



**David Francisco Delgado Paco**

**Agregação Dinâmica de Turbinas e Reguladores  
de Velocidade: Modelos 02, 03 e 05 do Anatem**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Eduardo José Siqueira Pires de Souza

Rio de Janeiro  
Agosto de 2004



**David Francisco Delgado Paco**

**Agregação Dinâmica de Turbinas e Reguladores de  
Velocidade: Modelos 02, 03 e 05 do Anatem**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Eduardo José Siqueira Pires de Souza**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

**Eng. Nilo José Pereira de Macedo, M. Sc.**

FURNAS

**Dr. Jorge Luiz de Araujo Jardim**

ONS

**Prof. Eduardo Jorge Pires Pacheco**

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 17 de agosto de 2004.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **David Francisco Delgado Paco**

Graduou-se em Engenharia Elétrica na UNSAAC (Universidad Nacional San Antonio de Abad-Cusco-Perú) em 1995.

#### Ficha Catalográfica

Paco, David Francisco Delgado.

Agregação dinâmica de turbinas e reguladores de velocidade: modelos 02, 03 e 05 do anatem / David Francisco Delgado Paco; orientador: Eduardo José Siqueira Pires de Souza. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

103 f.: il.; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Estabilidade transitória. 3. Equivalentes dinâmicos. 4. Agregação dinâmica. 5. Reguladores de velocidade. 6. Geradores coerentes. 7. Turbinas. I. de Souza, Eduardo José S. Pires II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Aos meus pais David Francisco e Genoveva, a quem devo todas as minhas  
conquistas na vida.

Às minhas irmãs Maribel, Silvia e Luscinda.

Aos meus sobrinhos Lizita, Magnolia e Nando.

## Agradecimentos

A Deus, pela infinita generosidade do dom da vida.

Ao professor Eduardo José Siqueira Pires de Souza, pela dedicação, incentivo, competência indiscutível e paciência no acompanhamento do presente trabalho.

À PUC-Rio pela bolsa de isenção acadêmica concedida.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio pelos ensinamentos e ajuda.

À Amelia pela amizade e os conselhos.

Aos parentes Francisco, Germán, Maurinho e Rosa.

A todos os amigos do curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio, muito especialmente ao Leonardo Xavier da Silva e à Sabrina da Silva Santos.

## Resumo

Paco, David Francisco Delgado; Pires de Souza, Eduardo José Siqueira (orientador). **Agregação dinâmica de turbinas e reguladores de velocidade: modelos 02, 03 e 05 do Anatem.** Rio de Janeiro, 2004. 103p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação trata do problema de agregação dinâmica de modelos de turbinas e reguladores de velocidade de unidades geradoras coerentes, visando o cálculo de equivalentes dinâmicos precisos para estudos de estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica. Os modelos de turbina e regulador de velocidade considerados neste trabalho são do banco de dados de estabilidade do sistema elétrico brasileiro (modelos do Anatem). A metodologia empregada para o cálculo de equivalentes dinâmicos apresenta três etapas básicas: a identificação de geradores coerentes, a redução estática da rede e a agregação dinâmica dos modelos das unidades geradoras coerentes. A agregação dinâmica de um grupo de unidades geradoras coerentes consiste em representar esse grupo através de uma ou mais unidades geradoras equivalentes. As unidades geradoras coerentes podem ser representadas por diferentes modelos de máquina síncrona, sistema de excitação, estabilizador, turbina e regulador de velocidade. Os parâmetros lineares dos modelos equivalentes são ajustados numericamente através do método de Levenberg-Marquardt para resolver o problema de otimização multivariável. As respostas em frequência são apresentadas em diagramas de Bode (módulo e fase). O bem conhecido sistema New England é considerado para a avaliação do desempenho dinâmico dos equivalentes. As curvas de oscilação angular e de potência elétrica dos geradores do sistema interno, assim como curvas de tensão em barras, obtidas com o sistema equivalente são comparadas com aquelas obtidas com a simulação do sistema completo.

## Palavras – chave

Estabilidade transitória; equivalentes dinâmicos; geradores coerentes; agregação dinâmica; reguladores de velocidade, turbinas.

