



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

BR/GAT/22  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

## **GRUPO - IV**

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

#### **Análise a Pequenos Sinais de Ressonância Subsíncrona no PacDyn utilizando Dados do ANATEM**

**Sergio Gomes Junior  
CEPEL, UFF**

**Fernando Cattán Jusan  
FURNAS**

**Tiago Santana do Amaral  
CEPEL**

## **RESUMO**

O PacDyn possibilita a análise precisa da estabilidade a pequenos sinais de oscilações torcionais, incluindo o fenômeno de ressonância subsíncrona (RSS), complementando as ferramentas de simulação no tempo de transitórios eletromagnéticos, utilizadas atualmente para estudos deste fenômeno. Neste artigo será descrito o trabalho realizado para possibilitar a análise de ressonância subsíncrona utilizando dados de estabilidade eletromecânica no formato do programa ANATEM, mas com uma modelagem adequada para análise do fenômeno, minimizando o esforço de preparação de dados.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Ressonância subsíncrona, Análise a pequenos sinais, Interações torcionais, Análise modal

### **1.0 - INTRODUÇÃO**

A ressonância subsíncrona (RSS) é um fenômeno que pode ocorrer em usinas térmicas, nas quais os componentes do turbo-gerador (gerador síncrono, excitatriz rotativa e múltiplos estágios de turbina a vapor) são conectados em um eixo longo, formando um sistema mecânico de múltiplas massas girando em alta velocidade. Estes componentes são modelados por massas concentradas individualizadas e as seções dos eixos, que possuem uma certa elasticidade, são modeladas por molas com características elásticas bem definidas entre as massas (1), (2). Este sistema massa-mola possui modos naturais de oscilação conhecidos como modos torcionais e o atrito é o principal responsável pelo amortecimento destas oscilações.

Os modos torcionais possuem frequências naturais de oscilação e amortecimentos que dependem principalmente das características mecânicas das massas e eixos. No entanto, também interagem com o sistema elétrico a partir do torque elétrico no gerador e dos torques mecânicos na turbina.

RSS ocorre quando há uma proximidade da frequência de um dos modos torcionais com a diferença entre a frequência fundamental e a frequência natural de oscilação da rede elétrica, tipicamente em uma frequência abaixo da frequência síncrona do sistema. Neste caso o sistema pode se tornar instável devido a uma interação dinâmica adversa que torna negativo o amortecimento do modo torcional. RSS usualmente está associada ao emprego de compensação série, pois a ressonância da capacitância com indutâncias vizinhas é da mesma faixa de frequência dos modos torcionais (dezenas de Hz).

Além do problema de RSS, pode ocorrer o fenômeno de interação dinâmica adversa dos modos torcionais com sistemas de excitação, estabilizadores, equipamentos FACTS ou elos de corrente contínua (1). O efeito também é de reduzir ou tornar negativo o amortecimento das oscilações torcionais.

Na prática a redução do amortecimento dos modos torcionais implica em maior vibração do sistema mecânico e, em casos de instabilidade, as vibrações são crescentes e podem levar a excessiva perda de vida útil, desligamentos, prejuízos à instalação e, em casos extremos, ruptura de eixo. Por este motivo, é muito importante o estudo do amortecimento das oscilações torcionais, também denominado estudo de interação torcional (IT).

Nestes estudos são comumente utilizados programas de simulação de transitórios eletromagnéticos como, por exemplo, ATP, EMT e PSCAD. Programas de simulação de estabilidade transitória, como o ANATEM, não são adequados para a análise de IT, pois a dinâmica da rede de transmissão não é representada, sendo inválido para fenômenos de frequência superior a aproximadamente 5 Hz.

O PacDyn (3) possibilita a análise linear do fenômeno de IT (4), ou seja, a estabilidade a pequenos sinais de oscilações torcionais, onde utiliza-se uma modelagem analítica adequada para a rede e equipamentos (5). A grande vantagem do PacDyn é a possibilidade de utilização de outros métodos matemáticos, utilizando teoria de controle, para uma eficiente identificação e solução dos problemas de IT (6)-(8).

O PacDyn recentemente foi modificado para compatibilização de modelos e leitura direta do banco de dados do Sistema Interligado Nacional (SIN) do ANATEM, para análise a pequenos sinais de estabilidade eletromecânica (9). No entanto, para a análise de IT o PacDyn continuava a utilizar um formato de arquivo de dados próprio. Decidiu-se então desenvolver uma nova versão do PacDyn que permitisse o aproveitamento integral do banco de dados de estabilidade no formato ANATEM, adicionando apenas os dados do sistema massa-mola para permitir a modelagem adequada do fenômeno, incluindo automaticamente a dinâmica da rede e do estator das máquinas, sem a necessidade de dados adicionais. Este desenvolvimento teve por objetivo reduzir significativamente o esforço de preparação e levantamento de dados.

A análise a pequenos sinais permitirá então a identificação e solução dos problemas de IT e os programas de transitórios eletromagnéticos podem se concentrar apenas na avaliação das grandes perturbações e validação de resultados. Portanto, o PacDyn permitirá uma grande redução dos esforços de análise e computação das simulações de transitórios eletromagnéticos, pois não serão mais necessárias diversas comparações de curvas de simulações variando múltiplos parâmetros ou configurações e o reajuste de parâmetros por processo de tentativa e erro, sendo empregada uma metodologia mais eficiente.

Neste artigo serão apresentados os desenvolvimentos realizados para possibilitar a utilização do banco de dados do ANATEM no estudo de amortecimento de interações torcionais no PacDyn. Serão ainda apresentados resultados de um caso exemplo de pequeno porte e outro do SIN, de grande porte, que mostram os recursos disponíveis no programa para análise de ressonância subsíncrona utilizando o novo formato de leitura e a validação dos novos desenvolvimentos.

