115 + 6453,2304 j	-91,3425 + 1655,1753 j	-24,2009 + 6453,3714 j
-92,2886 + 3230,5819 j	-23,4240 + 11272,9335 j	-92,7726 + 3230,5011 j	-23,4280 + 11272,8958 j
-88,6066 + 2404,8369 j	-22,1962 + 7307,4503 j	-89,8019 + 2407,3161 j	-22,1323 + 7307,3837 j
-87,9778 + 2328,2365 j	-21,8792 + 9012,3010 j	-87,7406 + 2328,1015 j	-22,0919 + 9012,1216 j
-83,2891 + 2085,7699 j	-13,9105 + 9419,6893 j	-83,2436 + 2085,2468 j	-13,9038 + 9419,6820 j
-69,6877 + 3909,8651 j	-10,7968 + 10368,2080 j	-69,5781 + 3909,7989 j	-10,8157 + 10368,1951 j
-62,9022 + 5534,9533 j	-8,7596 + 10400,5219 j	-62,6887 + 5534,5707 j	-8,7645 + 10400,5172 j
-61,4494 + 8407,4050 j	-8,4561 + 8919,3536 j	-60,8146 + 8407,0163 j	-8,4492 + 8919,3634 j
-57,6543 + 802,7523 j	-8,2678 + 11248,8580 j	-57,7183 + 802,6044 j	-8,2688 + 11248,8574 j
-52,7250 + 2392,09351 j	-8,0270 + 208,4613 j	-52,6213 + 2392,1227 j	-8,0267 + 208,4570 j
-49,9571 + 5272,2915 j	-6,2645 + 124,3207 j	-49,9956 + 5272,0913 j	-6,2633 + 124,3029 j
-49,9507 + 1438,8533 j		-49,9479 + 1438,8714 j	

Verifica-se que mesmo neste sistema de grande porte, os resultados são compatíveis entre os dois programas.

6.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresentou a equivalência entre as modelagens utilizadas nos programas PacDyn e HarmZs assim como a manipulação algébrica necessária para que haja concordância entre seus resultados de simulação. São mostrados resultados da comparação entre os programas nos domínios do tempo e da frequência, incluindo o cálculo de pólos em um sistema benchmark de pequeno porte que possui os diversos componentes presentes em uma rede de transmissão genérica. Por fim, apresentaram-se resultados do sistema elétrico brasileiro completo.

Todos os resultados apresentados mostraram a equivalência entre as modelagens e metodologias. Foram também apresentados resultados do programa PSCAD/EMTDC de simulação de transitórios eletromagnéticos, havendo também neste caso a concordância de resultados. Esta concordância entre os três programas, que utilizam formulações matemáticas e algoritmos numéricos distintos, são fortes evidências da validade dos métodos e programas desenvolvidos. Isto torna possível a utilização sinérgica destes programas em estudos que exijam a análise de ressonâncias da rede em conjunto com a modelagem de máquinas [3] e FACTS [15],[16].

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Gomes Jr., S. L. Varricchio, P. E. M. Quintão, N. Martins, C. O. Costa., "Equivalência entre as Modelagens do PacDyn e HarmZs para Análise de Ressonância Subsíncrona, Ressonâncias de Redes e Harmônicos", IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Florianópolis, Maio, 2006.
- [2] PacDyn User's Manual, CEPEL, 2007.
- [3] S. Gomes Jr., P. E. M. Quintão, N. Martins, "Subsynchronous Resonance Results obtained with a Comprehensive Small Signal Stability Program", IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Rio de Janeiro, Maio, 2004.
- [4] G. Kron, "Tensors for Circuits", G.E. Co., Schenectady, NY, 1942.
- [5] Manual do Usuário do Programa HarmZs, CEPEL, 2004.

- [6] S. L. Varricchio, S. Gomes Jr., N. Martins, L. R. Araujo, F. C. Véliz, C. O. Costa, "Advanced Tool for Harmonic Analysis of Power Systems, IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Rio de Janeiro, Maio, 2004.
- [7] S. L. Varricchio S. Gomes Jr. and N. Martins, "Two Powerful Network Modeling Approaches for the Modal Analysis of Harmonic Problems", VIII Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning – VIII SEPOPE, Brasília, Brazil, 19th - 23rd May, 2002.
- [8] S. L. Varricchio, N. Martins, L. T. G. Lima, "A Newton-Raphson Method Based on Eigenvalue Sensitivities to Improve Harmonic Voltage Performance", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 1, January 2003, pp. 334-342.
- [9] S. L. Varricchio, N. Martins, L. T. G. Lima and S. Carneiro Jr. "Studying Harmonic Problems Using a Descriptor System Approach", Proceedings of the IPST'99 - International Conference on Power System Transients, Budapest, Hungary, June, 1999.
- [10] S. L. Varricchio S. Gomes Jr. and N. Martins, "Modal Analysis of Industrial System Harmonics Using the s-Domain Approach", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 3, July 2004, pp. 1232-1237.
- [11] S. Gomes Jr., N. Martins, C. Portela, "Modal Analysis Applied to s-Domain Models of ac Networks", Proceedings of the IEEE/PES Winter Meeting, Columbus, Ohio, Janeiro 2001.
- [12] S. Gomes Jr., C. Portela, N. Martins, "Detailed Model of Long Transmission Lines for Modal Analysis of ac Networks", Proceedings of the IPST'01 - International Conference on Power System Transients, Rio de Janeiro, Brasil, Junho 2001.
- [13] S. L. Varricchio, S. Gomes Jr., N. Martins, "s-Domain Approach to Reduce Harmonic Voltage Distortions Using Sensitivity Analysis", Proceedings of the IEEE/PES Winter Meeting, Columbus, Ohio, Janeiro 2001.
- [14] PSCAD/EMTDC User's Manual, Manitoba HVDC Research Center, Canada, 1994.
- [15] S. Gomes Jr., N. Martins, A. Stankovic, "Improved Controller Desing Using New Dynamic Phasor Models of SVC's Suitable For High Frequency Analysis", Transmission and Distribution Conference and Exposition, Dallas, 22-24 Maio, 2006.
- [16] F. L. Lirio, S. Gomes Jr., E. H. Watanabe, "Análise de Interação Dinâmica entre Múltiplos SVCs utilizando Modelagem Tensorial no Domínio s", IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Florianópolis, Maio, 2006.
- [17] J. M. Undrill, T. E. Kostyniak, "Subsynchronous Oscillations Part 1 – Comprehensive System Stability Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, vol PAS-95, no. 4, pp. 1446-1455.