## Abstract

Paco, David Francisco Delgado; Pires de Souza, Eduardo José Siqueira (Advisor). **Dynamic aggregation of turbines and speed governors: Anatem models 02, 03 and 05**. Rio de Janeiro, 2004. 103p. M.Sc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation deals with the problem of dynamic aggregation of turbine and speed governor models of coherent generating units to calculate dynamic equivalents for power system transient stability studies. The turbine and speed governor models considered in this work are in the Brazilian electrical system stability database (Anatem models). The methodology used for the calculation of coherency-based dynamic equivalents has three basic steps: the identification of the coherent groups of generating units, the static reduction of the external network and the dynamic aggregation of coherent generating unit models. The dynamic aggregation of a group of coherent generating units consists of the representation of this group by one or more equivalent generating units. The coherent generating units can be represented by different models of synchronous machine, excitation system, stabilizer, turbine and speed governor. The linear parameters of the equivalent models are numerically adjusted using the Levenberg-Marquardt method in order to solve the multivariable optimization problem. The frequency responses are presented in Bode diagrams (magnitude and phase). The well known New England system is considered for the evaluation of the dynamic performance of the equivalents. The angular swing curves and electric power curves of the internal system generators as well as bus voltage curves obtained with the equivalent system are compared with those obtained with the simulation of the complete system.

## Keywords

Transient stability; dynamic equivalents; coherent generators; dynamic aggregation; speed governors; turbines.

## Sumário

1. Introdução.....	19
1.1. Considerações gerais .....	19
1.2. Desenvolvimento histórico .....	21
1.3. Objetivo da dissertação.....	22
1.4. Estrutura da dissertação .....	23
2. Agregação Dinâmica de Modelos de Turbinas e Reguladores de Velocidade: Teoria .....	24
2.1. Introdução .....	24
2.2. Turbinas e reguladores de velocidade.....	26
2.2.1. Turbinas hidráulicas e sistemas de regulação.....	26
2.2.1.1. Função de transferência da turbina hidráulica.....	27
2.2.1.2. Regulador para turbinas hidráulicas .....	28
2.2.2. Turbinas a vapor e sistemas de regulação.....	29
2.2.2.1. Modelagem de turbinas a vapor .....	29
2.2.2.2. Controle de turbinas a vapor.....	31
2.3. Aplicação do método de agregação dinâmica a turbinas e reguladores de velocidade .....	32
2.4. Implementação de modelos lineares de turbinas e reguladores de velocidade .....	34
2.4.1. Modelo 02.....	34
2.4.2. Modelo 03.....	36
2.4.3. Modelo 05.....	38

3. Agregação Dinâmica de Modelos de Turbinas e Reguladores de Velocidade: Resultados.....	41
3.1. Introdução .....	41
3.2. Análise do desempenho do método de agregação dinâmica.....	42
3.3. Conclusões.....	68
4. Cálculo de Equivalentes Dinâmicos.....	69
4.1. Introdução .....	69
4.2. Identificação de geradores coerentes.....	71
4.2.1. Medida de coerência e algoritmo de agrupamento .....	72
4.3. Redução estática da rede .....	73
4.3.1. Formulação REI .....	73
4.4. Desempenho dos equivalentes dinâmicos .....	76
4.5. Conclusões.....	91
5. Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros .....	92
6. Referências Bibliográficas.....	94
Apêndice 1: Dados do Sistema New England .....	97
Apêndice 2: Método de Levenberg-Marquardt .....	101