## 2.0 - DESENVOLVIMENTOS COMPUTACIONAIS

O desenvolvimento computacional realizado teve por objetivo possibilitar a leitura pelo PacDyn do formato ANATEM para análise de ressonância subsíncrona. Para tanto foi criado o código de execução "MDEL 2" que permite alterar a modelagem da rede para análise de ressonância subsíncrona, dispensando o uso do código de execução DSYS que só podia ser utilizado em arquivos formato PacDyn.

Assim, para a análise de ressonância subsíncrona, ao utilizar um arquivo formato ANATEM, inclui-se um arquivo adicional que contém o código MDEL e os dados de massa individualizadas utilizando o código DMAS já presente no programa e que passa a ser também utilizado para arquivos no formato ANATEM.

Para teste iniciais da funcionalidade implementada utilizou-se o sistema teste FBM distribuído junto à versão 9.6 do PacDyn. Fez-se a modelagem deste sistema máquina x barra infinita utilizando o formato ANATEM no arquivo FBM01.STB e adicionou-se um arquivo fbmsr.dyn com os seguintes códigos de execução:

```
MDEL 2
DMAS
#
#(Nb1)no
0001 0
#Flag (-IDENT-)(-Hmass-)(-Dmass-)(-MechT-)(-Kshft-)(-Dshft-)
HP      0.092897  0.10500  0.30  19.303  0.0
IP      0.155589  0.05850  0.26  34.929  0.0
LPA     0.858670  0.01970  0.22  52.038  0.0
LPB     0.884215  0.00233  0.22  70.858  0.0
GEN     0.868495  0.02480      2.822  0.0
STOP
-999
END
```

O caso possui saliência subtransitória, ou sejam, as reatâncias subtransitórias de eixo direto e quadratura são diferentes, o que não foi previsto no formato ANATEM. Verificou-se por testes que embora a aproximação de desprezar a saliência subtransitória é razoável para análise de estabilidade eletromecânica, o mesmo não ocorre para o fenômeno de ressonância subsíncrona, que envolve uma faixa de frequência mais elevada, mais influenciada pelos parâmetros subtransitórios da máquina síncrona. Para tornar possível a leitura pelo PacDyn do valor de reatância subtransitória de eixo em quadratura, criou-se um campo adicional L"q no código DMDG, conforme apresentado a seguir. Este campo adicional não é processado pelo ANATEM e, portanto, não atrapalha a leitura ou produz qualquer tipo de erro na simulação convencional do ANATEM de estabilidade transitória. No entanto, quando lido pelo PacDyn, é automaticamente considerado no modelo:

DMDG MD03

```

(No) (CS) (Ld) (Lq) (L'd) (L'q) (L''d) (L''q) (L1) (T'd) (T'q) (T''d) (T''q)
(No) (Ra) (H) (D) (MVA) Fr C (L''q)
0002 179. 171. 16.9 22.8 13.5 13. 4.3 0.85 .032 .050
0002 2.894 892.4 20.0
999999

```

Além dos desenvolvimentos descritos neste item, foram realizadas uma série de outras adaptações no código fonte do PacDyn pois diversas partes do código referentes a críticas e modelagens específicas para análise de ressonância subsíncrona não estavam preparadas para utilização direta dos dados originários do ANATEM. Estas alterações embora tenham requerido um esforço considerável de programação, não estão aqui descritas por estarem em um nível de detalhamento que só poderia ser explicado a partir de uma descrição mais detalhada de diversas estruturas internas do código fonte do programa, o que fugiria do objetivo do artigo.

Foram realizados diversos testes comparando-se os resultados obtidos com o formato ANATEM com os do programa original utilizando formato de dados original. A coincidência de resultados comprovaram a validade das implementações realizadas.

### 3.0 - RESULTADOS OBTIDOS

Para obtenção dos resultados utilizou-se o sistema teste de (10), baseado em um sistema de (1). Este sistema originalmente não possui linhas de transmissão com compensação série. Para obtenção dos resultados de ressonância subsíncrona considerou-se para todos os geradores a configuração de massas individualizadas apresentada na Figura 3, com os parâmetros da Tabela 1. Para os geradores 1 e 3 que possuem excitatrizes estáticas foram desprezados os dados da massa EXC e da seção do eixo GEN-EXC.



Figura 1 – Estrutura de massas dos quatro geradores

Tabela 1 – Parâmetros das massas individuais dos geradores

Massa	H(s)	D (pu/pu)	Fator Tm	Eixo	K (pu/rad)
HP	0.2086431	0.10500	0.30	HP-IP	43.35381
IP	0.3494470	0.05850	0.26	IP-LPA	78.44921
LPA	1.9285404	0.01970	0.22	LPA-LPB	116.8754
LPB	1.9859135	0.00233	0.22	LPB-GEN	159.1444
GEN	1.9506070	0.02480	0.30	GEN-EXC	43.35381
EXC	0.2086431	0.10500			

Calculou-se então os pólos do sistema utilizando o algoritmo QZ. A partir dos fatores de participação máximos de cada pólo, separou-se os modos torcionais e determinou-se a qual gerador cada um correspondia, conforme mostrado na Tabela 2. A tabela também apresenta os modos eletromecânicos.