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Divisão do sistema elétrico para o cálculo de equivalentes dinâmicos .....	20
Figura 2.1 – Modelo de unidade geradora.....	25
Figura 2.2 – Regulador com compensação de estatismo transitorio .....	28
Figura 2.3 – Configuração da turbina a vapor .....	30
Figura 2.4 – Modelo linear de uma turbina a vapor com reaquecimento .....	31
Figura 2.5 – Diagrama de blocos do regulador de velocidade e turbinas equivalentes.....	33
Figura 2.6 – Diagrama de blocos do modelo 02 do conjunto turbina-regulador de velocidade .....	34
Figura 2.7 – Diagrama de blocos do modelo 03 do conjunto turbina-regulador de velocidade .....	36
Figura 2.8 – Diagrama de blocos do modelo 05 do conjunto turbina-regulador de velocidade .....	38
Figura 3.1 – Diagrama unifilar do sistema New England.....	42
Figura 3.2 – Diagramas de Bode das funções de transferência do modelo 02 de turbina e regulador de velocidade: Grupo (6,7). Equivalente modelo 02.....	44
Figura 3.3 – Diagramas de Bode das funções de transferência do modelo 02 de turbina e regulador de velocidade: Grupo (2,3). Equivalente modelo 02.....	45
Figura 3.4 – Diagramas de Bode das funções de transferência do modelo 03 de turbina e regulador de velocidade: Grupo (6,7). Equivalente modelo 03.....	46
Figura 3.5 – Diagramas de Bode das funções de transferência do modelo 03 de turbina e regulador de velocidade: Grupo (2,3). Equivalente modelo 03.....	47

Figura 3.6 – Diagramas de Bode das funções de transferência do modelo 03a de turbina e regulador de velocidade: Grupo (6,7). Equivalente modelo 03.....	48
Figura 3.7 – Diagramas de Bode das funções de transferência do modelo 03a de turbina e regulador de velocidade: Grupo (2,3). Equivalente modelo 03.....	49
Figura 3.8 – Diagramas de Bode das funções de transferência do modelo 05 de turbina e regulador de velocidade: Grupo (6,7). Equivalente modelo 05.....	50
Figura 3.9 – Diagramas de Bode das funções de transferência do modelo 05 de turbina e regulador de velocidade: Grupo (2,3). Equivalente modelo 05.....	51
Figura 3.10 – Diagramas de Bode das funções de transferência de turbina e regulador de velocidade - modelos 02 e 05: Grupo (6,7). Equivalente modelo 02.....	53
Figura 3.11 – Diagramas de Bode das funções de transferência de turbina e regulador de velocidade - modelos 02 e 05: Grupo (2,3). Equivalente modelo 02.....	54
Figura 3.12 – Diagramas de Bode das funções de transferência de turbina e regulador de velocidade - modelos 03 e 03a: Grupo (6,7). Equivalente modelo 03.....	56
Figura 3.13 – Diagramas de Bode das funções de transferência de turbina e regulador de velocidade - modelos 03 e 03a: Grupo (2,3). Equivalente modelo 03.....	57
Figura 3.14 – Diagramas de Bode das funções de transferência de turbina e regulador de velocidade - modelos 02 e 05: Grupo (6,7,4,2,3). Equivalente modelo 02.....	59
Figura 3.15 – Diagramas de Bode das funções de transferência de turbina e regulador de velocidade - modelos 03 e 03a: Grupo (6,7,4,2,3). Equivalente modelo 03.....	61
Figura 3.16 – Diagramas de Bode das funções de transferência de turbina e regulador de velocidade - modelos 02 e 05: Grupo (6,7,4). Equivalente modelo 02.....	63

Figura 3.17 –Diagramas de Bode das funções de transferência de turbina e regulador de velocidade - modelos 02 e 05: Grupo (2,3). Equivalente modelo 02.....	64
Figura 3.18 –Diagramas de Bode das funções de transferência de turbina e regulador de velocidade - modelos 03 e 03a: Grupo (6,7,4). Equivalente modelo 03.....	65
Figura 3.19 –Diagramas de Bode das funções de transferência de turbina e regulador de velocidade - modelos 03 e 03a: Grupo (2,3). Equivalente modelo 03.....	66
Figura 3.20 –Diagramas de Bode das funções de transferência do modelo 03a de turbina e regulador de velocidade: Grupo (6,7,4,2,3). Equivalente modelo 03.....	67
Figura 4.1 – Etapas básicas para o cálculo de equivalentes dinâmicos baseados em coerência .....	70
Figura 4.2 – Sistema original mostrando um grupo de barras a serem substituídas por uma barra equivalente .....	74
Figura 4.3 – Malha REI conectada ao grupo de barras ativas .....	74
Figura 4.4 – Malha REI com configuração estrela.....	75
Figura 4.5 – Curvas de oscilação do gerador 9 obtidas com o sistema completo para as situações com e sem turbinas e reguladores de velocidade.....	77
Figura 4.6 – Curvas de frequência do gerador 9 obtidas com o sistema completo para as situações com e sem turbinas e reguladores de velocidade.....	78
Figura 4.7 – Curvas de oscilação do gerador 9 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 29 (q=90%) - sistema completo x sistema equivalente .....	78
Figura 4.8 – Curvas de frequência do gerador 9 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 29 (q=90%) - sistema completo x sistema equivalente .....	79
Figura 4.9 – Curvas de oscilação do gerador 1 obtidas com o sistema completo para as situações com e sem turbinas e reguladores de velocidade (Modelo 02) .....	79