Tabela 2 – Modos torcionais de cada gerador e eletromecânicos

Natureza do Modo	Polo	$\zeta$ (%)	f(Hz)	Natureza do Modo	Polo	$\zeta$ (%)	f(Hz)
Torcionais Ger1	-0.05977 ±j100.91	0.06	16.06	Torcionais Ger3	-0.07574 ±j101.11	0.07	16.09
	-0.07250 ±j159.99	0.05	25.46		-0.07455 ±j160.02	0.05	25.47
	-0.01419 ±j202.41	0.01	32.21		-0.01689 ±j202.46	0.01	32.22
	-0.06138 ±j298.18	0.02	47.46		-0.06138 ±j298.18	0.02	47.46
Torcionais Ger2	-0.05725 ±j98.89	0.06	15.74	Torcionais Ger4	-0.07298 ±j99.08	0.07	15.77
	-0.07509 ±j160.57	0.05	25.55		-0.08058 ±j160.61	0.05	25.56
	-0.02001 ±j202.92	0.01	32.30		-0.02089 ±j202.99	0.01	32.31
	-0.06138 ±j298.18	0.02	47.46		-0.06514 ±j298.18	0.02	47.46
Eletro-Mecânicos	-0.03617 ±j127.01	0.03	20.21		-0.03908 ±j127.02	0.03	20.22
	-0.6040 ±j3.8936	15.33	0.62				
	-0.5738 ±j7.1264	8.03	1.13				
	-0.7908 ±j7.8008	10.09	1.24				

Para efeito de comparação, são apresentados na Tabela 3 os modos eletromecânicos calculados utilizando a modelagem convencional para análise de estabilidade eletromecânica, onde a dinâmica da rede é desprezada, assim como as massas dos geradores são representadas concentradas. Verifica-se que os valores são próximos dos obtidos na Tabela 2.

Tabela 3 – Modos eletromecânicos obtidos utilizando modelagem convencional para estudos de estabilidade

Região	Polo	$\zeta$ (%)	f(Hz)
Área 1 (G1 x G2)	-0.5981 $\pm$ j7.1424	8.35	1.14
Area 2 (G3 x G4)	-0.8098 $\pm$ j7.8170	10.30	1.24
Interárea	-0.6069 $\pm$ j4.0000	15	0.64

Pelos resultados apresentados não há problema de ressonância subsíncrona, como já esperado uma vez que não há compensação série no sistema. Com o objetivo de apresentar o fenômeno, modificou-se a rede de transmissão, aumentando-se o comprimento das linhas 5-6 e 6-7 de 25 e 10 km para 50 km em ambas, com uma reatância longitudinal de valor de 5% em cada linha (a reatância é de 0,1% por km de linha). Acrescentou-se então compensação série em 4 trechos: 5-51, 61-6, 6-62 e 71-7 com os valores de reatância capacitiva de 1,0%, 1,5%, 2,0% e 1,5%, respectivamente. O diagrama unifilar do sistema está apresentado na Figura 4.

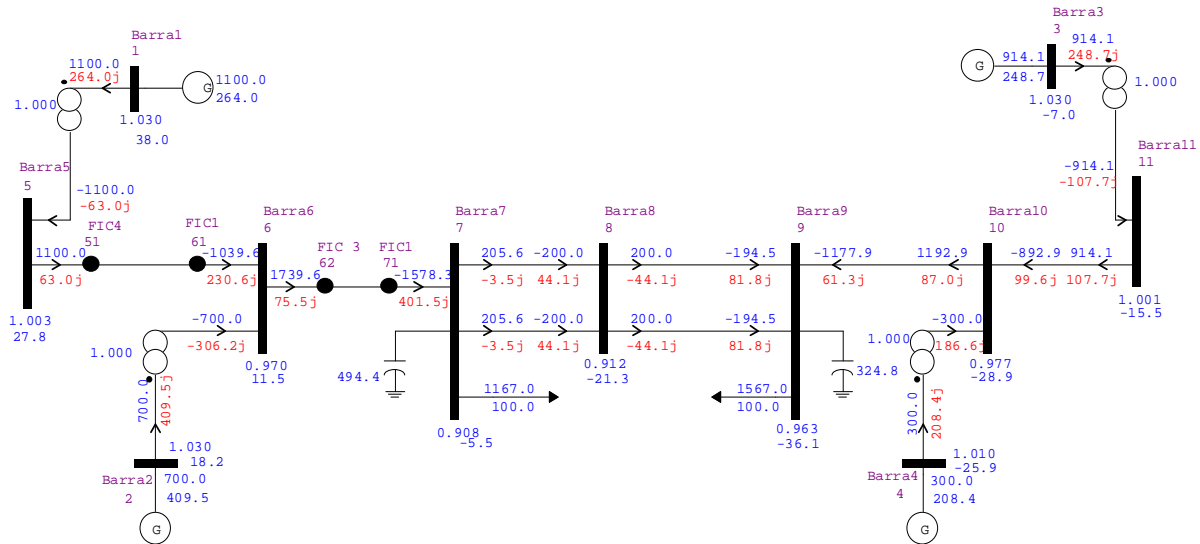


Figura 2 – Sistema-teste utilizado

A lista de polos calculados pelo método QZ para o sistema modificado, com compensação série, é apresentada na tabela seguinte.

Tabela 4 – Polos do sistema-teste modificado (com compensação série)