Figura 4.10 –Curvas de oscilação do gerador 1 obtidas com o sistema equivalente para as situações com e sem turbinas e reguladores de velocidade (Modelo 02) .....	80
Figura 4.11 –Curvas de oscilação do gerador 8 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 29 (q=90%) - sistema completo x sistema equivalente .....	80
Figura 4.12 –Curvas de potência elétrica do gerador 1 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 29 (q=90%) - sistema completo x sistema equivalente .....	81
Figura 4.13 –Curvas de tensão na barra de carga 26 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 29 (q=90%) - sistema completo x sistema equivalente .....	81
Figura 4.14 –Curvas de oscilação do gerador 1 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 29 (q=90%) - sistema completo x sistema equivalente. RGT e EST considerados.....	82
Figura 4.15 –Curvas de potência elétrica do gerador 8 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 29 (q=90%) - sistema completo x sistema equivalente. RGT e EST considerados.....	82
Figura 4.16 –Curvas de tensão na barra de carga 25 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 29 (q=90%) - sistema completo x sistema equivalente. RGT e EST considerados.....	83
Figura 4.17 –Curvas de oscilação do gerador 1 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 29 (q=90%) - sistema completo x sistema equivalente .....	83
Figura 4.18 –Curvas de potência elétrica do gerador 8 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 29 (q=90%) - sistema completo x sistema equivalente .....	84
Figura 4.19 –Curvas de tensão na barra de carga 25 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 29 (q=90%) - sistema completo x sistema equivalente .....	84

Figura 4.20 –Curvas de oscilação do gerador 9 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 25 ( $q=90\%$ ) - sistema completo x sistema equivalente .....	85
Figura 4.21 –Curvas de potência elétrica do gerador 8 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 25 ( $q=90\%$ ) - sistema completo x sistema equivalente .....	85
Figura 4.22 –Curvas de tensão na barra de carga 28 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 25 ( $q=90\%$ ) - sistema completo x sistema equivalente .....	86
Figura 4.23 –Curvas de oscilação do gerador 8 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 25 ( $q=90\%$ ) - sistema completo x sistema equivalente .....	86
Figura 4.24 –Curvas de potência elétrica do gerador 1 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 25 ( $q=90\%$ ) - sistema completo x sistema equivalente .....	87
Figura 4.25 –Curvas de tensão na barra de carga 29 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 25 ( $q=90\%$ ) - sistema completo x sistema equivalente .....	87
Figura 4.26 –Curvas de oscilação do gerador 1 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 29 ( $q=50\%$ ) - sistema completo x sistema equivalente .....	88
Figura 4.27 –Curvas de potência elétrica do gerador 8 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 29 ( $q=50\%$ ) - sistema completo x sistema equivalente .....	88
Figura 4.28 –Curvas de tensão na barra de carga 2 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 29 ( $q=50\%$ ) - sistema completo x sistema equivalente .....	89
Figura 4.29 –Curvas de oscilação do gerador 9 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 29 ( $q=50\%$ ) - sistema completo x sistema equivalente .....	89
Figura 4.30 –Curvas de potência elétrica do gerador 1 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 29 ( $q=50\%$ ) - sistema completo x sistema equivalente .....	90

Figura 4.31 –Curvas de tensão na barra de carga 25 para curto-circuito trifásico aplicado na barra 29 ( $q=50\%$ ) - sistema completo x sistema equivalente .....90

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Parâmetros das turbinas e reguladores de velocidade individuais (modelo 02) e dos modelos equivalentes: Grupos (6,7) e (2,3) .....	44
Tabela 3.2 – Parâmetros das turbinas e reguladores de velocidade individuais (modelo 03) e dos modelos equivalentes: Grupos (6,7) e (2,3) .....	46
Tabela 3.3 – Parâmetros das turbinas e reguladores de velocidade individuais (modelo 03a) e dos modelos equivalentes: Grupos (6,7) e (2,3) .....	48
Tabela 3.4 – Parâmetros das turbinas e reguladores de velocidade individuais (modelo 05) e dos modelos equivalentes: Grupos (6,7) e (2,3) .....	50
Tabela 3.5 – Parâmetros das turbinas e reguladores de velocidade individuais (modelos 02 e 05) e dos modelos equivalentes: Grupos (6,7) e (2,3).....	52
Tabela 3.6 – Parâmetros das turbinas e reguladores de velocidade individuais (modelos 03 e 03a) e dos modelos equivalentes: Grupos (6,7) e (2,3).....	55
Tabela 3.7 – Parâmetros das turbinas e reguladores de velocidade individuais (modelos 02 e 05) e do modelo equivalente: Grupo (6,7,4,2,3).....	58
Tabela 3.8 – Parâmetros das turbinas e reguladores de velocidade individuais (modelos 03 e 03a) e do modelo equivalente: Grupo (6,7,4,2,3).....	60
Tabela 3.9 – Parâmetros das turbinas e reguladores de velocidade individuais (modelos 02 e 05) e dos modelos equivalentes: Grupos (6,7,4) e (2,3).....	62
Tabela 3.10 – Parâmetros das turbinas e reguladores de velocidade individuais (modelos 03 e 03a) e dos modelos equivalentes: Grupos (6,7,4) e (2,3).....	65

Tabela 3.11–Parâmetros das turbinas e reguladores de velocidade individuais (modelo 03a) e do modelo equivalente: Grupo (6,7,4,2,3).....	67
Tabela A.1 – Dados de barras do Sistema New England.....	97
Tabela A.2 – Dados de linhas e transformadores do Sistema New England.....	98
Tabela A.3 – Dados das máquinas (MD02 - Anatem).....	99
Tabela A.4 – Dados dos reguladores de tensão (MD01 - Anatem).....	99
Tabela A.5 – Dados dos estabilizadores de sistemas de potência (MD01 - Anatem).....	99
Tabela A.6 – Dados de turbinas e reguladores de velocidade (MD02 - Anatem).....	99
Tabela A.7 – Dados de turbinas e reguladores de velocidade (MD03 - Anatem).....	100
Tabela A.8 – Dados de turbinas e reguladores de velocidade (MD05 - Anatem).....	100

## Lista de Símbolos

FTE:	Função de transferência equivalente.....	23
FTA:	Função de transferência agregada.....	23
i:	Indicador de número de gerador.....	23
j:	Número complexo.....	23
$\omega$ :	Freqüência Angular.....	23
$\omega_{REF}$ :	Freqüência angular de referência.....	24
U:	Sinal de entrada do estabilizador.....	24
$V_{so}$ :	Sinal e saída do estabilizador.....	24
$V_T$ :	Tensão terminal do gerador.....	24
$I_T$ :	Corrente do gerador.....	24
$P_m$ :	Potência mecânica.....	24
$P_e$ :	Potência elétrica.....	24
G(s):	Função de transferência do modelo turbina-regulador de velocidade.....	31
$G_G(s)$ :	Função de transferência do regulador de velocidade.....	32
$G_T(s)$ :	Função de transferência da turbina .....	32
$G^{eq}(s)$ :	Função de transferência do modelo turbina-regulador equivalente.....	32
$C_{ij}$ :	Índice de freqüência.....	72
q:	Índice de qualidade da coerência.....	72
RGV:	Regulador de velocidade.....	77
EST:	Estabilizador de Sistemas de Potência.....	81
RGT:	Regulador de Tensão.....	81