Natureza do Modo	Polo	$\zeta$ (%)	f(Hz)	Natureza do Modo	Polo	$\zeta$ (%)	f(Hz)
Torcionais Ger1	-0.04701 $\pm$ j100.94	0.05	16.06	Torcionais Ger3	-0.08113 $\pm$ j101.12	0.08	16.09
	-0.06079 $\pm$ j160.00	0.04	25.46		-0.07219 $\pm$ j160.03	0.05	25.47
	<b>+0.03630 <math>\pm</math>j202.45</b>	<b>-0.02</b>	<b>32.22</b>		-0.007575 $\pm$ j202.46	0.00	32.22
	-0.06137 $\pm$ j298.18	0.02	47.46		-0.06138 $\pm$ j298.18	0.02	47.46
Torcionais Ger2	-0.03902 $\pm$ j98.89	0.04	15.74	Torcionais Ger4	-0.0805 $\pm$ j99.10	0.08	15.77
	-0.07197 $\pm$ j160.59	0.04	25.56		-0.08118 $\pm$ j160.62	0.05	25.56
	<b>+0.07879 <math>\pm</math>j203.04</b>	<b>-0.04</b>	<b>32.32</b>		-0.01787 $\pm$ j203.00	0.01	32.31
	-0.06138 $\pm$ j298.18	0.02	47.46		-0.06514 $\pm$ j298.18	0.02	47.46
Sub-síncronos	-49.967 $\pm$ j205.20	23.66	32.66	Super-Síncronos	-17.948 $\pm$ j528.09	3.40	84.05
	-14.645 $\pm$ j224.72	6.50	35.76		-50.146 $\pm$ j549.55	9.09	87.46
Eletro-Mecânicos	-0.6040 $\pm$ j3.8936	15.33	0.62				
	-0.5738 $\pm$ j7.1264	8.03	1.13				
	-0.7908 $\pm$ j7.8008	10.09	1.24				

Verifica-se o surgimento de modos com amortecimento negativo (+0.03630  $\pm$ j202.45 no gerador 1 e +0.07879  $\pm$ j203.04 no gerador 2), indicando instabilidade devido à ressonância subsíncrona. Isto ocorre pois, para estes níveis de compensação, um dos modos subsíncronos (-49.967  $\pm$ j205.20) possui frequência bem próxima dos modos torcionais afetados, causando a instabilidade. Os geradores 3 e 4 não possuem pólos com amortecimento negativo por estarem localizados distantes eletricamente da compensação série e, portanto, as suas potências geradas não fluem pelas linhas compensadas.

A Figura 3 mostra o mode-shape em forma de histograma das velocidades das massas para o pólo  $+0.07879 \pm j203.04$ . Pelo histograma verifica-se que a massa LPB do gerador 2 é a que mais oscila com este pólo.

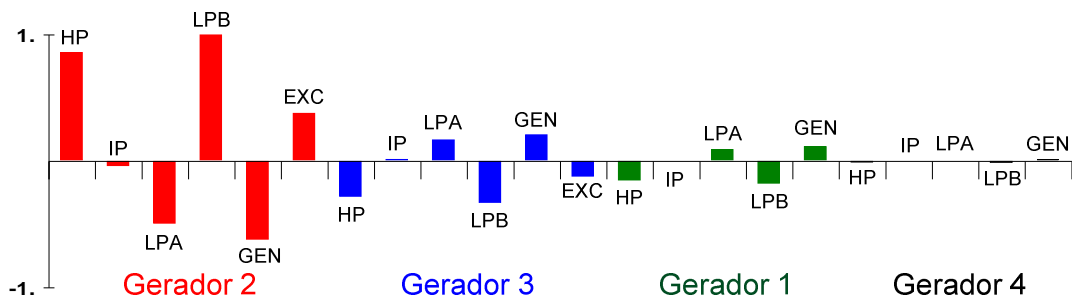


Figura 3 – Mode-shape em forma de histograma das velocidades das massas individualizadas dos geradores

A Figura 4 apresenta a resposta no tempo da variação da velocidade da massa LPB do gerador 2 para um degrau de 10 MW positivo na potência mecânica do gerador 1 e negativo na do gerador 2. Verifica-se uma oscilação de alta frequência crescente, correspondente à instabilidade do modo torcional.

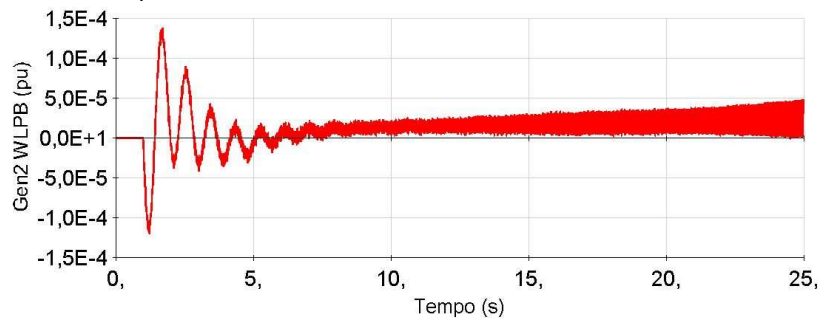


Figura 4 – Resposta no tempo de LPB de G2 da simulação de um degrau nos geradores 1 e 2 com sinais opostos

Na Figura 5 é apresentada uma análise do lugar das raízes. Inicialmente variou-se o grau de compensação da linha 5-6 de 0% a 100% da reatância total da linha, mantendo a compensação da linha 6-7 constante em seu valor inicial (70%). Na Figura 6 são mostrados os diversos pólos em escala ampliada, para a mesma variação da Figura 5. Verifica-se que aparecem algumas instabilidade mais acentuadas. Por exemplo, o valor a partir do qual um dos modos torcionais de 32 Hz se torna instável ocorre para um grau de compensação de 40%. Para este mesmo modo, uma compensação de 61% corresponde à máxima interação com a rede elétrica.

Foi feita análise semelhante variando o grau de compensação da LT 6-7 de 0% a 100%, mantendo a compensação série da LT 5-6 em 50%. Neste caso obtém-se o *root-locus* dos modos torcionais mostrado na Figura 9. Nota-se que o efeito desta compensação sobre os modos torcionais é sensivelmente menor do que a da outra linha. O detalhamento dos principais modos torcionais e da rede elétrica é apresentado na Figura 10.

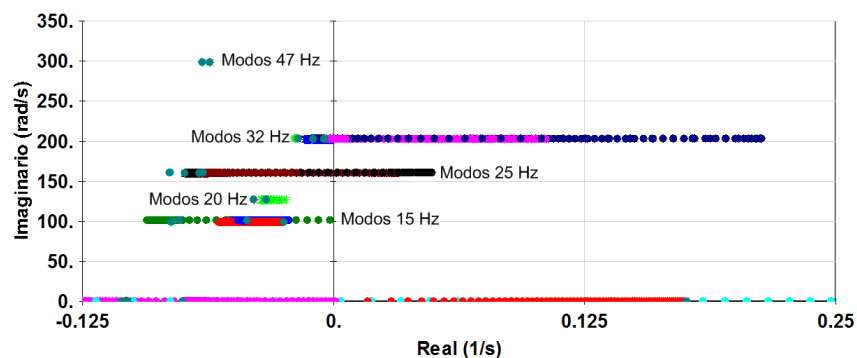


Figura 5 – Variação do grau de compensação da LT 5-6 de 0% a 100%, mantendo a CS da LT 6-7 em 70%

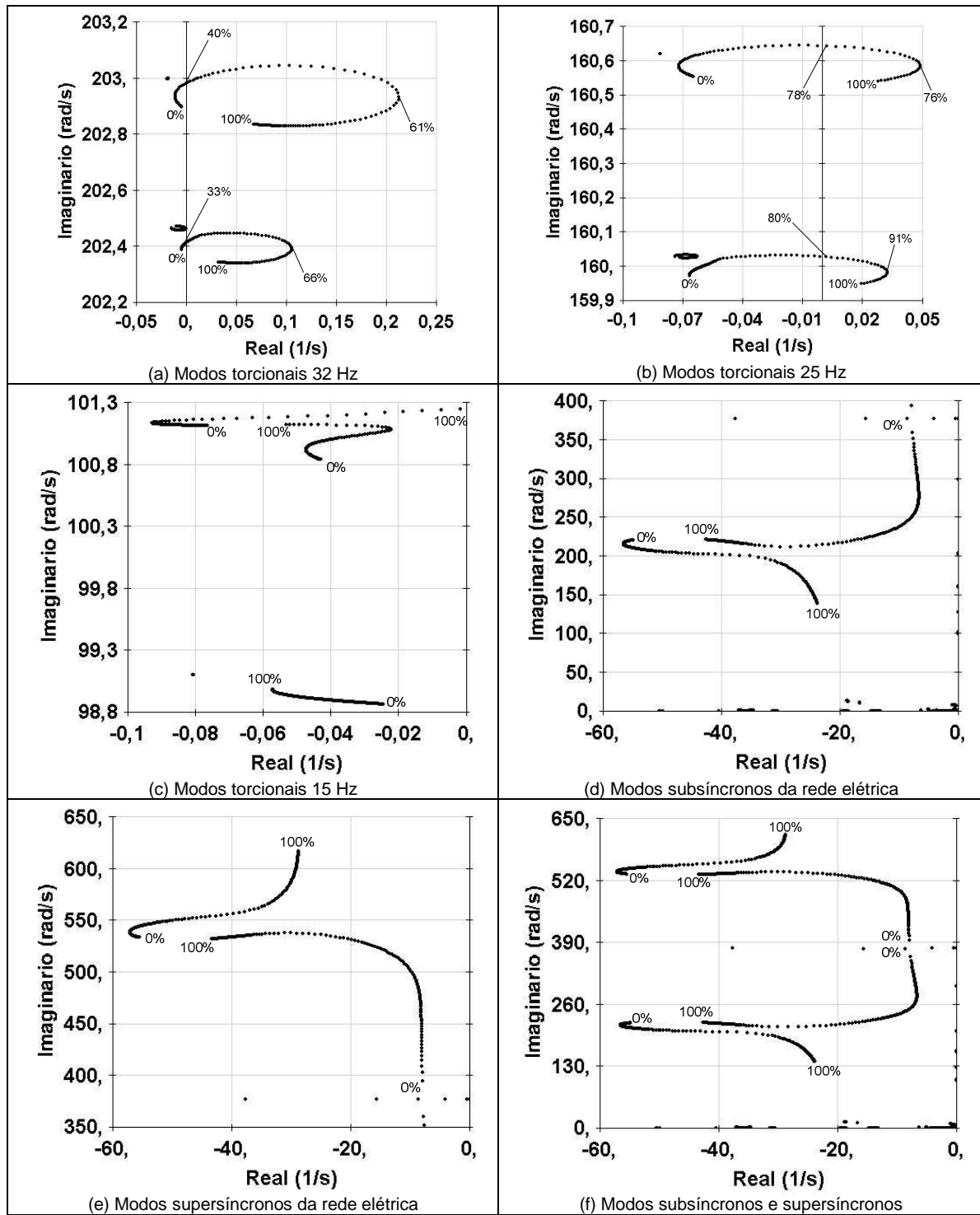


Figura 6 – Detalhamento dos principais modos torcionais e da rede elétrica para variação do grau de compensação da LT 5-6 de 0% a 100%, mantendo a CS da LT 6-7 em 70%

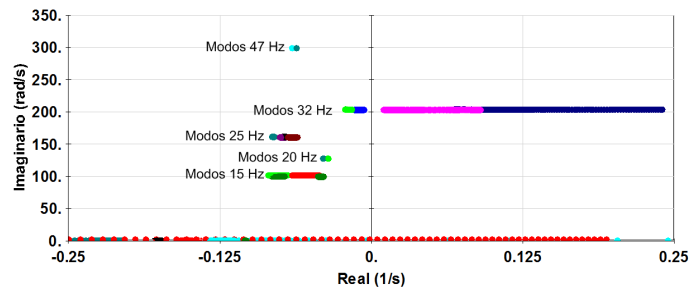


Figura 7 – Variação do grau de compensação da LT 6-7 de 0% a 100%, mantendo a CS da LT 5-6 em 50%

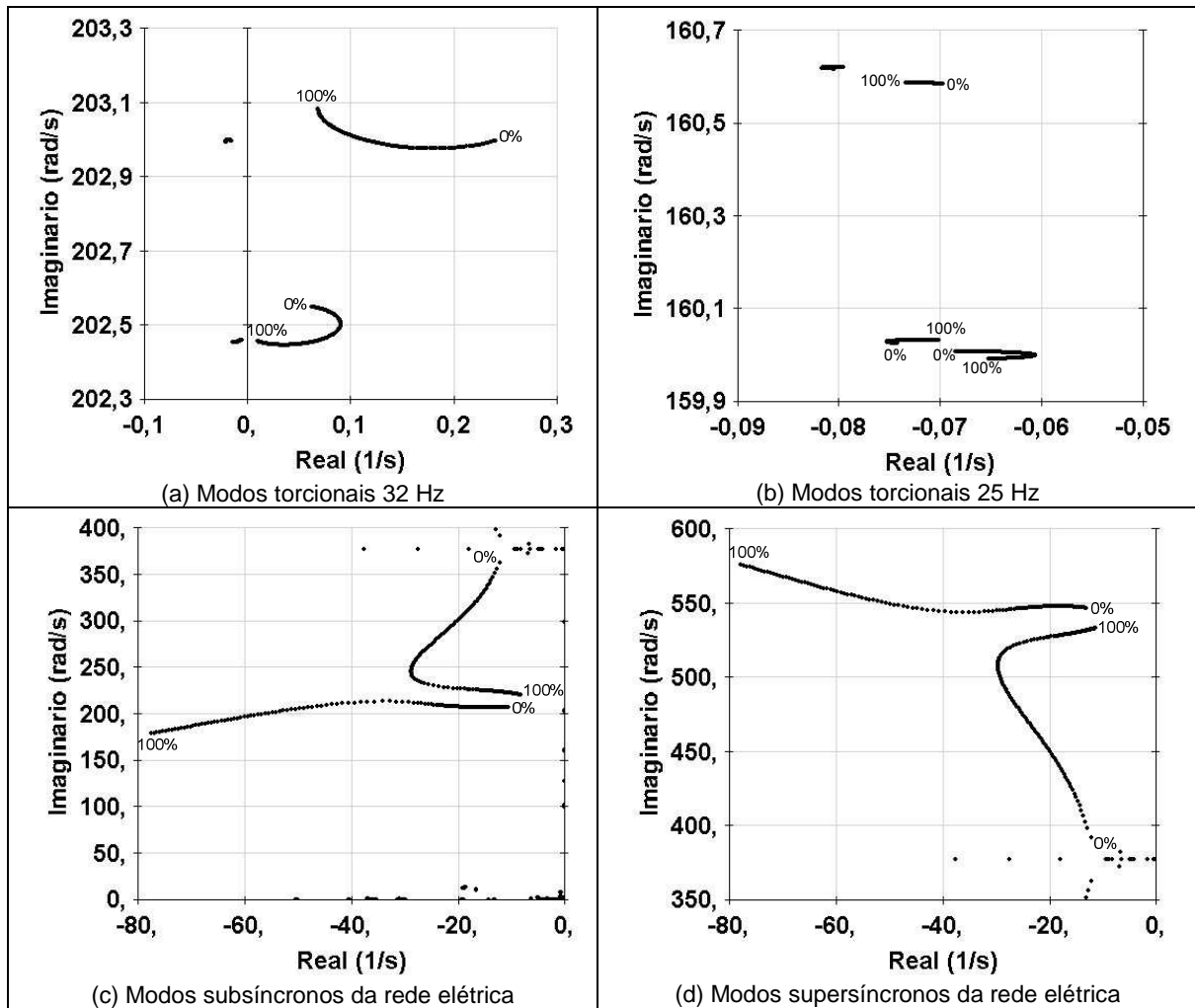


Figura 8 – Detalhamento dos principais modos torcionais e da rede elétrica para variação do grau de compensação da LT 6-7 de 0% a 100%, mantendo a CS da LT 5-6 em 50%

#### 4.0 - SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

Neste item serão apresentados resultados da aplicação do PacDyn no estudo de oscilações subsíncronas no sistema elétrico brasileiro utilizando a base de dados completa no formato ANATEM. Foram ainda incluídos os dados das massas individualizados das usinas de Angra 1 e Angra2, para avaliação do amortecimento das oscilações torcionais. Utilizando-se a base completa de dados do SIN, é necessária a utilização de modelo Y(s) pois a modelagem por sistema descritor exigirá uma quantidade de memória inviável para computadores de pequeno porte.

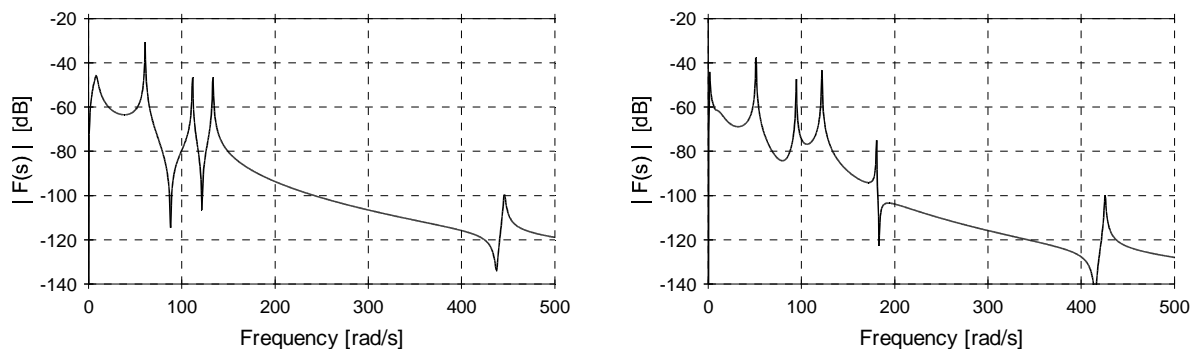


Figura 11 – Resposta em frequência de  $\omega/P_{mec}$  dos geradores de Angra1 e Angra2, respectivamente (dB)

Deve-se ressaltar que neste estudo não se incluiu modelos especiais de compensadores estáticos (CER), capacitores série controlados (CSC) e elos de corrente contínua (CCAT) para alta frequência. Os CER e CSC já possuem modelagem em alta frequência no PacDyn adequada para a análise de RSS (11), (12) e alguns testes foram realizados comprovando a precisão e eficácia de utilização dos modelos (6)-(8), (12). No entanto estes modelos necessitam de dados adicionais para complementação dos dados do ANATEM, que ainda não constam no banco de dados atual do SIN. Por outro lado, os modelos de elos CCAT para análise de RSS ainda estão em desenvolvimento.

São apresentadas na Figura 11 as respostas em frequência das usinas de Angra 1 e Angra 2 destacando-se os modos torcionais definindo os picos de mais alta frequência dos gráficos. Ressalta-se que em ambos existe um modo torcional da ordem de 450 rad/s, acima da faixa de ressonância subsíncrona.

A Figura 11 mostra que, para o gerador de Angra 1, há polos dominantes em torno das frequências em torno de 8, 60, 110, 130 e 450 rad/s. Já para o gerador de Angra 2, a Figura 12 mostra que há pólos dominantes em torno das frequências 1, 50, 100, 120, 180 e 425 rad/s. Todas essas estimativas (puramente imaginárias) foram utilizadas no algoritmo *Multiple Dominant Pole Spectrum Eigensolution* (DPSE), com as respectivas funções de transferência, e os resultados obtidos são mostrados na Tabela 5. O primeiro modo de cada máquina é o eletromecânico total e os demais são torcionais. No caso de Angra 1 o modo eletromecânico é local e em Angra 2 corresponde ao modo de oscilação das duas usinas contra o resto do sistema, sendo de muito baixa frequência (0,25 Hz). Conforme conhecido, não há problema de amortecimento torcional para as usinas Angra 1 e Angra 2.

Tabela 5 – Modos eletromecânicos e torcionais obtidos utilizando modelagem para estudos de RSS

Angra 1			Angra 2		
Polo	$\zeta$ (%)	f(Hz)	Polo	$\zeta$ (%)	f(Hz)
$-1.7810 \pm j7.9227$	21.93	1.26	$-0.2197 \pm j1.5634$	13.92	0.25
$-0.1915 \pm j60.5532$	0.32	9.26	$-0.1352 \pm j51.1896$	0.26	8.15
$-0.1673 \pm j111.3302$	0.15	17.72	$-0.0721 \pm j94.3317$	0.08	15.01
$-0.1788 \pm j133.2944$	0.13	21.21	$-0.0524 \pm j121.8080$	0.04	19.39
$-0.1.1330 \pm j445.8236$	0.25	70.96	$-0.0935 \pm j180.3533$	0.05	28.70
			$-0.6001 \pm j425.5441$	0.14	67.73

Apresenta-se em seguida a comparação dos modelos reduzidos no tempo e em frequência formados pelas componentes modais dos pólos dominantes obtidos anteriormente. Verifica-se uma concordância muito boa com o modelo completo.

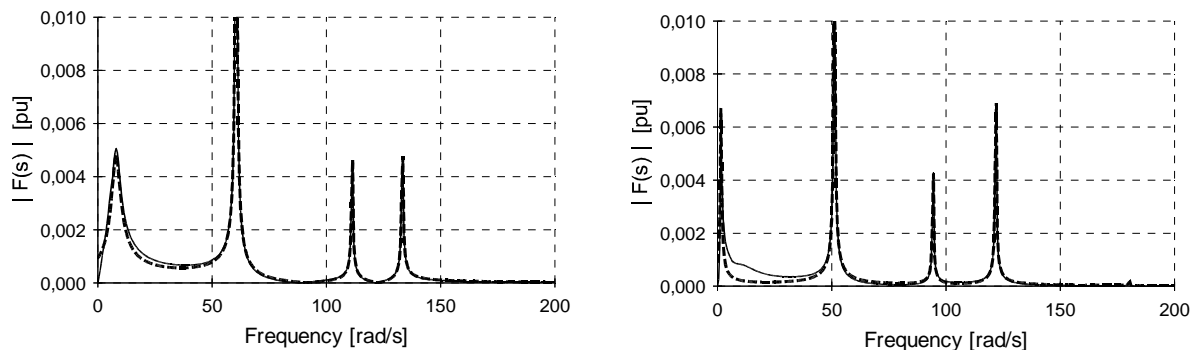


Figura 12 – Comparação entre modelos completo e reduzido na resposta em frequência de  $\omega/P_{mec}$  dos geradores de Angra1 e Angra2, respectivamente (escala linear)

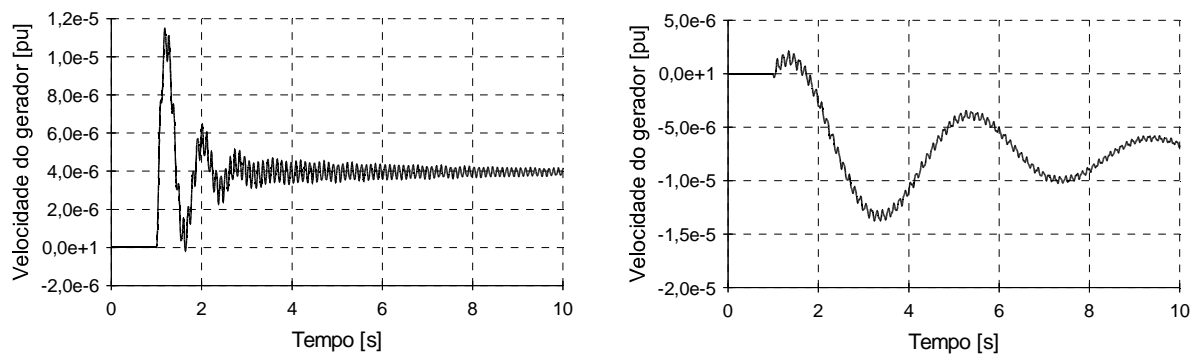


Figura 13 – Resposta no tempo do modelo reduzido da variação de velocidade dos geradores de Angra1 e Angra2, respectivamente, para um degrau de 0,01 p.u. na potência mecânica de cada um



## 5.0 - CONCLUSÃO

Com os desenvolvimentos e resultados apresentados neste artigo, conclui-se que o estudo de ressonância subsíncrona a pequenos sinais pode ser realizado em casos testes de estabilidade eletromecânica, de pequeno e grande porte, com um esforço mínimo de preparação de dados. Esta análise linear pode ser feita de forma muito rápida e permite fornecer informações preliminares importantes, tais como se a presença de uma compensação série terá interação torcional com uma determinada usina, a frequência do modo de oscilação subsíncrono e dos modos torcionais críticos, a faixa de valores de compensação em que o fenômeno é agravado, a interação torcional entre múltiplas usinas, entre outras. Estas informações, além de auxiliarem na determinação dos casos críticos a serem analisados na simulação não linear por um programa de simulação de transitórios eletromagnéticos, pode ser importante para determinação de soluções eficazes para o problema, reduzindo significativamente o esforço de análise deste tipo de estudo e mitigando eventuais problemas encontrados. Conclui-se portanto que o trabalho realizado contribuirá significativamente no auxílio de estudos desta natureza.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) P. Kundur, Power System Stability and Control, New York: McGraw-Hill, 1994.
- (2) P.M. Anderson, B.L. Agrawal, J.E. Van Ness, Subsynchronous Resonance in Power Systems, New York: IEEE Press, 1988.
- (3) PacDyn User's Manual, CEPEL, 2013.
- (4) S. Gomes Jr., P. E. M. Quintão, N. Martins, "Subsynchronous Resonance Results obtained with a Comprehensive Small Signal Stability Program", IX Symposium of Specialist in Electric Operational and Expansion Planning, Rio de Janeiro, Maio, 2004.
- (5) 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 Specialist in Electric Operational and Expansion Planning, Florianópolis, Maio, 2006..
- (6) F. C. Jusan, S. Gomes Jr. ; G. N. Taranto, "Linear Analysis of Subsynchronous Resonance and Torsional Interaction with Power System Stabilizers". XI Simposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning - SEPOPE, 2009, Belém, 2009.
- (7) F. C. Jusan, S. Gomes Jr., G. N. Taranto, "SSR Results Obtained with a Dynamic Phasor Model of SVC Using Modal Analysis", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 32, Issue 6, pp. 571-582, July 2010.
- (8) F. C. Jusan, S. Gomes Jr. ; G. N. Taranto, "Análise da influência da estrutura e do controle do TCSC no amortecimento de oscilações subsíncronas usando um modelo avançado no domínio s". Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRE - XIV ERIAC, 2011, Paraguai, 2011.
- (9) S. Gomes Jr., ; T. S. Amaral, "Análise da Estabilidade a Pequenos Sinais do SIN pelo PacDyn utilizando Dados do ANATEM". XII SEPOPE, 2012, Rio de Janeiro, 2012.
- (10) S. Gomes Jr., A. Castro, T. J. M. A. Parreiras, "Integração entre o PacDyn e ANATEM para Estudos Dinâmicos de Sistema Elétricos", XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE, Recife, 2009.
- (11) S. Gomes Jr., N. Martins, A. Stankovic, "Improved Controller Design Using New Dynamic Phasor Models of SVC's Suitable For High Frequency Analysis", Transmission and Distribution Conference and Exposition, Dallas, 22-24 Maio, 2006.
- (12) S. Gomes Jr.; F. L. Lirio. "Ferramenta Computacional para Ajuste de Múltiplos FACTS (SVC e TCSC) considerando possíveis Interações Dinâmicas Adversas". XI Simposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning - SEPOPE, 2009, Belém. 2009.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Sergio Gomes Jr. 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 e em 2004 fez um pós-doutorado na Northeastern University em Boston, Estados Unidos. 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 adjunto 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.



Fernando Cattán Jusan graduou-se em Engenharia Elétrica no CEFET-RJ em 2003, concluiu Mestrado também em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2007. Desde 2004 trabalha em Furnas como engenheiro no Departamento de Estudos Eletroenergéticos da Operação. Suas principais áreas de interesse são: dinâmica e controle de sistemas de potência, transmissão em corrente contínua (HVDC) e FACTS, análise a pequenos sinais, harmônicos e oscilações subsíncronas. É membro do IEEE e do Comitê de Estudos B4 do Cigré-Brasil.



Tiago Santana do Amaral graduou-se em Engenharia Elétrica em 2004 pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, concluiu Mestrado também em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2007. Desde 2006 é pesquisador do Cepel trabalhando na pesquisa e desenvolvimento de programas computacionais para a análise de sistemas de potência. Suas principais áreas de interesse são: confiabilidade e dinâmica e controle de sistemas de potência.